



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
FACULDADE DE METEOROLOGIA**

**DESCARGAS ELÉTRICAS ATMOSFÉRICAS EM
SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA NO SUL
DA AMÉRICA DO SUL**

KELLEN CARLA LIMA

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Pelotas, sob a orientação da Professora Doutora Roseli Gueths Gomes, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, para obtenção do título de Mestre em Ciências (M.S.).

PELOTAS
Rio Grande do Sul - Brasil
Fevereiro de 2005

Dados de catalogação na fonte:
Ubirajara Buddin Cruz – CRB-10/901
Biblioteca de Ciência & Tecnologia - UFPel

L732d

Lima, Kellen Carla

Descargas elétricas atmosféricas em sistemas convectivos de mesoescala no sul da América do Sul / Kellen Carla Lima ; orientador Roseli Gueths Gomes. – Pelotas, 2005. – 118f. : il. color. – Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Meteorologia. Faculdade de Meteorologia. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2005.

1.Meteorologia. 2.Sistemas convectivos de mesoescala. 3.Descargas elétricas atmosféricas. 4.Modelagem atmosférica. 5.América do Sul. I.Gomes, Roseli Gueths. II. Título.

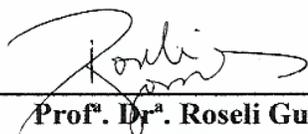
CDD: 551.56098

KELLEN CARLA LIMA

**DESCARGAS ELÉTRICAS ATMOSFÉRICAS EM
SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA NO SUL
DA AMÉRICA DO SUL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Pelotas, sob a orientação do Professora Doutora Roseli Gueths Gomes, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia para obtenção do título de Mestre em Ciências (M.S.).

APROVADA: 11 de fevereiro de 2005



**Prof. Dr.^a Roseli Gueths Gomes
(Orientadora)**



Prof. Dr.^a Cláudia Rejane Jacondino de Campos



Prof. Dr. José Francisco Dias da Fonseca



**Prof. Dr. Walter de Araújo Motta
(Convidado Externo)**

À minha amabilíssima Mamãe Raimunda Lima (*in memorian*) pelo seu amor, dedicação e incondicional esforço para me dar uma digna educação. A vitória desta etapa de minha vida é especialmente para você minha inesquecível Mamãe.

AGRADECIMENTOS

Ao nosso maravilhoso Deus pela constante presença em minha vida, abençoando-me com momentos alegres e ensinando-me a tirar proveitos positivos dos momentos tristes.

À minha queridíssima avó materna, Raimunda Lima Modesto, pela sua ótima participação em minha criação, pois ela foi, é e sempre será muito importante em minha vida.

À minha adorável tia Rosa Lima (*in memorian*) que sempre esteve pronta para me ajudar nos momentos difíceis da vida. Sou muito grata ao tratamento que recebia como se fosse sua filha.

Ao meu pai Benedito, madrasta Jorgina e irmãos Paulo, Paula e Patrícia pela amizade, apoio, confiança e disponibilidade em participar de minha vida, em um momento delicado. E pela certeza que sempre estarão ao meu lado para o que der e vier.

Ao meu namorado e eterno amigo Guilherme Martins pelo seu amor, amizade, paciência, carinho, afeto, compreensão e infinitos adjetivos de um homem de caráter e personalidade admiráveis.

À minha orientadora Roseli Gueths Gomes, com quem aprendi bastante como ser humano e profissional. Leverei comigo lembranças de uma pessoa: amiga, generosa, atenciosa, sincera, humilde, compreensiva e hilária. E da profissional: inteligente, educadora, responsável e minuciosa, onde tive enorme satisfação em trabalhar.

Ao Doutor Sebastião Gomes e equipe pelo apoio técnico no que diz respeito ao modelo de mesoescala MM5.

À banca examinadora pelas construtivas e valiosas sugestões, para o aprimoramento do trabalho.

Aos meus queridíssimos amigos: Clívia, Carla e Welbert, pela verdadeira amizade.

À Jussara, Adão e família pela amizade, atenção e hospitalidade com que fui acolhida no seu lar, como se fosse alguém da família.

Aos Paraenses que conviveram comigo em Pelotas: Adriano, Edna, Renata e Edmir.

Ao casal Paraense Marco e Alda pela amizade e disponibilidade de subsídios durante minha estada em Pelotas.

À Universidade Federal de Pelotas pela oportunidade de realização do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia.

Aos professores do Curso de Pós-Graduação pelos preciosos ensinamentos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela contemplação de bolsa de estudo.

Ao Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR) pela cessão dos dados de Descargas Elétricas Atmosféricas.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para que este trabalho fosse concretizado.

ÍNDICE

	Página
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS	xiii
RESUMO	xvi
ABSTRACT	xviii
1. <u>INTRODUÇÃO</u>	1
2. <u>REVISÃO DE LITERATURA</u>	4
2.1. Sistemas Convectivos de Mesoescala	4
2.2. Descargas Elétricas Atmosféricas	9
2.2.1. Definição de Descargas Elétricas Atmosféricas	9
2.2.2. Eletricidade Atmosférica.....	9
2.2.3. Mecanismos de Geração e Separação de Cargas em Nuvens de Tempestades	11
2.2.3.1. Processos Microfísicos	11
2.2.3.2. Processos Macrofísicos	13
2.2.4. Classificação das Descargas Elétricas Atmosféricas.....	15
2.2.4.1. Nuvem-Solo	15
2.2.4.2. Outros tipos	17

2.2.5. Descargas Eléctricas Atmosféricas em Anos de El Niño	18
2.2.6. Descargas Eléctricas Atmosféricas no Globo	20
3. <u>MATERIAL E MÉTODOS</u>	24
3.1. Descargas Eléctricas Atmosféricas	24
3.1.1. Sistema de Detecção no Brasil	24
3.1.1.1. Técnicas de Detecção no Solo	26
3.1.2. Dados no Sul do Brasil	30
3.2. Sistemas Convectivos de Mesoescala	33
3.2.1. Seleção dos Casos de Estudo	33
3.2.1.1. Imagens do Satélite Geostacionário	34
3.2.1.2. Modelo de Mesoescala MM5	35
3.2.1.3. Modelo de Mesoescala ETA	40
3.2.1.4. Validação do Modelo MM5	40
4. <u>RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	45
4.1. Estudo sobre as Descargas Eléctricas Atmosféricas	45
4.1.1. Distribuição Anual	46
4.1.2. Distribuição Mensal	47
4.2. Estudo dos Casos Seleccionados.....	50
4.2.1. Caso: 13-14 de março de 2002	50
4.2.1.1. Interpretação das Imagens de Satélite	50
4.2.1.2. Distribuição Espacial das Descargas Eléctricas Atmosféricas	53
4.2.1.3. Modelo de Mesoescala MM5	57
4.2.2. Caso: 22-23 de dezembro de 2003	66
4.2.2.1. Interpretação das Imagens de Satélite	66
4.2.2.2. Distribuição Espacial das Descargas Eléctricas Atmosféricas.....	69
4.2.2.3. Modelo de Mesoescala MM5	73
4.2.3. Caso: 19-20 de dezembro de 2003	82
4.2.3.1. Interpretação das Imagens de Satélite	82
4.2.3.2. Distribuição Espacial das Descargas Eléctricas Atmosféricas	85
4.2.3.3. Modelo de Mesoescala MM5	89
4.3. Influência da Temperatura da Superfície do Mar.....	98
4.4. Discussão dos Resultados.....	102
5. <u>CONCLUSÕES</u>	108
6. <u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	110

LISTA DE TABELAS

	Página
TABELA 1 – Configurações do MM5 para simular os casos de SCM. O domínio D1 foi comum a todos. Os domínios D2, D3 e D4 foram utilizados para os SCM que ocorreram nos dias 13-14 março/2002, 22-23 dezembro/2003 e 19-20 dezembro/2003, respectivamente.....	36
TABELA 2 – Parametrizações utilizadas nos casos de SCM analisados neste trabalho.....	38
TABELA 3 – Simulações realizadas com o modelo MM5, para os SCM estudados neste trabalho.....	39
TABELA 4 – Variáveis meteorológicas empregadas na análise dos três SCM.....	39

LISTA DE FIGURAS

	Página
FIGURA 1 – Representação dos estágios do ciclo de vida de uma nuvem <i>Cumulonimbus</i> . Fonte: Adaptada de Faria (2002).....	6
FIGURA 2 – Representação esquemática do circuito elétrico atmosférico global. Fonte: Adaptada de Faria (2002).....	10
FIGURA 3 – Curva de Carnegie. Fonte: Faria (1998).....	10
FIGURA 4 – Representação do processo colisional indutivo de separação de cargas. Fonte: Adaptada de Faria (2002).....	12
FIGURA 5 – Representação do processo termoeletrico de separação de cargas. Fonte: Adaptada de Faria (2002).....	13
FIGURA 6 – Representação do transporte de cargas segundo a teoria gravitacional. Fonte: Adaptada de Faria (2002).....	14
FIGURA 7 – Representação do transporte de cargas segundo a teoria convectiva. Fonte: Adaptada de Faria (2002).....	15
FIGURA 8 – Representação de uma descarga elétrica atmosférica nuvem-solo negativa. Fonte: http://www.lightning.dge.inpe.br	16
FIGURA 9 – Representação de uma descarga elétrica atmosférica nuvem-solo positiva. Fonte: Adaptada de http://www.lightning.dge.inpe.br	17

FIGURA 10 – Representação de Descargas Elétricas Atmosféricas, dos tipos intranuvem, entre nuvens e nuvem-ar.....	18
FIGURA 11 – Esquema da circulação do vento em anos (a) normais e (b) El Niño.....	19
FIGURA 12 – Distribuição Global de Descargas Elétricas Atmosféricas, com base em observações feitas a bordo do satélite TRMM. As regiões hachuradas no mapa indicam densidade de DEA superiores a 10 DEA por quilômetro quadrado por ano. Fonte: Adaptada de Pinto Jr. e Pinto (2000).....	21
FIGURA 13 – Localização das antenas detectoras de Descargas Elétricas Atmosféricas no Brasil. Fonte: Adaptada de Faria (2002).....	25
FIGURA 14 – Sensor <i>Lightning Position and Tracking System</i> (LPATS). Fonte: <i>Global Atmospheric</i> (2004).....	27
FIGURA 15 – Linhas hiperbólicas de diferença de tempo constante. Fonte: Adaptada de Gomes (2002).....	27
FIGURA 16 – Localização da fonte de emissão por intersecção hiperbólica. Fonte: Adaptada de Gomes (2002).....	28
FIGURA 17 – Sensor <i>IMProved Accuracy from Combined Tecnology</i> (IMPACT). Fonte: <i>Global Atmospheric</i> (2004).....	29
FIGURA 18 – Esquematisação para detecção de DEA utilizando sensores IMPACT. Fonte: <i>Global Atmospheric</i> (2004).....	29
FIGURA 19 – Sistema de detecção de Descargas Elétricas Atmosféricas do SIMEPAR. Fonte: Adaptada de Beneti e Vasconcellos (2002).....	31
FIGURA 20 – (a) Área de cobertura dos sensores de Descargas Elétricas Atmosféricas do SIMEPAR (retângulo vermelho) e topografia da América do Sul (hachurado); (b) detalhes da topografia do Estado do Paraná e cidades onde os sensores estão localizados.....	32
FIGURA 21 – Dados de Descargas Elétricas Atmosféricas organizados pelo SIMEPAR.....	33
FIGURA 22 – Escala de cores e respectiva temperatura (K) do topo da nebulosidade das imagens de satélite utilizadas.....	34
FIGURA 23 – Domínio maior de estudo (D1) comum aos três SCM analisados.....	36
FIGURA 24 – Fluxograma de funcionamento do modelo de mesoescala MM5.....	37
FIGURA 25 – Comparação da Temperatura do ar entre dados observados e campos simulados pelos modelos MM5 e ETA às 15HL do dia 13/03/2002 no Estado do Rio Grande do Sul.....	42

FIGURA 26 – Comparação da Temperatura do ar entre dados observados e campos simulados pelos modelos MM5 e ETA às 21HL do dia 13/03/2002 no Estado do Rio Grande do Sul.....	44
FIGURA 27 – Distribuição anual de Descargas Elétricas Atmosféricas em 2002 e 2003.....	46
FIGURA 28 – Distribuição mensal de Descargas Elétricas Atmosféricas no ano de 2002.....	49
FIGURA 29 – Distribuição mensal de Descargas Elétricas Atmosféricas no ano de 2003.....	49
FIGURA 30 – Seqüência de fragmentos das imagens do satélite geostacionário GOES-8, no canal infravermelho, referente ao caso 13-14 de março de 2002.....	52
FIGURA 31 – Distribuição espacial das DEA para o caso 13-14 de março de 2002.....	54
FIGURA 32 – a) Vento horizontal (domínio 1), b) Vento horizontal (domínio 2), c) Temperatura do ar (domínio 1), d) Temperatura do ar (domínio 2) e e) Razão de mistura (domínio 1) em superfície, com previsão de 06 horas válida para às 15HL do dia 13/03/2002.....	59
FIGURA 33 – a) Vento horizontal (domínio 1), b) Vento horizontal (domínio 2), c) Temperatura do ar (domínio 1), d) Temperatura do ar (domínio 2) e e) Razão de mistura (domínio 1) em superfície, com previsão de 10 horas válida para às 19HL do dia 13/03/2002.....	60
FIGURA 34 – a) Vento horizontal (domínio 1), b) Vento horizontal (domínio 2), c) Temperatura do ar (domínio 1), d) Temperatura do ar (domínio 2) e e) Razão de mistura (domínio 1) em superfície, com previsão de 02 horas válida para às 23HL do dia 13/03/2002.....	62
FIGURA 35 – Vento horizontal (domínio 1), para os três períodos de análise referente ao dia 13/03/2002 no nível de pressão 850hPa.....	64
FIGURA 36 – Vento horizontal (domínio 1), para os três períodos de análise referente ao dia 13/03/2002 no nível de pressão 200hPa.....	65
FIGURA 37 – Seqüência de fragmentos das imagens do satélite geostacionário GOES-12, no canal infravermelho, referente ao caso 22-23 de dezembro de 2003.....	68
FIGURA 38 – Distribuição espacial das DEA para o caso 22-23 de dezembro de 2003.....	70
FIGURA 39 – a) Vento horizontal (domínio 1), b) Vento horizontal (domínio 3), c) Temperatura do ar (domínio 1), d) Temperatura potencial equivalente (domínio 3) e e) Razão de mistura (domínio 1) em superfície, com previsão de 03 horas válida para às 12HL do dia 22/12/2003.....	74

FIGURA 40 – a) Vento horizontal (domínio 1), b) Vento horizontal (domínio 3), c) Temperatura do ar (domínio 1), d) Temperatura potencial equivalente (domínio 3) e e) Razão de mistura (domínio 1) em superfície, com previsão de 05 horas válida para às 14HL do dia 22/12/2003.....	76
FIGURA 41 – a) Vento horizontal (domínio 1), b) Vento horizontal (domínio 3), c) Temperatura do ar (domínio 1), d) Temperatura potencial equivalente (domínio 3) e e) Razão de mistura (domínio 1) em superfície, com previsão de 07 horas válida para às 16HL do dia 22/12/2003.....	78
FIGURA 42 – Vento horizontal (domínio 1), para os três períodos de análise referente ao dia 22/12/2003 no nível de pressão 850hPa.....	80
FIGURA 43 – Vento horizontal (domínio 1), para os três períodos de análise referente ao dia 22/12/2003 no nível de pressão 200hPa.....	81
FIGURA 44 – Seqüência de fragmentos das imagens do satélite geostacionário GOES-12, no canal infravermelho, referente ao caso 19-20 de dezembro de 2003.....	84
FIGURA 45– Distribuição espacial das DEA para o caso 19-20 de dezembro de 2003	86
FIGURA 46 – a) Vento horizontal (domínio 1), b) Vento horizontal (domínio 4), c) Temperatura do ar (domínio 1), d) Temperatura do ar (domínio 4) e e) Razão de mistura (domínio 1) em superfície, análise das 21HL do dia 19/12/2003.....	90
FIGURA 47 – a) Vento horizontal (domínio 1), b) Vento horizontal (domínio 4), c) Temperatura do ar (domínio 1), d) Temperatura do ar (domínio 4) e e) Razão de mistura (domínio 1) em superfície com previsão de 04 horas válida para às 01HL do dia 20/12/2003.....	92
FIGURA 48 – a) Vento horizontal (domínio 1), b) Vento horizontal (domínio 4), c) Temperatura do ar (domínio 1), d) Temperatura do ar (domínio 4) e e) Razão de mistura (domínio 1) em superfície, com previsão de 10 horas válida para às 07HL do dia 20/12/2003.....	94
FIGURA 49 – Vento horizontal (domínio 1), para os três períodos de análise referente aos dias 19 e 20/12/2003 no nível de pressão 850hPa.....	96
FIGURA 50 – Vento horizontal (domínio 1), para os três períodos de análise referente aos dias 19 e 20/12/2003 no nível de pressão 200hPa.....	97
FIGURA 51 – Temperatura da superfície do mar (domínio 1), para os três períodos de análise referente ao caso dos dias 13 e 14/03/2002.....	99
FIGURA 52 – Temperatura da superfície do mar (domínio 1), para os três períodos de análise referente ao caso dos dias 22 e 23/12/2003.....	100
FIGURA 53 – Temperatura da superfície do mar (domínio 1), para os três períodos de análise referente ao caso dos dias 19 e 20/12/2003.....	101

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

A	Ampere
AED	<i>Atmospheric Electrical Discharges</i>
BLDN	<i>Brazil Lightning Detection Network</i>
BLM	<i>Bureau of Land Management</i>
C	<i>Celsius</i>
Cb	<i>Cumulonimbus</i>
CCM	Complexo Convectivo de Mesoescala
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
COLA	<i>Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies</i>
CPPMET	Centro de Pesquisas e Previsões Meteorológicas
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DA2000	<i>Distribution and Archive Module</i>
DEA	Descarga Elétrica Atmosférica
Dez	Dezembro
D1	Domínio 1
D2	Domínio 2
D3	Domínio 3
D4	Domínio 4

ELAT	Grupo de Eletricidade Atmosférica
EUA	Estados Unidos da América
FEPAGRO	Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária
FURNAS	Furnas Centrais Elétricas
g	Grama
GAI	<i>Global Atmospheric Incorporation</i>
GOES	<i>Geostationary Operational Environmental Satellite</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GrADS	<i>Grid Analysis and Display System</i>
HL	Hora Local
IMPACT	<i>IMProved Accuracy from Combined Technology</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
JAN	Jato de Altos de Níveis
JANm	Jato de Altos de Níveis de mesoescala
JBN	Jato de Baixos Níveis
K	Kelvin
kA	QuiloAmpere
Kg	Quilograma
kHz	QuiloHertz
km	Quilômetro
LI	Linha de Instabilidade
LIS	<i>Lightning Imaging Sensor</i>
LPATS	<i>Lightning Positioning and Tracking Sensor</i>
LP2000	<i>Location Processor Module</i>
m	Metro
Mar	Março
MCS	<i>Mesoscale Convective System</i>
MDF	<i>Magnetic Direction Finding</i>
MG	Minas Gerais
Mileseg	Milésimo de segundo
Min	Minuto
MM5	<i>Mesoscale Model</i>
N	Norte

NCAR	<i>National Center for Atmospheric Research</i>
NCEP	<i>National Center for Environmental Prediction</i>
NM2000	<i>Network Management Module</i>
NOAA	<i>National Oceanographic and Atmosphere Administration</i>
PR	Paraná
PSU	<i>Pennsylvania State University</i>
RIDAT	Rede Integrada de Detecção de Descargas Atmosféricas
RINDAT	Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas
RJ	Rio de Janeiro
S	Sul
SCM	Sistema Convectivo de Mesoescala
Seg	Segundo
SGBD	Sistema Gerenciador de Banco de Dados
SIMEPAR	Sistema Meteorológico do Paraná
SLT	Sistema de Localização de Tempestade
SUNYA	<i>State University of New York at Albany</i>
TI	Temperatura de Inversão
TOA	<i>Time Of Arrival</i>
TRMM	<i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i>
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
W	Oeste

RESUMO

LIMA, KELLEN CARLA. MS., Universidade Federal de Pelotas, Fevereiro 2005. **Descargas Eléctricas Atmosféricas em Sistemas Convectivos de Mesoescala no Sul da América do Sul.** Professora Orientadora: Roseli Gueths Gomes.

Os Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) são os mais importantes fenômenos meteorológicos causadores de Descargas Eléctricas Atmosféricas (DEA). Neste trabalho é pesquisada a incidência de Descargas Eléctricas Atmosféricas associadas a três Sistemas Convectivos de Mesoescala que ocorreram no sul da América do Sul e, também, a formação e evolução destes sistemas. Foram utilizadas imagens de satélite geostacionário realçadas, no canal infravermelho, dados de DEA para o período 2002-2003 e campos meteorológicos obtidos com o modelo de mesoescala MM5. Estes campos foram analisados em superfície, 850hPa e 200hPa. As distribuições anuais e mensais de atividade eléctrica mostraram que o ano de 2002 apresentou as maiores quantidades de DEA devido, pelo menos em parte, à influência do fenômeno El Niño. Nos meses quentes, quando é acentuada a ocorrência de SCM no Sul da América do Sul, foram detectadas as maiores quantidades de DEA, enquanto que os meses mais frios apresentaram os menores valores. Não foi possível relacionar a distribuição espacial das DEA com o ciclo de vida dos SCM devido a problemas de detecção dos

sensores. Os três SCM selecionados ocorreram em associação aos escoamentos do ar diferenciados, colocados em evidência pelo modelo MM5. O primeiro se formou devido à circulação de brisa marítima, no litoral Catarinense. O segundo ocorreu na fronteira oeste entre os Estados de Santa Catarina e do Paraná, após a passagem de um sistema frontal. O terceiro se formou no leste da Argentina, devido às interações entre a circulação da Alta Subtropical do Atlântico Sul, ventos descendentes da Cordilheira dos Andes e ventos da região tropical. Ainda, o modelo MM5 mostrou que os SCM se desenvolveram em um ambiente baroclínico e com elevados valores de razão de mistura.

ABSTRACT

LIMA, KELLEN CARLA. MS., Federal University of Pelotas, February 2005. **Atmospheric Electrical Discharges in Mesoscale Convective System at South of South America.** Adviser: Roseli Gueths Gomes.

Mesoscale Convective Systems (MCS) are the most important meteorological phenomena that generate Atmospheric Electrical Discharges (AED). In this work it is researched the incidence of Atmospheric Electrical Discharges in association to three Mesoscale Convective Systems that occurred at South of South America and also the formation and evolution of these systems. It was used enhanced geostationary satellite images, at infrared channel, AED data for the period 2002-2003 and meteorological patterns obtained with the mesoscale model MM5. These patterns were analyzed at surface, 850hPa and 200hPa. The annual and mensal distributions of the electrical activity showed that 2002 presented the greatest quantities of AED due to, at least in part, the influence of El Niño phenomenon. In warm months, when the occurrence of MCS at South of South America is accentuated, it were detected the greatest quantities of AED while cold months presented the minima values. It was not possible to associate the spatial distribution of AED with the life cycle of MCS due to detection problems of the sensors. The three selected MCS occurred in association to

different airflow that was put in evidence by the MM5 model. The first one has formed due to the maritime breeze circulation at the Catarinense's coastal. The second one occurred at the West border between Santa Catarina and Paraná States, after a frontal system passage. The third system formed at the East of Argentina, due to the interactions between the South Atlantic Subtropical High circulation, descendent winds from Andes Chain of Mountains and winds from the tropical region. The MM5 model showed that the MCS developed in a baroclinic environment with high mixing ratio values.

1. INTRODUÇÃO

Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) são fenômenos atmosféricos atuantes no sul da América do Sul principalmente nas estações quentes, mas também podem ocorrer nas estações frias. Eles se destacam pela difícil previsibilidade e, ainda, por produzirem excessivas quantidades de precipitação local, geralmente acompanhadas de Descargas Elétricas Atmosféricas (DEA). No Sul da América do Sul, tendem a predominar os Sistemas Convectivos de Mesoescala, sendo que as regiões de máxima ocorrência localizam-se na Argentina, oeste do Rio Grande do Sul e oeste do Paraná. As ocorrências de Descargas Elétricas Atmosféricas ligadas às atividades de tempestades geram vários transtornos para a sociedade em geral, pois cerca de 50 a 100 Descargas Elétricas Atmosféricas da nuvem para o solo ocorrem no planeta, a cada segundo (Pinto Jr. e Pinto, 2000). O Brasil, devido à sua grande extensão territorial e pelo fato de estar localizado numa região predominantemente tropical, é um dos países de maior ocorrência de Descargas Elétricas Atmosféricas do planeta. Estima-se que cerca de 100 milhões de Descargas Elétricas Atmosféricas da nuvem para o solo atinjam o Brasil por ano, ou seja, três Descargas Elétricas Atmosféricas por segundo.

Estudos sobre os Sistemas Convectivos de Mesoescala, grandes produtores de Descargas Elétricas Atmosféricas, despertam interesse devido ao fato das descargas atmosféricas causarem diversos prejuízos materiais, da ordem de milhões de dólares,

devido a colapsos ou desligamentos na rede de distribuição de energia elétrica, incêndios em florestas, residências, reservatórios, acidentes na aviação e em embarcações marítimas, acidentes nas torres de poços de petróleo, indústria espacial, danos aos sistemas de telefonia e de telecomunicação, campos e prédios, fatores estes que podem finalizar em mortes de seres humanos e de animais.

Assim, estudos sobre Descargas Elétricas Atmosféricas são relevantes, visto a gama de aplicações que seus resultados apresentam, tanto para fins científicos quanto sócio-econômicos. Não obstante se reconheça a importância das inúmeras pesquisas já realizadas sobre o assunto em questão, há ainda vários aspectos a serem descobertos e explorados.

Apesar de todo o esforço humano na tentativa de prever a atividade elétrica em tempestades, infelizmente este sucesso ainda não foi alcançado. Para uma previsão de grande eficiência, são necessários modelos conceituais para cada tipo de fenômeno atmosférico a fim de que, reconhecendo a sua gênese, seja possível realizar a sua previsão. Neste sentido, cada região geográfica tem suas próprias características (climatológicas e físicas), que precisam ser levadas em consideração e incorporadas propriamente em um modelo conceitual. Infelizmente, não há um modelo conceitual sobre os Sistemas Convectivos de Mesoescala, de um lado devido à grande diversidade em que eles ocorrem na natureza e, de outro lado, devido à limitação dos recursos experimentais. Então espera-se, com este trabalho, colaborar para o conhecimento dos Sistemas Convectivos de Mesoescala que ocorrem no Sul da América do Sul. Aspectos marcantes da circulação atmosférica serão colocados em evidência, quando da ocorrência de três Sistemas Convectivos de Mesoescala que se formaram por mecanismos físicos completamente distintos. Assim, os conhecimentos adquiridos neste trabalho poderão ser utilizados, na prática, em centros de previsão do tempo, pois através da análise dos campos meteorológicos será possível reconhecer sinais da possibilidade de formação de um Sistema Convectivo de Mesoescala. Com isto, boletins de alerta poderão ser emitidos com até algumas horas de antecedência da ocorrência do fenômeno. Esta questão é de fundamental importância, porque como citado anteriormente, alguns Sistemas Convectivos de Mesoescala podem causar grandes prejuízos, tendo em vista as condições severas de tempo que causam em superfície.

Desta forma busca-se, nesta pesquisa, analisar a ocorrência de Descargas Elétricas Atmosféricas associadas a três Sistemas Convectivos de Mesoescala que ocorreram no Sul da América do Sul. Ao mesmo tempo, pretende-se investigar a formação e a

evolução destes três Sistemas Convectivos Mesoescala a partir de informações de um modelo atmosférico de mesoescala. Especificamente, deseja-se abordar as seguintes questões:

1. Avaliação das ocorrências anuais e mensais das Descargas Elétricas Atmosféricas no período 2002-2003;
2. Análise das características meteorológicas associadas aos Sistemas Convectivos de Mesoescala, a partir dos campos provenientes do modelo de mesoescala MM5;
3. Avaliação da distribuição espacial das Descargas Elétricas Atmosféricas associadas ao ciclo de vida dos Sistemas Convectivos de Mesoescala;

Portanto, para cumprir com os objetivos, na abordagem desta pesquisa serão apresentados os tópicos inerentes a revisão bibliográfica, material e métodos, discussões dos resultados e conclusões.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Neste item serão apresentadas informações relevantes encontradas na literatura referentes aos Sistemas Convectivos de Mesoescala e às Descargas Elétricas Atmosféricas.

2.1. SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA

Pode-se definir os Sistemas Convectivos de Mesoescala como sendo aglomerados de nuvens *Cumulonimbus* (*Cb*) que produzem uma área de precipitação, de aproximadamente, 100km ou mais, numa escala horizontal, com tempo de vida de tipicamente 06 a 12 horas (Cotton e Anthes, 1989; Houze, 1993).

A nuvem *Cumulonimbus*, também conhecida como nuvem de tempestade, é uma nuvem em forma de torre, que se expande lateralmente no topo, assumindo a configuração de uma “bigorna”. A base de um *Cumulonimbus* pode situar-se entre 300 e 3.000m de altura, dependendo da umidade relativa do ar próximo ao solo. Esta nuvem apresenta uma considerável extensão vertical, cujo topo usualmente atinge alturas entre 9.000 e 18.000m. As nuvens com topos mais altos localizam-se nos trópicos ou, também, nas latitudes médias durante o verão. Durante o processo de desenvolvimento, as velocidades verticais dentro da nuvem podem atingir valores de aproximadamente

100km/h. O grande desenvolvimento das *Cumulonimbus*, e conseqüentemente das tempestades locais, encontra-se associado à presença de ar quente, úmido e instável. Estas nuvens apresentam características como: descargas elétricas atmosféricas, trovões, ventos fortes, súbitas variações de temperatura e ocasionalmente, podem transformar-se em tornados (Vianello e Alves, 1991).

Byers e Braham (1949) identificaram três fases na evolução de uma nuvem *Cumulonimbus* isolada, também chamada de tempestade individual: formação, maturação e dissipação, visualizadas na Figura 1.

Na **fase de formação**, conhecida também por estágio *Cumulus*, os movimentos verticais são predominantemente ascendentes, arrastando assim partículas de gelo e gotas de água para cima. Nesta fase, o diâmetro pode chegar a 10km, estando sua base situada a uma altura de 1,5km e seu topo a 8km, aproximadamente.

Na **fase de maturação** coexistem movimentos ascendentes e descendentes. As partículas de gelo e as gotas de água que, no primeiro estágio, eram arrastadas para cima, tornam-se maiores e mais numerosas, iniciando-se a chuva a partir da base da nuvem. O movimento descendente que, no início desta fase, era apenas a partir da base, passa a se intensificar horizontalmente e verticalmente. A temperatura dentro da nuvem irá depender da região. Para uma dada altura, as regiões onde o movimento do ar é ascendente, a temperatura no interior será maior que no exterior e, para regiões de movimentos descendentes, a temperatura no interior é menor que a temperatura no exterior da célula de tempestade. A duração desta fase é de aproximadamente 30 minutos e sua extensão vertical pode ser de 10 a 18km.

A **fase de dissipação** constitui o último estágio, o qual é caracterizado por movimentos predominantemente descendentes. Nesta fase, a temperatura do interior da nuvem é menor que a do seu exterior. A nuvem irá se dissipar até que as temperaturas do interior e do exterior sejam iguais. Esta fase tem duração de aproximadamente alguns minutos.

Se uma nuvem *Cumulonimbus* tem duração total de aproximadamente uma hora e os SCM têm duração de várias horas, isto significa que um SCM, ao longo de seu ciclo de vida, é formado por várias nuvens *Cumulonimbus* em estágios diferentes. Assim, a ocorrência dos SCM está intrinsecamente relacionada à formação de nuvens *Cumulonimbus*.

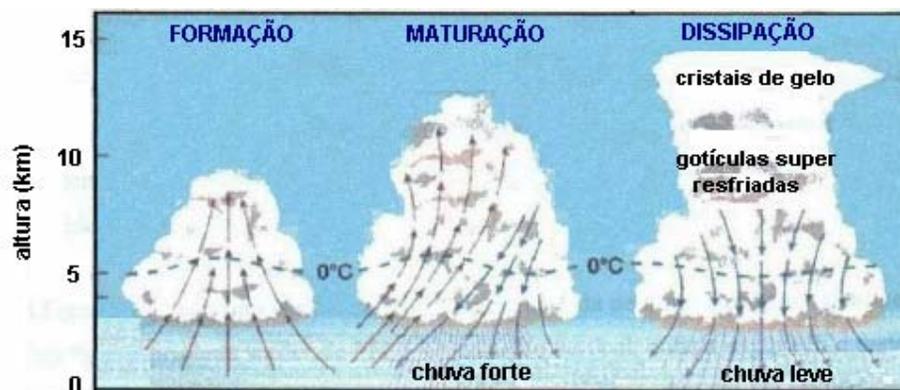


FIGURA 1– Representação dos estágios do ciclo de vida de uma nuvem *Cumulonimbus*.
Fonte: Adaptada de Faria (2002).

No âmbito da Meteorologia, os SCM despertam muito interesse pelo fato de serem responsáveis por grandes quantidades de precipitação nos trópicos e nas latitudes médias, principalmente nos meses quentes. Além disso, a ocorrência deste fenômeno geralmente está associada a desastres naturais como: descargas elétricas atmosféricas, enchentes, vendavais, granizos, etc. (Machado et al. 1998). Assim, é de suma importância reconhecer e apresentar alguns estudos já realizados sobre o assunto, na sempre incansável busca de melhor entender a estrutura dos SCM relacionados à ocorrência de DEA.

Inicialmente, serão discutidos trabalhos que abordam o estudo dos SCM, de forma geral para, em seguida, apresentar trabalhos que relacionam os SCM com as DEA.

Até o momento, não existe um modelo conceitual para descrever o desenvolvimento dos SCM. Isto porque os SCM podem apresentar formatos, ciclos de vida, tamanhos e intensidades diferentes. Esta grande variedade faz com que seja difícil estabelecer categorias de SCM, até porque, devido às interações das circulações do ar com efeitos locais (latitude, longitude, altitude, proximidade com oceano, urbanização, etc), sistemas semelhantes na origem, podem evoluir de forma totalmente diferente ao ocorrerem em lugares distintos do planeta.

O critério mais simples (e mais utilizado) para distinguir os SCM tem sido o seu formato. No caso do sistema ser predominantemente circular, este recebeu a denominação de Complexo Convectivo de Mesoescala (CCM), pelo pesquisador Maddox (1980), desde que fossem respeitadas algumas condições morfológicas,

definidas pelo próprio Maddox. A partir de então, vários trabalhos foram desenvolvidos seguindo os requisitos de Maddox, para CCM (Guedes, 1985; Velasco e Fritsch, 1987; Lima, 2004, dentre outros).

Outro formato particular, de fácil caracterização, é o linear. Assim, se o SCM for predominantemente linear, é denominado de Linha de Instabilidade (LI). Houze et al. (1989, 1990) estabeleceram um modelo conceitual para LI em latitudes médias, com região de precipitação estratiforme. Mas, existem também as LI em região com precipitação estratiforme, LI simétricas, LI assimétricas e assim por diante.

Finalmente, existem os SCM que não são predominantemente circulares, para serem classificados como CCM (obedecendo aos critérios de Maddox), nem são predominantemente lineares, para serem classificados como LI. Neste caso, alguns pesquisadores estabeleceram uma classificação local, dentre os quais podemos citar: Schiesser et al. (1995), Anderson e Arrit (1998) e Jirak et al. (2003).

Grande parte dos trabalhos a respeito de SCM aborda aspectos relacionados à sua trajetória, tamanho, duração, propagação e evolução ao longo de seu ciclo de vida (Augustine et al., 1989; Machado et al., 1994; Geerts, 1998; Laurent et al., 2000; Morel e Senesi, 2002, dentre outros). Outra parte aborda aspectos relacionados à origem dos SCM, incluindo uma avaliação dinâmica, cinemática e termodinâmica (Tripoli e Cotton, 1980; Nachamkin e Cotton, 2000; Knievel e Johnson, 2002; Jorgensen e Weckwerth, 2003; Corfidi, 2003; Botelho, 2004, dentre outros). O acoplamento de todas essas informações é fundamental para que a formação e a evolução de um SCM em alguma localidade sejam explicadas.

Todos os trabalhos sobre SCM têm uma preocupação em comum: melhorar o conhecimento atual do fenômeno. Entretanto, este avanço só poderá ocorrer quando a qualidade e a densidade das informações meteorológicas sobre o local de interesse forem adequadas.

No que diz respeito a associação de DEA em SCM, Goodman (1983) e Goodman et al. (1984) analisaram DEA em SCM, usando dados de uma rede de detecção de DEA e localização de SCM. Eles sugeriram que a densidade espacial e a frequência destas descargas atmosféricas estavam relacionadas com a intensidade e com a organização dos SCM.

Dados de aproximadamente dois milhões de DEA, registrados em Oklahoma e Kansas durante 1985-1986, em SCM nas estações quentes, para a avaliação das características de DEA foram observados por Reap e MacGorman (1989). Com relação

às características das DEA, foram verificadas as distribuições mensal e horária. Assim, nos meses de verão boreal (julho e agosto) foram notadas as maiores quantidades de DEA. Quanto à distribuição horária, o período noturno foi onde prevaleceram estas maiores quantidades.

Stolzenburg (1994) fez observações de 24 SCM com alta densidade de DEA positivas encontradas em 11 dias durante os meses de junho e julho de 1989, nos Estados Unidos da América. O período de alta densidade positiva de DEA persistiu em média por 4 horas, ou seja, tempo maior que uma típica tempestade individual. Em muitos casos, as DEA ocorreram no/ou próximo ao início da tempestade. O autor sugeriu que a produção da alta porcentagem de DEA positivas podem estar associadas à tempestades com extensão vertical muito elevada.

Características de DEA em uma série de 4 SCM que ocorreram em Oklahoma e Kansas em 3-4 de junho de 1985, durante o experimento PRE-STORM, foram estudadas por Holle et al. (1994). Dentre o total de DEA detectadas nesta série, os autores verificaram que 96% eram do tipo nuvem-solo negativas. Notaram ainda que a maior frequência das DEA ocorreram nos estágios inicial e de maturidade dos SCM.

Nielsen et al. (1994) examinaram as características de DEA durante o ciclo de vida de um SCM ocorrido em 10-11 de junho de 1985 em Kansas. As observações mostraram que as DEA positivas foram dominantes nas fases inicial e dissipativa dos SCM, enquanto que as DEA negativas prevaleceram na fase madura. A predominância de DEA positivas, durante o ciclo de vida do SCM, foi associada à grande extensão vertical das nuvens.

Um interessante levantamento de 45 anos sobre as muitas características de acidentes e perdas de propriedades devido a ocorrência de DEA durante tempestades no Colorado, foram pesquisados por López et al. (1995). Muitos acidentes, provocados por DEA, ocorreram no Colorado entre os meses de maio e agosto (primavera/verão), com somente alguns poucos casos fora destes meses. O número de acidentes ocasionados por DEA, durante as horas do dia, foram predominantemente encontrados no período da tarde, entre às 12 e 18HL (Hora Local).

2.2. DESCARGAS ELÉTRICAS ATMOSFÉRICAS

2.2.1. Definição de Descargas Elétricas Atmosféricas

As DEA são fenômenos que ocorrem devido ao acúmulo de cargas elétricas em regiões localizadas da atmosfera. A descarga inicia quando o campo elétrico produzido por estas cargas excede a capacidade isolante do ar ($\approx 3 \times 10^6 V/m$) em um dado local da atmosfera.

As DEA, predominantemente associadas a tempestades, podem também ocorrer durante erupções vulcânicas, em tempestades de areia e de neve ou, ainda, em outros tipos de nuvens. Porém, nestes outros episódios, geralmente apresentam extensão e intensidade menores. Nesta pesquisa serão analisadas apenas as DEA que ocorrem em nuvens de tempestades (ou nuvens *Cumulonimbus*).

2.2.2. Eletricidade Atmosférica

O modelo utilizado para representar a estrutura elétrica da atmosfera como um todo, na tentativa de melhor explicar a diferença de potencial (variando de 100 a 300kV) entre a superfície da Terra e a Ionosfera existente na região de céu claro, chama-se Circuito Elétrico Atmosférico Global. Este considera a superfície da Terra e a Ionosfera como superfícies quase equipotenciais, separadas pela atmosfera, que é um meio levemente condutor, existindo um equilíbrio elétrico entre a região de geração de cargas e a região de céu claro. As cargas são geradas por nuvens eletrificadas, que compensam a corrente vertical de condução nas regiões de céu claro, mantendo a diferença de potencial. Se não houvessem nuvens eletrificadas para manter o capacitor Terra-Ionosfera carregado, a diferença de potencial desapareceria em aproximadamente 7 minutos (Iribarne e Cho, 1986). A Figura 2 apresenta a distribuição global do potencial e das correntes elétricas dadas pelo Circuito Elétrico Atmosférico Global, onde também são levados em conta os efeitos orográficos que, em razão de suas variações locais, modificam a carga superficial perturbando a estrutura elétrica da atmosfera nas proximidades do solo, e os efeitos das linhas de campo geomagnético, que unem os dois hemisférios.

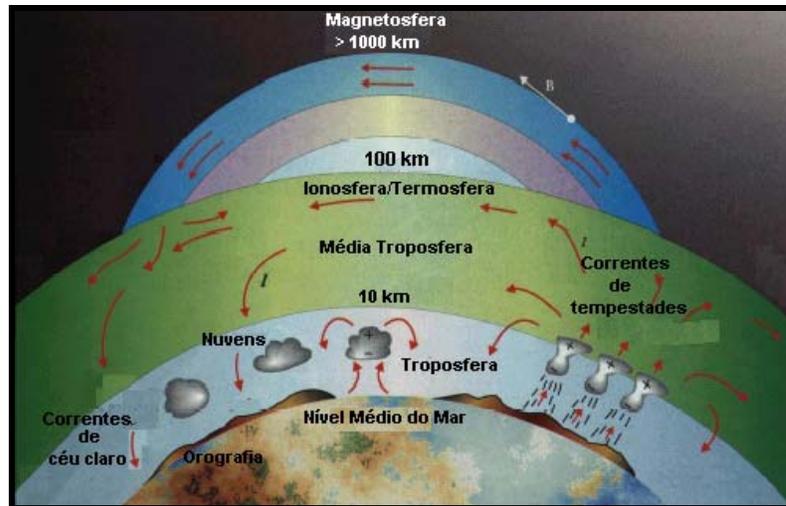


FIGURA 2 – Representação esquemática do circuito elétrico atmosférico global.
Fonte: Adaptada de Faria (2002).

A curva de Carnegie, apresentada na Figura 3, fornece a variação percentual (em relação à média) do campo elétrico de céu claro sobre os oceanos, em função da hora universal. Nela pode ser visto o equilíbrio elétrico existente no circuito elétrico, onde a máxima variação diurna do campo elétrico coincide com a máxima atividade global de tempestades, indicando a relação existente entre a atividade global de tempestades, geração de cargas e o campo elétrico na região de céu claro. A teoria da existência de um circuito elétrico global, embora amplamente aceita, ainda não está comprovada completamente.

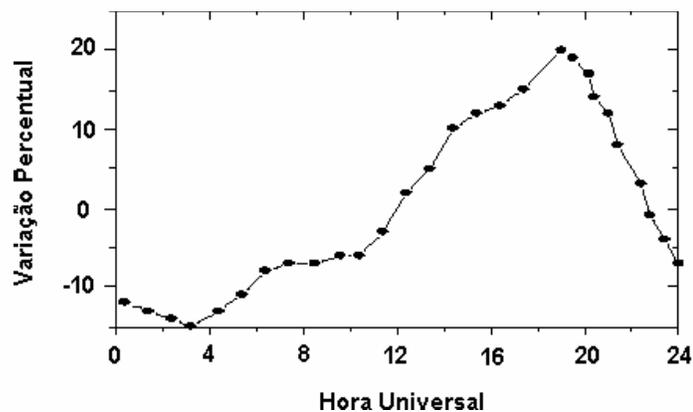


FIGURA 3 – Curva de Carnegie.
Fonte: Faria (1998).

2.2.3. Mecanismos de Geração e Separação de Cargas em Nuvens de Tempestades

Devido à complexidade da estrutura elétrica das nuvens, o processo de eletrização das mesmas não é bem conhecido. Acredita-se que a geração e a separação de cargas dentro da nuvem de tempestade tenham origem em processos microfísicos e macrofísicos que ocorrem simultaneamente dentro da nuvem (Pinto Jr. e Pinto, 2000).

Nos processos, há a participação de partículas grandes e pequenas. Se a água estiver no estado líquido, a partícula maior corresponde à gota de chuva e a menor à gotícula de nuvem. No caso da água se encontrar em estado sólido, quando a temperatura dentro da nuvem for inferior a -40°C , a partícula maior corresponderá ao granizo e a menor, ao cristal de gelo. Na descrição dos processos abaixo, será considerado que a partícula maior se encontra no estado sólido (granizo). Porém, processos análogos ocorrem para a partícula no estado líquido (gota de água).

2.2.3.1. Processos Microfísicos

O processo microfísico mais aceito para a geração de cargas é o colisional, onde a colisão ocorre entre partículas de tamanhos diferentes e há transferência de cargas durante a colisão. Não se sabe ao certo como ocorre a transferência de cargas durante a colisão. Se o campo elétrico atmosférico tiver um papel predominante na separação de cargas das partículas, o processo será chamado de processo colisional indutivo. O outro processo é o colisional termoelétrico, onde a temperatura é predominante para determinar a concentração de cargas nas partículas após a colisão.

- **Processo Microfísico Colisional Indutivo**

No século passado, Elster e Geitel propuseram pela primeira vez, a teoria do processo colisional indutivo de eletrificação de uma nuvem de tempestade. É uma teoria simples e fundamentada em princípios básicos da física.

Neste processo o granizo, partícula grande, é polarizado devido ao campo elétrico externo (\hat{E}), que é dirigido para a superfície, apresentado na Figura 4. Desta maneira, a parte inferior do granizo fica positivamente carregada enquanto que a parte superior fica negativamente carregada. Quando este granizo colide, na sua parte inferior, com cristais de gelo, que são partículas menores, ocorre a transferência de cargas ficando o granizo

negativamente carregado e o cristal de gelo positivamente carregado. Desta maneira ocorre a separação de cargas no processo indutivo, que é assim chamado porque o campo elétrico ambiente induz a geração de cargas através da polarização do granizo. À medida que as partículas de cristal de gelo e de granizo ficam carregadas, elas são separadas por processos microfísicos. A teoria do processo colisional indutivo tem sido utilizada como um mecanismo primário de geração de cargas para as tempestades (Mason, 1988). Experimentos de laboratório têm mostrado que apenas na presença de fortes campos elétricos, da ordem de 10kV/m ou mais, o processo indutivo torna-se importante (Volland, 1982), indicando que o campo elétrico atmosférico de céu claro (campo elétrico existente na atmosfera em condição de céu claro) não é suficiente para que ocorra a geração de cargas. Portanto, este processo apenas passa a ser efetivo no estágio maduro de uma tempestade, não podendo ser responsável pela formação das cargas no início da tempestade.

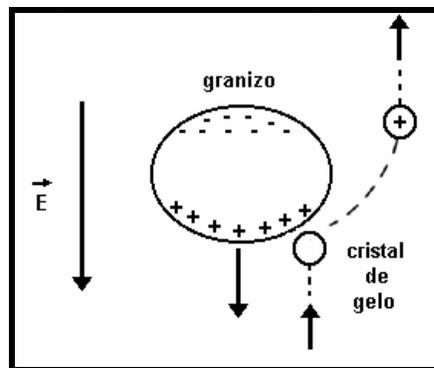


FIGURA 4 – Representação do processo colisional indutivo de separação de cargas.
Fonte: Adaptada de Faria (2002).

- **Processo Microfísico Colisional Termoelétrico**

Apresentado por Williams (1988), no processo colisional termoelétrico, ilustrado na Figura 5, a transferência de cargas está relacionada com a temperatura em que ocorre a colisão entre as partículas. Esta temperatura é chamada de Temperatura de Inversão (TI), a qual é de aproximadamente -15°C , e está a uma altitude de 6km (Pinto Jr. e Pinto, 2000). Se a colisão entre o granizo (partícula pesada) e o cristal de gelo (partícula leve) ocorrer à temperaturas superiores à TI, o granizo ficará positivamente carregado e o cristal de gelo negativamente carregado. Devido aos movimentos ascendentes do ar o cristal de gelo subirá, criando assim uma grande concentração de granizos (cargas

positivas) na parte inferior da nuvem. Quando a colisão ocorre a temperaturas inferiores à TI, o granizo fica 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.

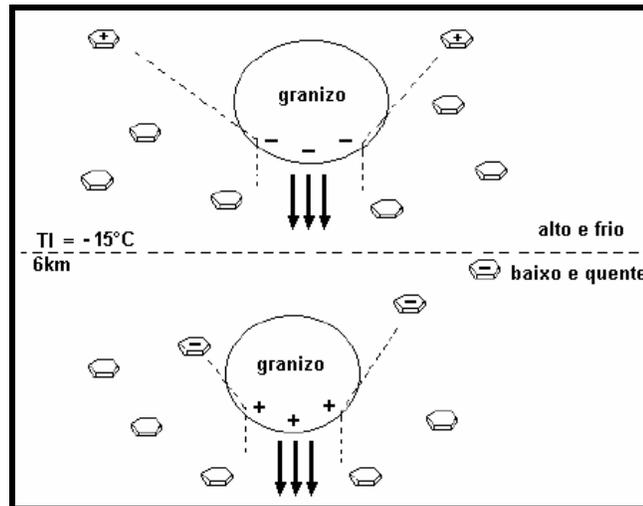


FIGURA 5 – Representação do processo termoeletrico de separação de cargas.
Fonte: Adaptada de Faria (2002).

2.2.3.2. Processos Macrofísicos

Depois de geradas, as cargas são separadas por processos macrofísicos, e os mais aceitos são o processo gravitacional e o processo convectivo.

- **Processo Macrofísico Gravitacional**

O processo gravitacional apresentado por Williams (1988), mostrado na Figura 6, também é conhecido como a teoria de precipitação. A separação das cargas é devido a processos microfísicos. Quando elas se separam, as cargas negativas são aprisionadas nos granizos e as cargas positivas se associam aos cristais de gelo que são partículas menores, havendo desta maneira uma separação das cargas. Por processos gravitacionais, as partículas carregadas negativamente caem e as partículas carregadas positivamente ficam suspensas na parte superior da nuvem, formando assim dois centros de cargas. O centro negativo na parte inferior e o positivo na parte superior.

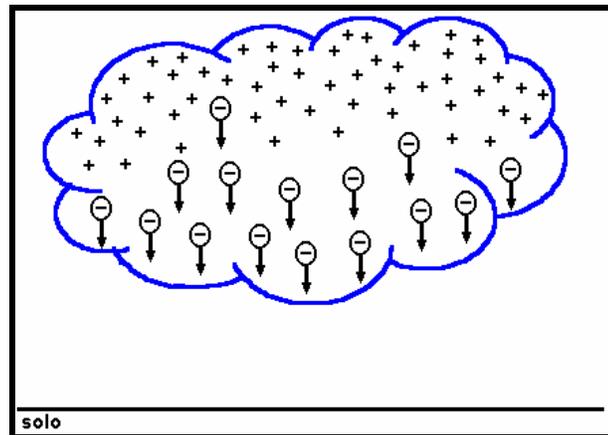


FIGURA 6 – Representação do transporte de cargas segundo a teoria gravitacional.
 Fonte: Adaptada de Faria (2002).

- **Processo Micro e Macrofísico Convectivo**

O processo convectivo (Williams, 1988) ilustrado na Figura 7, representa tanto o processo microfísico quanto o macrofísico. Na etapa microfísica do processo convectivo, as cargas positivas são geradas pelas correntes corona (correntes de ar aquecidas na superfície da Terra) e as negativas são geradas pela interação dos raios cósmicos (raios altamente energéticos que atravessam o universo) e a atmosfera. Na etapa macrofísica as cargas negativas, associadas aos granizos (partículas pesadas), são arrastadas para a parte inferior da nuvem por movimentos descendentes e as positivas, associadas aos cristais de gelo (partículas leves), passam a ocupar a parte superior da nuvem, arrastadas pelos movimentos ascendentes.

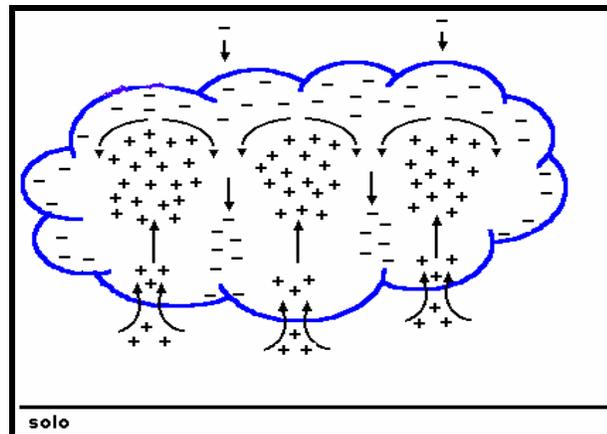


FIGURA 7 – Representação do transporte de cargas segundo a teoria convectiva.
Fonte: Adaptada de Faria (2002).

2.2.4. Classificação das Descargas Elétricas Atmosféricas

Existem diversos tipos de DEA que ocorrem em nuvens de tempestades. Estas são classificadas em função do local onde se originam e do local onde terminam. Os locais de início e de término das DEA devem apresentar cargas elétricas opostas. As DEA podem ser classificadas em quatro tipos principais: nuvem-solo (ocorrem entre a nuvem e o solo), intranuvem (ocorrem no interior de uma mesma nuvem), entre nuvens (ocorrem entre nuvens diferentes) e nuvem-ar (partem de uma nuvem e terminam na atmosfera, sem alcançar uma outra nuvem ou o solo. Bolsões de carga que se formam na atmosfera em torno das nuvens de tempestade seriam responsáveis por esse tipo de DEA).

2.2.4.1. Nuvem-Solo

Estas DEA podem ser divididas em dois tipos ou polaridades, definidas em função do sinal da carga transferida ao solo: DEA nuvem-solo negativas e DEA nuvem-solo positivas.

- **Nuvem-Solo Negativas**

Representam 90% da quantidade das DEA nuvem-solo (Pinto Jr. e Pinto, 2000). As DEA nuvem-solo negativas (Figura 8) consistem de uma descarga elétrica ou múltiplas descargas elétricas sucessivas de cargas negativas, que partem do centro negativo de cargas da nuvem e se direcionam ao solo. Esta descarga é chamada de líder escalonado (*stepped leader*). O líder escalonado propaga-se em passos que tem um comprimento médio de 50m cada e uma velocidade média de 105m/s. Apesar de ocorrerem ramificações no líder escalonado, não significa que todos irão alcançar o solo. Estas ramificações ocorrem na tentativa de se buscar os lugares que são mais favoráveis para atingir o solo. A luminosidade apenas é observada nos últimos microssegundos do líder escalonado, que tem duração em torno de 20 milissegundos. A intensidade de corrente é de 100A (Volland, 1984) e seu canal de ionização tem de 1 a 10m de diâmetro, propagando-se até uma distância de 10 a 100m do solo.

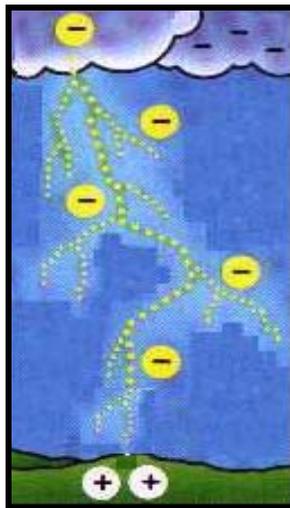


FIGURA 8 – Representação de uma descarga elétrica atmosférica nuvem-solo negativa.
Fonte: <http://www.lightning.dge.inpe.br>

- **Nuvem-Solo Positivas**

São descargas elétricas que levam cargas negativas do solo para a nuvem (Figura 9). Representam a minoria em relação ao número total de DEA nuvem-solo (menos de 10% do total), porém são muito destrutivas. Geralmente desenvolvem etapas similares às descritas pelas DEA nuvem-solo negativas e seus líderes escalonados se movem do solo em direção à nuvem. A permanência de uma fraca corrente contínua por um período prolongado faz com que as DEA nuvem-solo positivas tenham um poder destrutivo superior aos das DEA nuvem-solo negativas. Estima-se que a intensidade de corrente média das DEA nuvem-solo positivas seja levemente superior as da nuvem-solo negativas (Pinto Jr. e Pinto, 2000).

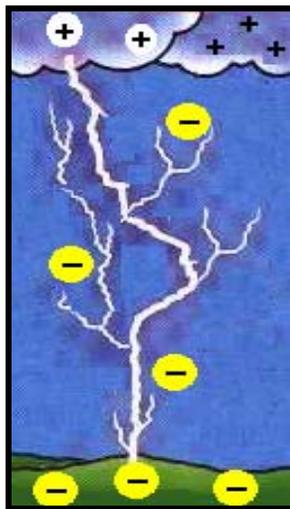


FIGURA 9 – Representação de uma descarga elétrica atmosférica nuvem-solo positiva.
Fonte: Adaptada de <http://www.lightning.dge.inpe.br>

2.2.4.2. Outros Tipos

As DEA intranuvem ocorrem no interior da nuvem, sendo normalmente vistas através de um clarão, costumam ser as primeiras a acontecer nas tempestades e precedem as DEA nuvem-solo. Por outro lado, pouco se conhece sobre as características das DEA que ocorrem entre nuvens e da nuvem para o ar (Pinto Jr. e Pinto, 2000). A Figura 10 mostra uma ilustração das DEA intranuvem, entre nuvens e da nuvem para o ar.

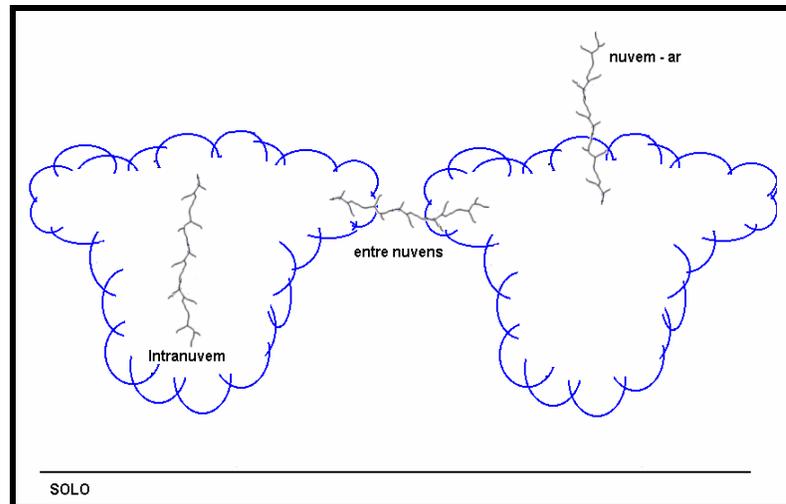


FIGURA 10 – Representação de Descargas Elétricas Atmosféricas, dos tipos intranuvem, entre nuvens e nuvem-ar.

2.2.5. Descargas Elétricas Atmosféricas em Anos de El Niño

Este aspecto precisa ser abordado neste trabalho, porque um dos anos de dados de DEA utilizado é classificado como ano de El Niño.

O El Niño é um fenômeno que interfere nas condições meteorológicas, especialmente na precipitação pluvial e na temperatura, em diversas regiões do Globo.

O que ocorre normalmente sobre as águas da faixa tropical do Pacífico é o vento soprando de leste para oeste (em direção à Ásia) acumulando a água mais quente (água de toda a superfície da faixa tropical que foi aquecida pelo Sol) no setor oeste do mesmo, deixando o nível do oceano na Indonésia meio metro acima do nível da costa oeste da América do Sul. Assim, na costa sul-americana a temperatura da água é cerca de 8°C mais fria. Em anos de El Niño, os ventos leste-oeste enfraquecem chegando, em algumas áreas na faixa tropical, a inverter o sentido soprando de oeste para leste. Logo, a água mais quente do oeste é “empurrada” para o leste, deixando a água da costa oeste da América do Sul com temperaturas acima da média, e abaixo da média a água da região da Indonésia e norte/nordeste da Austrália. Esta explicação é mostrada na Figura 11.

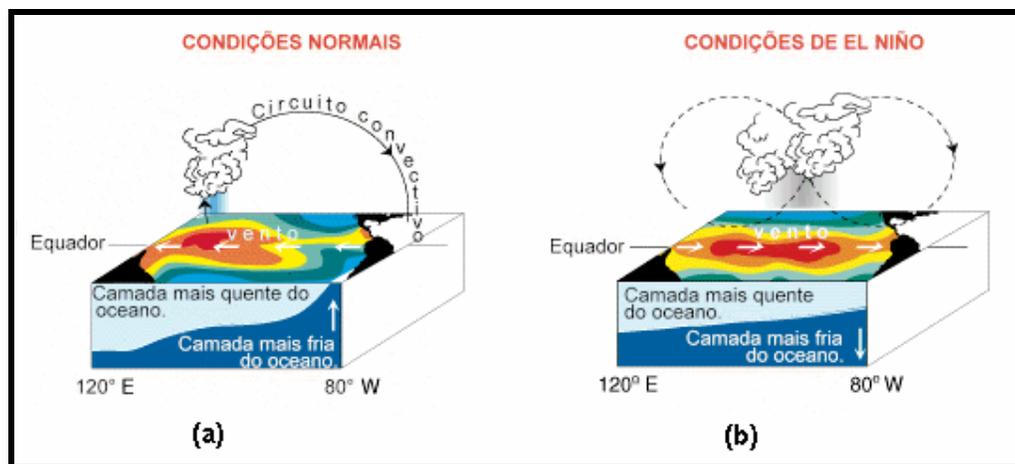


FIGURA 11 – Esquema da circulação do vento em anos (a) normais e (b) El Niño.

O evento El Niño é um fenômeno caracterizado, portanto, pelo aquecimento anômalo das águas superficiais do Pacífico Equatorial Oriental e Central. O aumento do gradiente de temperatura entre o Equador e os Pólos produz uma intensificação na corrente de Jato Subtropical em altos níveis, localizada a aproximadamente 30°S. Este fortalecimento cria um bloqueio, impedindo que sistemas frontais avancem em direção ao sudeste da América do Sul, permanecendo quase que estacionários sobre o Sul do Brasil causando, com isso, precipitações intensas nesta região (Berlato e Fontana, 2003).

Uma das causas que influenciam a formação e manutenção de SCM em várias regiões do globo, está relacionada às precipitações anômalas em anos de ocorrência de El Niño. Fritsch et al. (1986) e Kane et al. (1987) analisaram e compararam as contribuições dos SCM aos valores de precipitação observados em superfície, nos meses de verão de 1982-1983 (El Niño mais forte) nos Estados Unidos da América. Os resultados mostraram que os SCM foram os maiores responsáveis pelas precipitações registradas, especialmente quando estes ocorriam em série. Portanto, este fenômeno climático também pode afetar a ocorrência de DEA, embora seus efeitos possam variar de um evento para outro em função da magnitude e da extensão do fenômeno. No Brasil, evidências recentes obtidas por satélite têm mostrado que, de um modo geral, o El Niño tende a produzir um aumento na incidência de DEA nas regiões Sul e Sudeste e uma diminuição nas regiões Norte e Nordeste do país, em função do número maior de sistemas precipitantes nestas regiões. No Sudoeste do Brasil, em abril de 1992,

verificou-se um dado alarmante quando o El Niño estava em atividade: foram registrados 200 mil DEA. Porém, dois anos mais tarde, já sem a presença do fenômeno, esse número caiu para 50 mil (Pinto Jr. e Pinto, 2000). Com o intuito de investigar a relação entre o fenômeno El Niño e a ocorrência de DEA em Minas Gerais, Reis e Pinto Jr. (2002) analisaram três episódios do evento. Apesar de existirem poucos eventos para comparação, foi possível verificar que ocorreram mudanças significativas na distribuição das DEA em anos de El Niño no Estado de Minas Gerais.

2.2.6. Descargas Elétricas Atmosféricas no Globo

A Figura 12 mostra a distribuição global de DEA obtidas através de observações feitas a bordo do satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), entre 1997 e 1999, utilizando sensores *Lightning Imaging Sensor* (LIS). Salienta-se que a densidade de DEA por ano, obtida a partir destas observações, são restritas às latitudes compreendidas entre 35°N e 35°S (devido a órbita do satélite) e representam a densidade total de DEA, visto que o sensor do satélite não é capaz de discriminar os diferentes tipos de DEA (Pinto Jr. e Pinto, 2000). Pode-se perceber claramente que a maioria das DEA ocorre sobre os continentes e em regiões tropicais. As principais regiões de ocorrência de DEA são: sul dos Estados Unidos, norte da Argentina, Brasil, regiões central e sudeste da África, sul da Ásia, Indonésia e noroeste da Austrália. As DEA são raras em regiões de altas latitudes geográficas (latitudes superiores a 60°), devido à baixa temperatura do ar, em regiões desérticas, onde não há umidade suficiente para a formação de nuvens de tempestade e nos oceanos (Pinto Jr. e Pinto, 2000).

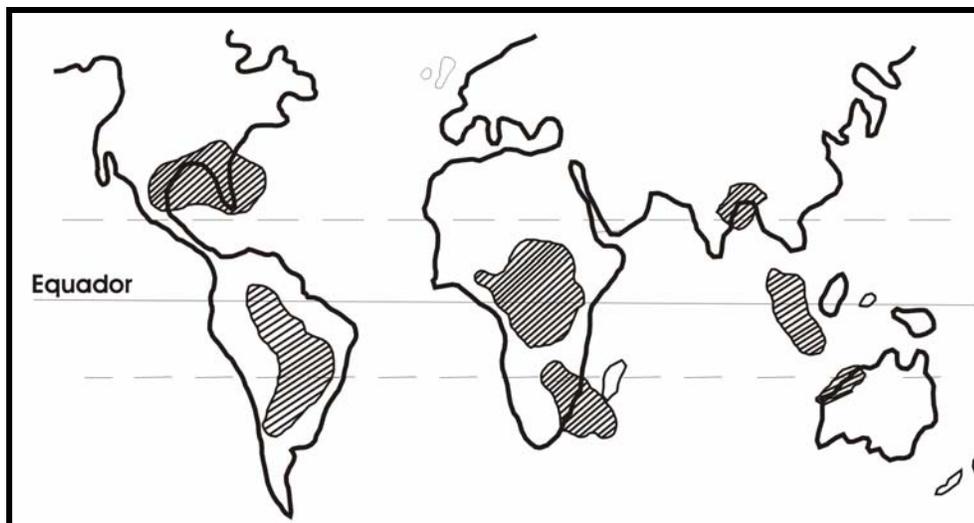


FIGURA 12 – Distribuição Global de Descargas Elétricas Atmosféricas, com base em observações feitas a bordo do satélite TRMM. As regiões hachuradas no mapa indicam densidade de DEA superiores a 10 DEA por quilômetro quadrado por ano. Fonte: Adaptada de Pinto Jr. e Pinto (2000).

Especificamente o Brasil, pelo fato de possuir uma grande extensão territorial e por estar localizado numa região predominantemente tropical, é um dos países de maior ocorrência de DEA do planeta. Neste sentido o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), através do grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT), vem desenvolvendo várias pesquisas a respeito das DEA que ocorreram nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e Norte. A seguir serão comentadas três dissertações de mestrado e uma tese de doutorado desenvolvidas no ELAT/INPE.

Faria (1998) fez um estudo das características das DEA nuvem-solo durante dias de grande atividade convectiva no Estado de Minas Gerais nos anos de 1992 a 1994, com dados da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). Os dados utilizados foram obtidos pelo sensor *Lightning Positioning and Tracking Sensor* (LPATS), com cerca de 450.000 descargas de retorno. Os eventos selecionados foram divididos em períodos diurno e noturno que caracterizaram as DEA em dias de grande atividade. Dos 18 eventos estudados, 11 encontravam-se no período de transição inverno-verão. A autora percebeu que as características das DEA nuvem-solo não variaram em relação aos períodos diurno e noturno e nem com a mudança de estação.

Uma análise preliminar sobre a ocorrência de DEA em regiões densamente povoadas, no verão dos anos de 2000 e 2001, com dados de Furnas Centrais Elétricas

(FURNAS) e INPE, foi desenvolvida por Naccarato (2001). Os resultados revelaram indícios de uma maior concentração de DEA sobre grandes centros urbanos, como a grande São Paulo, Campinas e Vale do Paraíba. As justificativas foram associadas a possíveis alterações climáticas locais provocadas pelo crescimento populacional e industrial (responsáveis pela emissão de poluentes na atmosfera) urbanização e devastação da vegetação.

Outro estudo interessante foi desenvolvido por Faria (2002), que comparou a atividade e características das DEA nas regiões Norte e Sudeste, no período de outubro de 1999 a março de 2000. Os dados de DEA nuvem-solo em Rondônia foram obtidos pelo sistema *Brazil Lightning Detection Network* (BLDN), que registrou durante o período um total de 1.753.240 DEA. Na Região Sudeste, os dados de DEA nuvem-solo foram obtidos pelo Sistema de Localização de Tempestade (SLT), que registrou 1.026.941 DEA nuvem-solo. Dentre os resultados obtidos, foi verificado que, em Rondônia, os meses que apresentaram maior quantidade de DEA nuvem-solo coincidiram com os meses em que o centro da Alta da Bolívia estava mais próximo do centro da região estudada, devido ao fato de estar associado à forte convecção da Amazônia. Na Região Sudeste, os meses com maior incursão de sistemas frontais apresentaram uma maior quantidade de DEA.

O trabalho de Gomes (2002) apresentou um estudo das influências geográficas sobre os parâmetros característicos das DEA em uma região do Estado de Minas Gerais, no período de outubro de 1988 a novembro de 1996. Foram utilizados os dados de variáveis meteorológicas do *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) e dados de DEA da CEMIG. Os resultados encontrados mostraram que as condições meteorológicas em escala sinótica, o clima, a topografia e os centros urbanos exercem influências sobre a quantidade, a polaridade, a porcentagem e a intensidade de DEA, favorecendo a maior quantidade destas descargas ao sul, em comparação com o norte, da região estudada. Ainda, revelou que os efeitos das ilhas de calor e da poluição, próprios dos centros urbanos, aparentemente alteraram a distribuição de cargas das nuvens de tempestade, afetando a densidade e a polaridade das DEA. Outro fator investigado foi o tipo de solo, mas não foram encontradas evidências de sua influência sobre os parâmetros característicos das DEA.

Em relação a região Sul do Brasil, os trabalhos encontrados abordam a ocorrência de DEA no Estado do Paraná (Beneti e Vasconcellos, 2002; Beneti et al., 2002; Gin et al., 2000). Abdoulaev et al. (2001) analisaram a estrutura e a evolução dos sistemas de

mesoescala, observados por satélite e radar, associados com 16 passagens de sistemas frontais e 9 casos de ciclogênese local, durante o inverno de 1999 na região Sul do Brasil e do Oceano Atlântico. Como resultado mostraram que, em média, os sistemas frontais produziram pouca quantidade de DEA (415) durante uma hora. Estes autores não incluíram, nas suas investigações, a incidência de Descargas Elétricas Atmosféricas em Sistemas Convectivos de Mesoescala para a região Sul da América do Sul.

Na seqüência serão descritos os materiais e métodos aqui utilizados.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Neste item, serão mostrados os sistemas de detecção de Descargas Elétricas Atmosféricas existentes no Brasil, os dados de Descargas Elétricas Atmosféricas na região Sul do Brasil e os critérios de seleção dos estudos de casos de Sistemas Convectivos de Mesoescala, bem como os procedimentos utilizados para a análise do conjunto de dados.

3.1. DESCARGAS ELÉTRICAS ATMOSFÉRICAS

3.1.1. Sistema de Detecção no Brasil

Atualmente, existem sensores de detecção de DEA nuvem-solo na Região Norte, com os sensores da *Brazil Lightning Detection Network* (BLDN), através de uma colaboração entre o Brasil e os Estados Unidos da América; na Região Centro-Oeste com os sensores de Furnas Centrais Elétricas (FURNAS); na Região Sudeste com os sensores de FURNAS, da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE); e finalmente na Região Sul, com os sensores do Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR).

As instituições FURNAS, CEMIG, INPE e SIMEPAR compõem a Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT, <http://www.rindat.com.br>). Assim, com esta integração, os dados dos sensores são compartilhados entre três centrais de processamento da RINDAT (Belo Horizonte/MG, Rio de Janeiro/RJ e Curitiba/PR), estendendo a área de monitoramento e, por consequência, melhorando a eficiência na detecção e precisão das informações de localização e intensidade das DEA. Em área de monitoramento, a RINDAT do Brasil ocupa a terceira posição no mundo (as outras duas grandes redes existentes estão nos Estados Unidos e no Canadá). As localizações e as instituições responsáveis pelos sensores de DEA no Brasil são ilustradas na Figura 13.

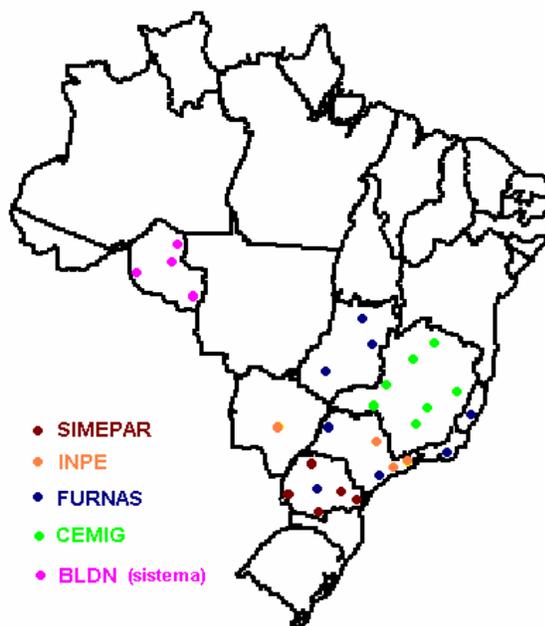


FIGURA 13 – Localização das antenas detectoras de Descargas Elétricas Atmosféricas no Brasil.

Fonte: Adaptada de Faria (2002).

3.1.1.1. Técnicas de Detecção no Solo

A detecção de DEA 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. No Brasil, os sistemas de detecção de DEA utilizam antenas *Lightning Position and Tracking System* (LPATS) e *IMProved Accuracy from Combined Technology* (IMPACT). A diferença entre os sensores está relacionada às diferentes tecnologias utilizadas para a identificação da localização e do tipo de DEA.

O sensor LPATS usa a tecnologia do tempo de chegada e identifica a assinatura do campo elétrico de uma descarga de retorno. O sensor IMPACT usa tanto a tecnologia do tempo de chegada para o campo elétrico quanto a tecnologia de precisão da direção para identificar o campo magnético. As medidas obtidas através destes sensores fornecem diversos parâmetros, dentre eles: a polaridade, a intensidade de corrente de pico, a latitude, a longitude, a data e a hora das descargas de retorno. A seguir, será descrito em mais detalhes, os tipos de sensores de DEA utilizados no Brasil.

- **Sensor *Lightning Positioning And Tracking System* (LPATS)**

O sensor LPATS, ilustrado na Figura 14, fornece a localização da descarga de retorno por meio da tecnologia *Time Of Arrival* (TOA) ou tempo de chegada. Esta tecnologia consiste em calcular o tempo em que o receptor leva para detectar uma DEA. Quando três ou mais receptores captam a descarga de retorno, usa-se o processo inverso de chegada, ou seja, antena-localização, através do tempo medido, para se determinar a localização exata de onde ocorreu a DEA.



FIGURA 14 – Sensor *Lightning Position and Tracking System* (LPATS).
Fonte: *Global Atmospheric* (2004).

A técnica de localização de uma descarga pelo tempo de chegada é ilustrada na Figura 15. Esta Figura apresenta duas estações receptoras, R1 e R2, conectadas por uma linha sólida e linhas hiperbólicas de diferença de tempo constante, entre as duas estações receptoras, cada uma com um foco diferente. Usando a diferença de tempo de chegada pode-se determinar a posição do pulso de energia eletromagnética emitido pela descarga de retorno. Na Figura, S1 e S2 indicam os locais de detecção das descargas de retorno. Observa-se que neste caso, com duas antenas detectoras, existem duas soluções para a posição da DEA.

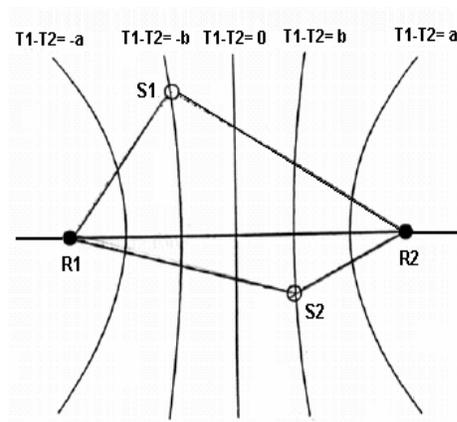


FIGURA 15 – Linhas hiperbólicas de diferença de tempo constante.
Fonte: Adaptada de Gomes (2002).

A Figura 16 mostra a localização da emissão de um pulso de energia eletromagnética detectado por três estações receptoras R1, R2 e R3. O local da emissão S é determinado pelo ponto de intersecção das hipérbolas. Neste caso, a solução é única, na maioria das vezes. Porém, esporadicamente pode ocorrer alguma singularidade devido à própria geometria do método. Para garantir uma solução única na determinação da localização da descarga é necessário utilizar sistemas de detecção com um mínimo de quatro antenas. Com o aumento da quantidade de antenas, aumentam as famílias de hipérbolas e maior será a precisão na localização da descarga de retorno.

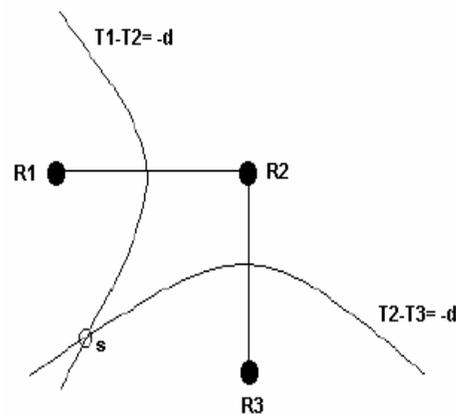


FIGURA 16 – Localização da fonte de emissão por intersecção hiperbólica.
Fonte: Adaptada de Gomes (2002).

- **Sensor *IMProved Accuracy from Combined Tecnology* (IMPACT)**

O sensor do tipo IMPACT, mostrado na Figura 17, combina a tecnologia de precisão *Magnetic Direction Finding* (MDF) ou direção do campo magnético, com a tecnologia *Time Of Arrival* (TOA) ou tempo de chegada, para alcançar maior eficiência e precisão de localização.

A tecnologia de precisão da direção do campo magnético é utilizada para se ter uma maior eficiência na localização do sinal. Esta tecnologia utiliza duas bobinas magnéticas que são colocadas perpendicularmente entre si. Desta maneira, quando uma descarga acontece, ela induz uma onda magnética que será detectado pelas bobinas, indicando a direção onde ocorreu a DEA. Esta tecnologia permite que se tenha uma boa precisão utilizando-se, no mínimo, dois receptores.



FIGURA 17 – Sensor *IMProved Accuracy from Combined Tecnology* (IMPACT).
Fonte: *Global Atmospheric* (2004).

O sensor IMPACT possui uma alta eficiência e uma melhor discriminação nas DEA nuvem-solo, proporcionando informações mais precisas. Com apenas dois sensores deste tipo, é possível obter a localização das descargas de retorno. A eficiência de detecção deste sensor é de aproximadamente 70 a 90% de todas as DEA nuvem-solo dentro do limite de 400km.

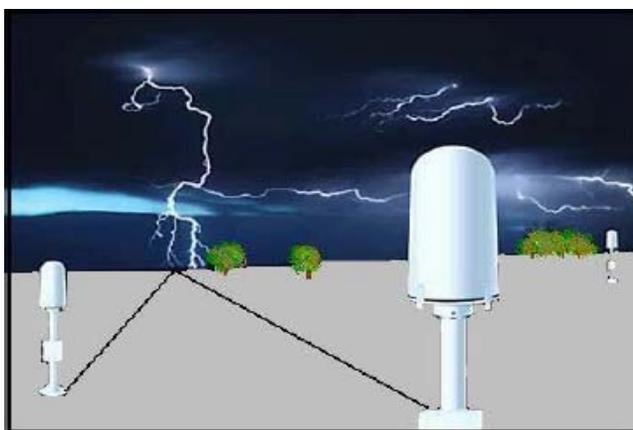


FIGURA 18 – Esquematização para detecção de DEA utilizando sensores IMPACT.
Fonte: *Global Atmospheric* (2004).

3.1.2. Dados no Sul do Brasil

O SIMEPAR opera desde 1996 o Sistema de Detecção de Descargas Atmosféricas, com as tecnologias denominadas *Lightning Position and Tracking System* (LPATS) e *IMproved Accuracy from Combined Tecnology* (IMPACT) da *Global Atmospheric Incorporation* (GAI). Estes sistemas de detecção processam dados transmitidos dos sensores remotos sincronizados através do Sistema de Posicionamento Global (GPS), proporcionando informações de temporização de raios com resolução de até 100 nanossegundos. Além disso, indicam a localização e o tempo de ocorrência da DEA, além da polaridade e da amplitude máxima da corrente de retorno (em kA). Os sinais dos sensores são transmitidos por meio de canais de comunicação dedicados a um ambiente computacional que configura, monitora, coleta, armazena e processa as informações detectadas pelos sensores remotos. As posições das DEA e os parâmetros relacionados à intensidade e à polaridade são obtidos usando uma combinação de informações de ângulo, tempo e intensidade do sinal. A seguir, será descrita a atribuição de cada componente do sistema de detecção de DEA, esquematizada na Figura 19 (Beneti e Vasconcellos, 2002).

1. Os sensores dos tipos LPATS (5) e IMPACT (1), distribuídos pelo Paraná, enviam dados brutos à central de processamento *Location Processor Module* (LP2000);
2. A LP2000, por sua vez, calcula em tempo real as informações (localização, intensidade, polaridade, etc.) sobre a descarga e transmite os dados para outros sistemas de armazenamento;
3. Os dados enviados pela LP2000 são armazenados no Sistema Gerenciador de Banco de Dados (SGBD) Sybase da *Distribuiton and Archive Module* (DA2000) e no SGBD *Oracle*;
4. Para garantir a qualidade das informações, a *Network Management Module* (NM2000) realiza o monitoramento e análise da LP2000 e da rede de sensores.

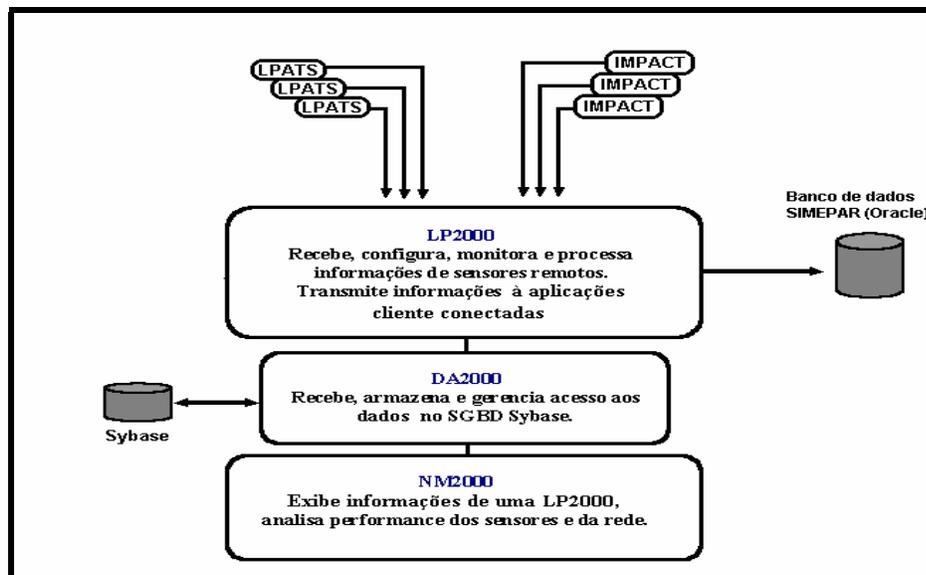


FIGURA 19 – Sistema de detecção de Descargas Elétricas Atmosféricas do SIMEPAR.
Fonte: Adaptada de Beneti e Vasconcellos (2002).

A qualidade dos resultados obtidos, em termos de eficiência e precisão na detecção e localização das DEA, é determinada por um grande número de fatores, incluindo a eficiência individual de cada sensor, o número médio de sensores que contribuem para a localização das DEA e a distância entre os sensores. Reap (1994) mostrou que a precisão de localização das DEA, na Flórida, pela rede de sensores *State University of New York at Albany* (SUNYA) é estimada em, aproximadamente, 4-6km. Enquanto que Watson et al. (1994) estimaram a eficiência de detecção da rede *Bureau of Land Management* (BLM) em, aproximadamente, 50%-60% e a posição do erro pode ser até 10-15km.

Os sensores de DEA utilizados pelo SIMEPAR estão distribuídos apenas sobre o Estado do Paraná, mas conseguem captar as DEA que ocorrem em Estados vizinhos ao Paraná (Santa Catarina e Rio Grande do Sul) e nos países de fronteira com o Sul do Brasil (Paraguai, Argentina e Uruguai). A Figura 20 (a) mostra a área de cobertura dos sensores do SIMEPAR (20°S a 35°S e 60°W a 45°W) e a topografia da América do Sul, enquanto que a Figura 20 (b) mostra detalhes da topografia do Estado do Paraná e as seis cidades, onde estão instalados os sensores de DEA. Sabe-se que as regiões localizadas nas proximidades dos limites da área indicada (quadrado vermelho, na Figura 20a) têm a qualidade dos dados de DEA inferior àquela dos dados obtidos na região central (Beneti e Vasconcellos, 2002). Ao mesmo tempo, os sistemas

meteorológicos severos, maiores causadores de DEA, que atingem diretamente o Sul do Brasil se deslocam antes sobre o Uruguai, leste da Argentina e centro-sul do Paraguai para então atingirem os Estados da Região Sul do Brasil. Sendo assim, entende-se como sendo relevante a inspeção detalhada destes dados em toda a área de cobertura dos sensores do SIMEPAR, pois não foram encontradas publicações que documentassem as limitações destes dados.

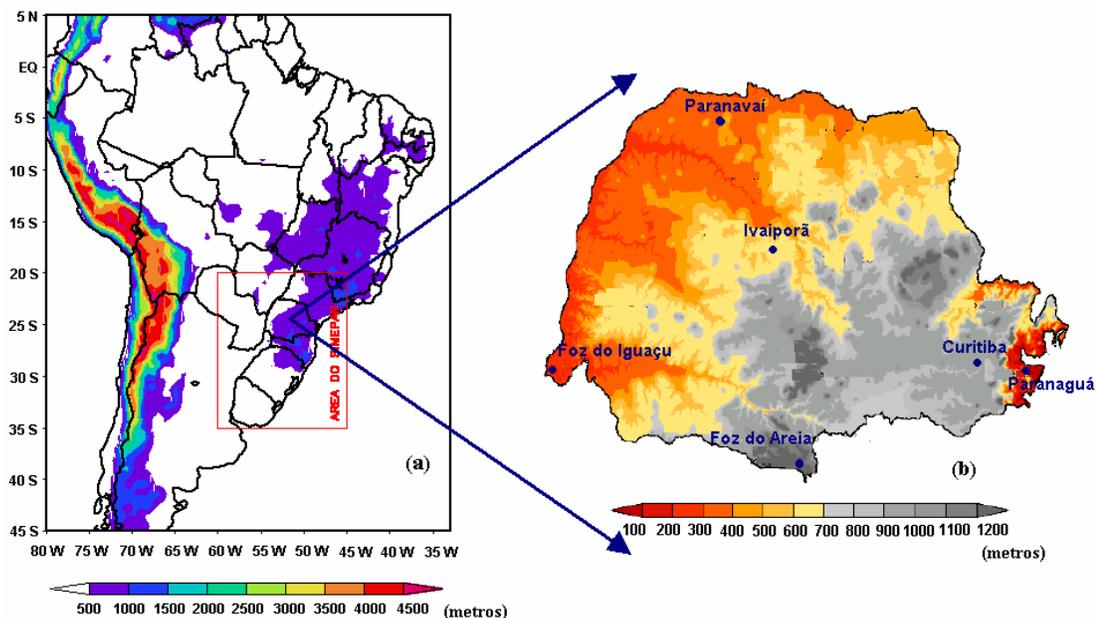


FIGURA 20 – (a) Área de cobertura dos sensores de Descargas Elétricas Atmosféricas do SIMEPAR (retângulo vermelho) e topografia da América do Sul (hachurado); (b) detalhes da topografia do Estado do Paraná e cidades onde os sensores estão localizados.

O período escolhido para ser analisado neste trabalho envolve os anos de 2002 e de 2003. Estes dados foram cedidos pelo SIMEPAR na forma de arquivos com a configuração mostrada na Figura 21, abaixo.

DIA	MES	ANO	HORA	MIN	SEG	MILESEG	LATITUDE	LONGITUDE	PICO
02	08	2003	04	07	34	92.494800	-31.20000	-53.35570	33
02	08	2003	04	23	52	295.28800	-30.26800	-55.50570	52

FIGURA 21 – Dados de Descargas Elétricas Atmosféricas organizados pelo SIMEPAR.

Para extrair as informações pertinentes a este estudo (ver item Resultados e Discussão, para detalhes), foram elaborados programas no ambiente Matlab.

Os dados de DEA já vieram com valores de corrente filtrados entre -15kA e +15kA. É importante salientar que as DEA intranuvem geralmente não são consideradas pelo sistema de detecção LPATS e IMPACT, utilizados pela rede de sensores do SIMEPAR. Isto porque as DEA intranuvem diferem das DEA nuvem-solo pela onda eletromagnética mais rapidamente atenuada, pela sua alta frequência (100 a 200kHz) e pela baixa amplitude do pico em relação as DEA nuvem-solo, cuja frequência é de 5 a 10kHz. O valor de 15kA na intensidade da corrente, característico de DEA intranuvem, também não foi utilizado nos trabalhos de Faria (1998), Naccarato (2001), Gomes (2002) e Faria (2002).

3.2. SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA

3.2.1. Seleção dos Casos de Estudo

Para a análise dos dados de Descargas Elétricas Atmosféricas, em associação a sistemas de tempo adverso, foram selecionados três casos de Sistemas Convectivos de Mesoescala, de acordo com os critérios abaixo:

1. O Sistema Convectivo de Mesoescala deveria ocorrer dentro da área de cobertura dos sensores durante todo o seu ciclo de vida (formação, maturação e dissipação);

2. O Sistema Convectivo de Mesoescala deveria ocorrer de forma isolada na maior parte de seu tempo de vida, possibilitando assim, a avaliação das Descargas Elétricas Atmosféricas associadas exclusivamente àquele sistema.

Procedendo desta forma, foram selecionados os Sistemas Convectivos de Mesoescala listados abaixo. A seqüência obedece a ordem de discussão de cada Sistema Convectivo de Mesoescala, conforme será visto no item 4.

1. Caso → 13-14 de março de 2002;
2. Caso → 22-23 de dezembro de 2003;
3. Caso → 19-20 de dezembro de 2003.

A evolução destes SCM foi analisada com a utilização dos dados de DEA, de imagens de satélite geostacionário e de campos do modelo de mesoescala MM5.

3.2.1.1. Imagens do Satélite Geostacionário

Neste trabalho foram utilizadas as imagens do satélite geostacionário GOES-8 e GOES-12, no canal infravermelho, que estavam disponíveis na Internet. Estas imagens apresentam as temperaturas do topo da nebulosidade realçadas em cores diferentes, que caracterizam a intensidade destes sistemas, conforme a escala de cores da Figura 22.

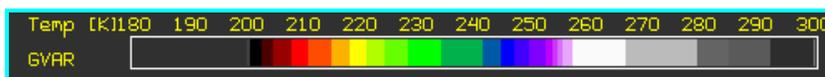


FIGURA 22 – Escala de cores e respectiva temperatura (K) do topo da nebulosidade das imagens de satélite utilizadas.

Estas imagens de satélite eram disponibilizadas a cada meia hora, aproximadamente. Entretanto, a ocorrência de falhas na seqüência destas imagens era freqüente, podendo chegar a ser de até algumas horas. Assim, para completar a seqüência de imagens dos casos de estudo, sempre que necessário, foram utilizadas as imagens dos satélites GOES-8 e GOES-12 disponíveis no site (<http://www.cptec.inpe.br>) do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE), que estão em tons de cinza. Neste tipo de imagem, as áreas mais

brancas representam as regiões mais frias. Quando não havia imagens no momento em que ocorreu o término do SCM, adotou-se um critério semelhante àquele de Laing e Fritsch (1997) que diz o seguinte: uma vez identificada a ocorrência de um SCM, o horário de seu término foi considerado como sendo àquele relativo ao horário intermediário entre imagens consecutivas, onde a penúltima imagem ainda mostra o SCM e a última não. No caso de identificação do horário de início do SCM, foi adotado o mesmo critério, considerando, desta vez, imagens consecutivas onde a primeira imagem não mostra o SCM e a segunda mostra. De posse destas imagens, foi realizada a avaliação detalhada dos SCM em estudo, verificando o seu desenvolvimento desde o início até a dissipação dos mesmos.

3.2.1.2. Modelo de Mesoescala MM5

As simulações utilizadas foram desenvolvidas tendo-se como base o sistema de quinta geração MM5, simulador de domínio público, construído pela *Pennsylvania State University* (PSU) em conjunto com o *National Center for Atmospheric Research* (NCAR). Trata-se de um sistema numérico não hidrostático, destinado a previsão do tempo ou simulação e previsão de circulações atmosféricas regional ou de mesoescala. Para o processamento do modelo MM5 foram utilizados dois sites, em função da data de ocorrência do SCM:

1. Campos de reanálise do modelo global *National Center for Atmospheric Research /National Center for Environmental Prediction* (NCAR/NCEP), disponível em <http://www.cdc.noaa.gov>, em formato netcdf, para o SCM dos dias 13-14 de março de 2002;
2. Dados de superfície, de altitude e campos do modelo global do NCEP, disponível em <http://www.mmm.ucar.edu>, em diferentes formatos, para os SCM dos dias 19-20 e 22-23 de dezembro de 2003.

A estrutura do modelo MM5 permite selecionar a grade horizontal e a resolução temporal dos campos de saída. As configurações do modelo usadas para os casos de SCM estudados neste trabalho são apresentadas na Tabela 1.

TABELA 1 – Configurações do MM5 para simular os casos de SCM. O domínio D1 foi comum a todos. Os domínios D2, D3 e D4 foram utilizados para os SCM que ocorreram nos dias 13-14 março/2002, 22-23 dezembro/2003 e 19-20 dezembro/2003, respectivamente.

Domínios do MM5	D1	D2	D3	D4
		(13-14 março)	(22-23 dezembro)	(19-20 dezembro)
Resolução Horizontal (~km)	40	5	5	5
Pontos de Grade (Este-Oeste)	97	155	266	311
Pontos de Grade (Norte-Sul)	92	155	200	200
Níveis σ -vertical	23	23	23	23
Passos de tempo (seg)	110	12	12	12

Com as configurações mostradas na Tabela 1, os campos foram obtidos com intervalo de 1 hora, ao longo de todo ciclo de vida do SCM.

A grade maior escolhida para processar o modelo é mostrada na Figura 23. Esta grade (referida como domínio 1) engloba a área em que os dados de DEA (mostrada na Figura 20a, anteriormente) estão disponíveis, e tem resolução horizontal de 40km. Dentro desta área ocorreram os três SCM, que serão analisados em detalhes no item 4. Para cada SCM, foi definido um domínio menor (mostrado na Tabela 1), todos localizados dentro do domínio 1, envolvendo exclusivamente os SCM em questão, com resolução horizontal de 5km.

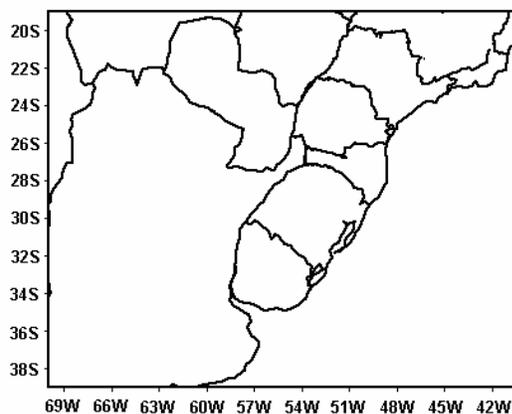


FIGURA 23 – Domínio maior de estudo (D1) comum aos três SCM analisados.

O código numérico do modelo é dividido em módulos que facilitam o seu desenvolvimento computacional, mostrados a seguir.

O módulo **TERRAIN** é responsável pela configuração dos domínios de mesoescala, possuindo a capacidade de simular, a partir de domínios aninhados, e gerar arquivos de entrada para os módulos posteriores. Ainda neste módulo, determina-se o uso do solo que será utilizado dentro do domínio, onde é realizada a interpretação horizontal da topografia. O módulo **REGRID** tem a função de ler os dados meteorológicos em um domínio regular, em níveis de pressão, na qual serão organizadas as saídas de um módulo de grande escala e adaptá-las ao(s) domínio(s) especificado(s) na etapa anterior. O próximo módulo, o **RAWINS**, aperfeiçoa as análises meteorológicas na grade de mesoescala por análises objetivas de superfície e observações de ar superior. O módulo seguinte **INTERPF** tem por objetivo transformar as informações em níveis de pressão fornecidas pelo REGRID para dados em níveis sigma. O **MM5**, caracterizado como último módulo, fecha a simulação resolvendo as equações diagnósticas e prognósticas do modelo, de acordo com as parametrizações físicas pertinentes. Em outras palavras, é onde a previsão numérica do tempo é realizada de fato. O funcionamento do modelo é mostrado na Figura 24.

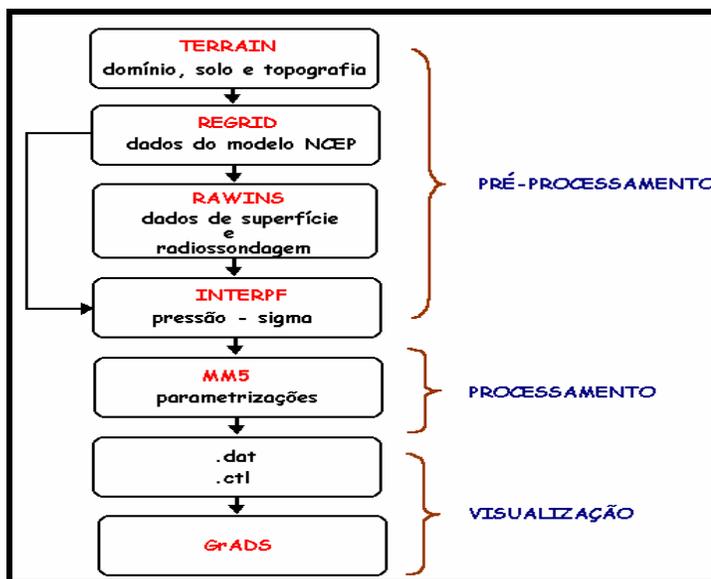


FIGURA 24 – Fluxograma de funcionamento do modelo de mesoescala MM5.

O MM5 possui muitos esquemas de parametrizações de processos físicos disponíveis: 8 opções de convecção profunda, 6 de microfísica de nuvens, 4 de radiação, 7 de camada limite planetária e 3 de superfície.

Os campos meteorológicos processados pelo modelo MM5 foram obtidos usando as parametrizações vistas na Tabela 2, abaixo:

TABELA 2 – Parametrizações utilizadas nos casos de SCM analisados neste trabalho.

Parametrizações do MM5	
Convecção Profunda	<i>Grell</i>
Microfísica de Nuvens	<i>Schultz</i>
Radiação	<i>Cloud</i>
Camada Limite Planetária	<i>MRF</i>
Solo	<i>Five-Layer Soil Model</i>

A escolha destas parametrizações foi baseada no trabalho de Santos et al. (2004), onde foram comparados os campos de vento restituídos pelos modelos ETA e MM5, para todo o Brasil. Talvez esta não seja a escolha ótima para a Região Sul do Brasil, mas realizar testes de sensibilidade das diferentes opções de parametrizações do MM5 para a região de estudo não foi objetivo deste trabalho. Mesmo assim, esta escolha ocorreu após testar outras três opções de parametrizações:

1. Parametrizações padrão do MM5, desenvolvidas para regiões de latitudes médias dos Estados Unidos da América (Dudhia et al., 2002);
2. Parametrizações estabelecidas para o Estado de São Paulo (comunicação pessoal);
3. Parametrizações estabelecidas para o Estado do Rio de Janeiro (comunicação pessoal).

Os melhores resultados das comparações entre os campos de saída do MM5 com as imagens de satélite foram alcançados usando as parametrizações de Santos et al. (2004), motivo pelo qual esta foi escolhida.

As simulações realizadas com o modelo MM5, envolvendo todo o tempo de vida dos SCM que ocorreram no Sul da América do Sul, foram processadas da maneira mostrada na Tabela 3, para cada caso de estudo e em ambos os domínios.

TABELA 3 – Simulações realizadas com o modeloMM5, para os SCM estudados neste trabalho.

	SCM (13-14 mar/2002)				SCM (22-23 dez/2003)		SCM (19-20 dez/2003)			
	Simulação1		Simulação2		Simulação1		Simulação1		Simulação2	
	Hora	Dia	Hora	Dia	Hora	Dia	Hora	Dia	Hora	Dia
Início	09HL	13	21HL	14	09HL	22	09HL	19	21HL	20
Término	21HL	14	09HL	14	21HL	23	21HL	20	09HL	20

Após os campos meteorológicos terem sido processados pelo modelo MM5, estes foram visualizados por intermédio do pacote gráfico *Grid Analysis and Display System* (GrADS), desenvolvido por pesquisadores do *Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies* (COLA) da *Universidade de Maryland* (EUA). Este pacote, específico para visualização e análise de dados em grade, implementa um modelo de dados em 4 dimensões, que normalmente são: latitude, longitude, nível e tempo. Esta técnica de armazenamento possibilita facilmente a comparação de grupos de dados diferentes, pois permite o correto ajuste espacial para a sobreposição dos mesmos. O GrADS foi utilizado na plataforma LINUX, o qual é de domínio público.

Dentre os vários campos de saída do modelo MM5, neste trabalho foram analisadas as variáveis mostradas na Tabela 4, onde também é indicado o nível em que as mesmas foram avaliadas. Os horários em que os campos meteorológicos, indicados na Tabela 4, serão analisados no item 4 correspondem aos períodos inicial, intermediário e de maturação do SCM, determinados após inspeção nas imagens de satélite.

TABELA 4 – Variáveis meteorológicas empregadas na análise dos três SCM.

Níveis	Variáveis Meteorológicas
Superfície	Vento horizontal (m/s)
	Temperatura do Ar (°C)
	Razão de Mistura (g/kg)
	Temperatura da Superfície do Mar (°C)
850hPa	Vento horizontal (m/s)
200hPa	Vento horizontal (m/s)

3.2.1.3. Modelo de Mesoescala ETA

Analogamente ao modelo MM5, o modelo ETA é um modelo de mesoescala, em ponto de grade, de equações primitivas. A versão do modelo ETA que roda operacionalmente no CPTEC/INPE é hidrostático, com resolução horizontal atual de 40km e vertical de 38 níveis. O processamento do modelo é realizado duas vezes ao dia, um com condição inicial das 21HL e o outro das 09HL, com intervalo de 6 horas entre os campos prognosticados. Assim, os campos meteorológicos são disponíveis nos horários 03, 09, 15 e 21HL. A condição inicial é proveniente da análise do NCEP e as condições de contorno lateral são provenientes das previsões do modelo global do CPTEC, atualizadas a cada 6 horas. A grade horizontal é a grade E de Arakawa e a coordenada vertical é a coordenada eta. Uma descrição mais detalhada sobre o modelo ETA pode ser encontrada em Chou (1996).

Este modelo é processado para toda a América do Sul. Dentro deste domínio, foi selecionada uma grade horizontal igual àquela do domínio 1 (Figura 23, página 37) do modelo MM5 para fins de comparação entre os campos restituídos por estes dois modelos.

3.2.1.4. Validação do Modelo MM5

Esta análise foi incluída porque as distribuições espaciais das DEA estavam conflitantes com as interpretações das imagens de satélite e, portanto, era preciso verificar a causa deste fato. Então, o modelo MM5 foi fundamental para esclarecer esta dúvida. Mas, para se ter maior confiança no MM5, foram feitas comparações entre os dados observados em superfície com as saídas dos modelos MM5 e ETA.

Os dados de superfície para o Estado do Rio Grande do Sul, que estavam disponíveis no Centro de Pesquisas e Previsões Meteorológicas (CPPMET) com a necessária resolução temporal, eram relativos somente para o mês de março de 2002. Portanto, as comparações entre dados de superfície, MM5 e ETA puderam ser realizadas apenas para o caso referente aos dias 13-14 de março de 2002. Estes dados foram obtidos junto ao 8º Distrito de Meteorologia/Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e à Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO). Dentre o

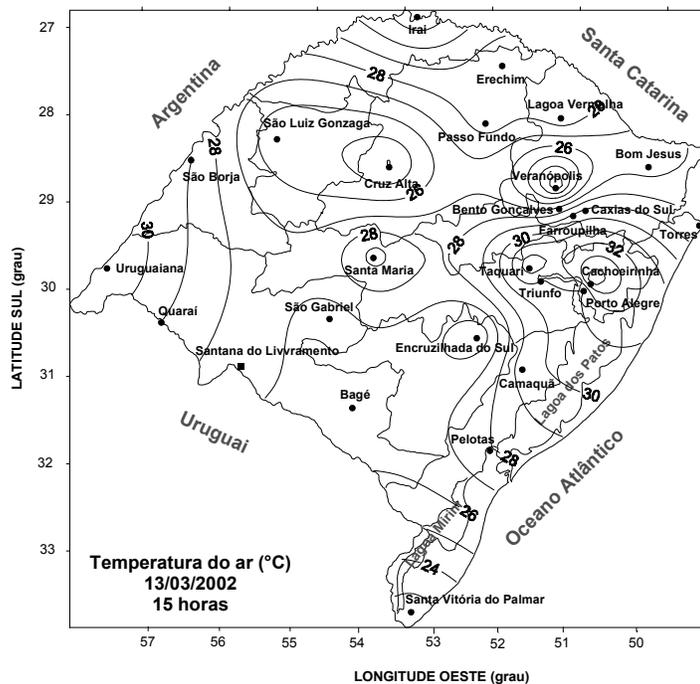
conjunto de dados (horários) existentes, escolheu-se a temperatura do ar devido ao maior número de estações meteorológicas sobre o Estado.

Para esta etapa de validação do modelo MM5, houve uma situação conflitante: os campos de temperatura do ar restituídos pelo MM5 estavam no nível da superfície, portanto diretamente comparáveis com os dados observados, enquanto que os do ETA encontravam-se no nível de 1000hPa. Entretanto, levando-se em consideração que 1000hPa está a apenas a 120m da superfície, esta comparação torna-se aceitável, dada a proximidade entre estes níveis. Ainda, uma vez que os campos do modelo ETA apresentam 6 horas de intervalo, foram feitas comparações em todos os horários disponíveis, durante o tempo de vida do SCM dos dias 13-14 de março de 2002. Os horários escolhidos para mostrar aqui (15HL e 21HL) foram selecionados em função da representatividade da atividade convectiva do SCM. Finalmente, para o traçado das isolinhas dos campos em superfície de temperatura do ar sobre o Estado do Rio Grande do Sul, foi utilizado o programa *Surfer* (versão 7.0) para o ambiente *Windows*.

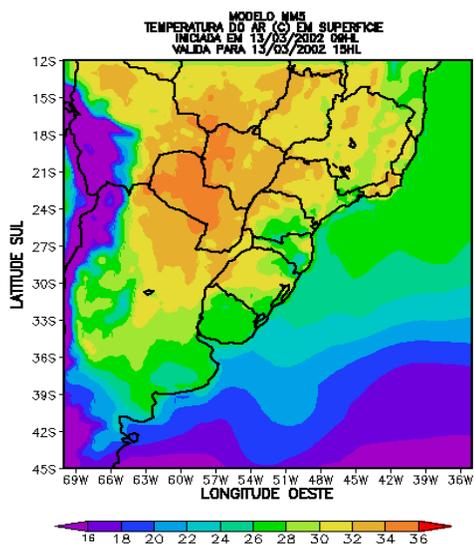
- **Comparação às 15HL**

Para os dados observados em superfície (Figura 25a), notam-se valores mais elevados de temperatura do ar nas partes oeste, norte e leste do Rio Grande do Sul, que variam de 28°C a 32°C. Enquanto que ao sul e nordeste do Estado, são verificados valores menores, de até 24°C.

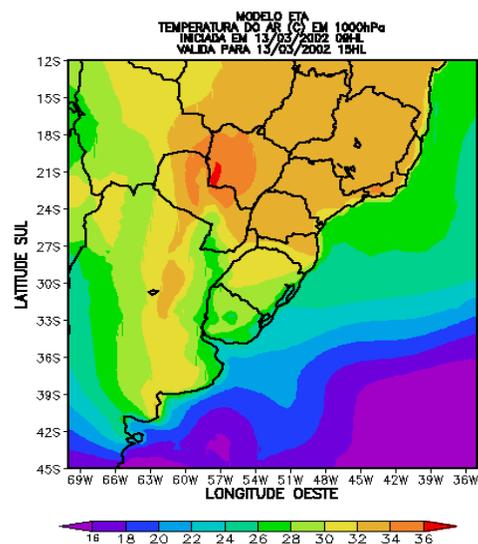
O modelo MM5 (Figura 25b) conseguiu discriminar valores menores de temperatura (26°C a 28°C) à nordeste e mais elevados à leste do Estado (30°C a 32°C), detalhes que o ETA (Figura 25c) não indicou. Melhores resultados do MM5 também foram verificados do centro ao sul do Rio Grande do Sul, pois os valores de temperaturas foram decrescentes, como mostraram os dados observados. Apenas no oeste do Estado o MM5 superestimou a temperatura em 2°C, o que não é um valor absurdo, uma vez que esta diferença se encontra dentro da margem de erro das previsões operacionais. É visível que, para este caso, o modelo ETA reproduziu os valores de temperatura de forma quase que meridional sobre o Estado, bem diferente do observado. O MM5 conseguiu colocar em evidência as particularidades locais.



a)



b)



c)

FIGURA 25 – Comparação da temperatura do ar entre dados observados e campos simulados pelos modelos MM5 e ETA às 15HL do dia 13/03/2002 no Estado do Rio Grande do Sul.

- **Comparação às 21HL**

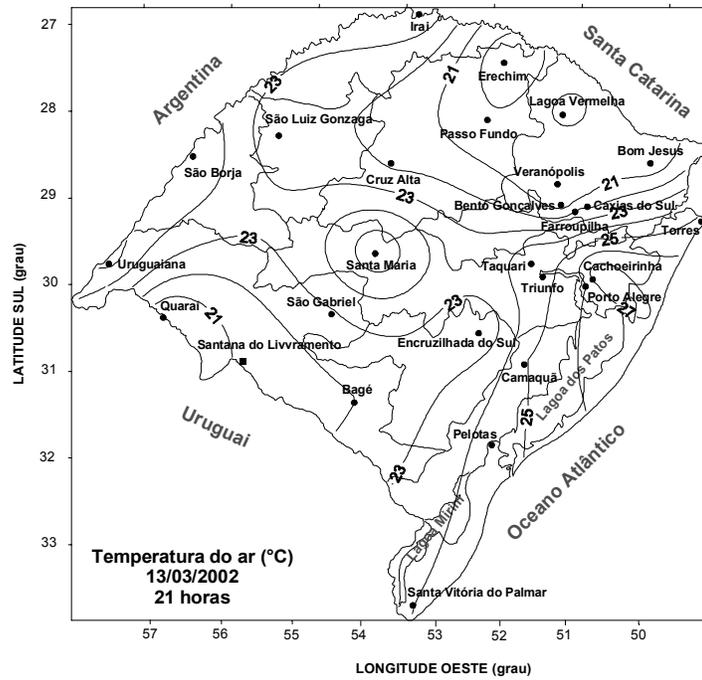
Conforme a Figura 26a observam-se valores de temperatura do ar menores em todo o Estado do Rio Grande do Sul, seguindo o ciclo diurno. Valores de temperatura entre 21°C e 23°C são verificados em quase todo o Estado, sendo que temperaturas mais elevadas encontram-se à leste, com máxima de 27°C.

De maneira geral, para este horário o MM5 (Figura 26b) também restituiu valores de temperatura do ar mais coerentes com o observado, em relação ao ETA (Figura 26c). O MM5 mostrou, mais uma vez, os detalhes como, por exemplo valores mais elevados (iguais a 26°C) no litoral gaúcho. Em média, a temperatura sobre o Estado ficou em torno de 23°C, sendo este valor melhor verificado no modelo MM5. O ETA chegou a superestimar em 10°C os valores ao norte do Estado (!) indicando que este modelo não conseguiu restituir o campo da temperatura do ar.

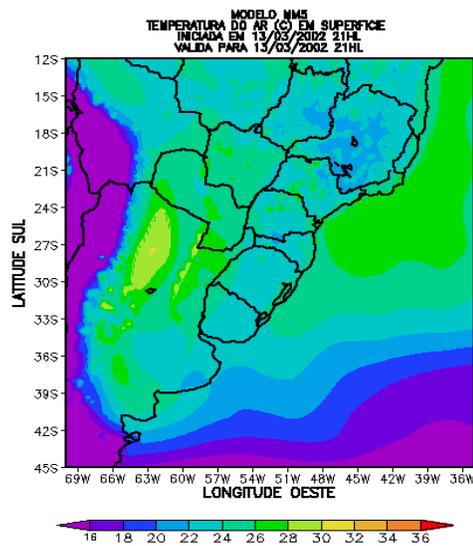
A partir das comparações realizadas nos outros horários (não mostrado), concluiu-se que o MM5 melhor simulou o observado.

Os resultados mostrados acima aumentaram a confiabilidade nos campos meteorológicos restituídos pelo modelo MM5.

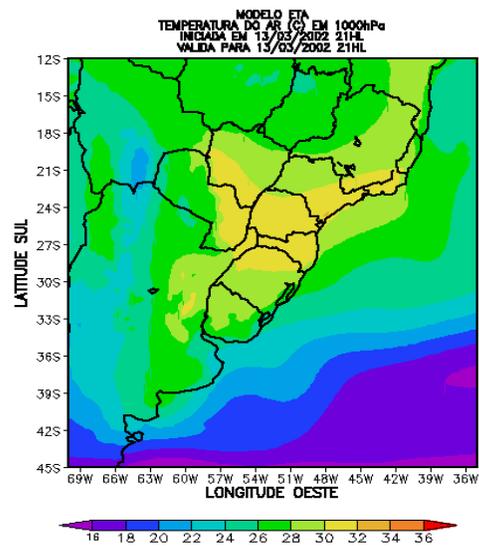
Assim, no próximo item serão mostrados e discutidos os resultados encontrados com os materiais e métodos adotados nesta pesquisa.



a)



b)



c)

FIGURA 26 – Comparação da temperatura do ar entre dados observados e campos simulados pelos modelos MM5 e ETA às 21HL do dia 13/03/2002 no Estado do Rio Grande do Sul.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises dos resultados, assim como as discussões sobre os mesmos, são apresentadas na seqüência. Inicialmente, realizam-se as análises das distribuições anual e mensal das Descargas Elétricas Atmosféricas referentes aos anos de 2002 e 2003. Em seguida, são mostrados os estudos de três Sistemas Convectivos de Mesoescala, por intermédio de imagens de satélite, distribuição espacial de Descargas Elétricas Atmosféricas e campos meteorológicos obtidos com o modelo de mesoescala MM5.

4.1. ESTUDO SOBRE AS DESCARGAS ELÉTRICAS ATMOSFÉRICAS

Nesta seção são mostradas as distribuições anual e mensal das Descargas Elétricas Atmosféricas detectadas nos anos de 2002 e 2003 pela rede de sensores do SIMEPAR. Salienta-se que esta avaliação é qualitativa pelos motivos que serão expostos e detalhados nas seções 4.2, 4.3 e 4.4.

4.1.1. Distribuição Anual

A Figura 27 mostra as distribuições das DEA nos anos de 2002 e 2003. Para o ano de 2002 observa-se que foram detectados aproximadamente 3 milhões e meio de DEA na região de cobertura dos sensores do SIMEPAR. Comparando este valor com aquele observado em 2003 (2 milhões e meio), nota-se que em 2002 foram detectadas aproximadamente 12% a mais de DEA. Esta maior quantidade total de DEA detectada em 2002, pode estar relacionada com o fato deste ano ter sido influenciado pelo fenômeno El Niño (NOAA, <http://www.noaa.gov>). Pinto Jr. e Pinto (2000) também verificaram um aumento das DEA em anos de El Niño. O evento El Niño em vários relatos na literatura sobre a sua ocorrência no Brasil, modifica os padrões de precipitação. Verificando-se um aumento da precipitação sobre a Região Sul (Nery et al., 1997; Diniz e Calvetti, 1998; Sansigolo et al., 2000; Grimm e Pscheidt, 2004). Uma vez que as DEA têm ligação direta com a ocorrência de SCM, este fato justifica, pelo menos parcialmente, o grande número de DEA encontrado no ano de 2002.

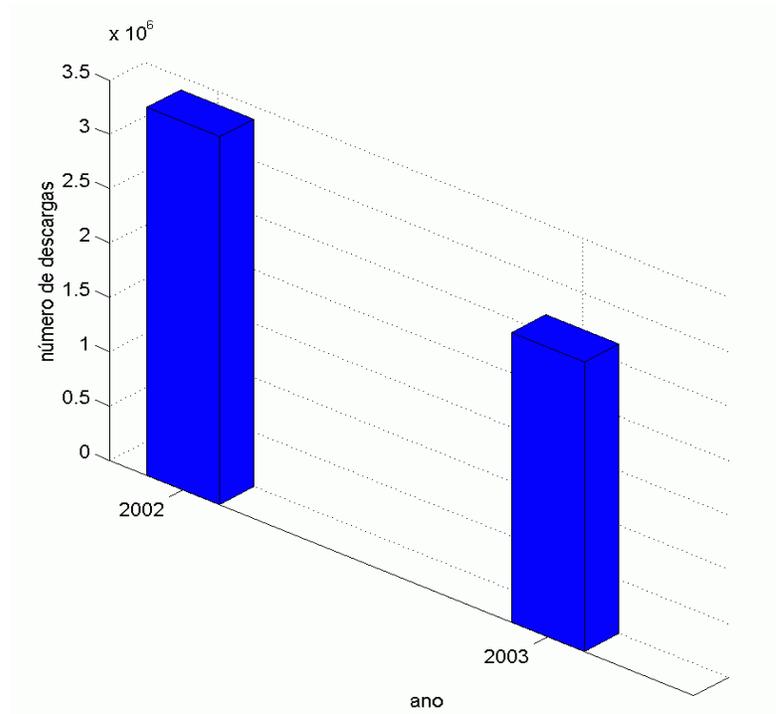


FIGURA 27 – Distribuição anual de Descargas Elétricas Atmosféricas em 2002 e 2003.

4.1.2. Distribuição Mensal

As distribuições mensais das DEA para os anos 2002 e 2003 estão apresentadas nas Figuras 28 e 29, respectivamente. De maneira geral, observa-se grande variabilidade nestes dois anos. É também observado um comportamento similar, pois existem valores máximos de atividade elétrica nos meses quentes e mínimos nos meses frios. O fato de se ter encontrado maior número de DEA nos meses quentes, concorda com outros trabalhos (Reap e MacGorman, 1989; Reap, 1994; Steiger e Orville, 2002), pois as condições atmosféricas deste período favorecem o aumento da evaporação pelo maior aquecimento e conseqüente formação de nuvens *Cumulonimbus*, grandes produtoras de DEA. Assim, estes resultados também podem estar associados aos SCM, que passam a atuar com maior intensidade nessas condições (Machado et al., 1998). Nos meses frios, por ocorrer a situação inversa, foram detectadas as quantidades mínimas de DEA na área analisada. A estação mais fria dos anos de 2002 e 2003 apresenta, na soma, valores de aproximadamente 200 mil DEA, não havendo, portanto, grande distinção entre o inverno/2002 e inverno/2003. Nesta época do ano, sabe-se que, dentre os sistemas meteorológicos, os mais freqüentes são os sistemas frontais, e que, de acordo com os dados de DEA do SIMEPAR têm menor atividade elétrica associada. Realmente, a atuação de sistemas frontais no inverno foi verificada por Oliveira (1986) e Lemos e Calbet (1996) e mostraram que, embora a entrada de sistemas frontais no continente seja comum em todas as estações do ano, existe uma variação sazonal na atividade convectiva a elas associadas, sendo extremamente baixa durante o inverno, principalmente, nos meses de junho e julho, quando a entrada de tais sistemas no continente sul-americano não traz tanta chuva. Existe uma semelhança muito grande nos valores de quantidades de DEA detectadas no inverno dos anos 2002 e 2003. Isto pode ter sido ocasionado pelas menores temperaturas encontradas nesta época do ano no Sul da América do Sul. Com pouco aquecimento, as condições propícias para a formação de SCM e, conseqüentemente, de descargas atmosféricas, tornam-se pequenas. Percebe-se uma relação direta entre as maiores quantidades de DEA com os meses mais quentes do ano, ou seja, com temperaturas mais elevadas em superfície.

Na região em estudo, as máximas atividades de DEA ocorreram em outubro de 2002 e em fevereiro de 2003. Uma possível explicação para a maior quantidade de DEA registradas em outubro de 2002, pode estar relacionada à proximidade do mês de novembro, pois Grimm e Pscheidt (2004) afirmam que o maior impacto do evento El

Niño ocorre na primavera, principalmente no mês de novembro. Já para fevereiro de 2003, a maior quantidade de DEA detectadas, possivelmente deve-se ao fato de que neste mês foram verificados grandes números de SCM, identificados por Scaglioni e Saraiva (2004). Os meses que apresentaram menor quantidade de DEA foram junho de 2002 e agosto de 2003, ambos no inverno, onde predominam as temperaturas mais baixas.

Entretanto, tendo em vista que a amostra de dados analisada envolve somente dois anos, com o agravante de que em um destes dois anos houve a influência do El Niño, não é possível identificar um padrão na ocorrência de DEA na região em estudo. Somase a estes fatores, os problemas nos dados de DEA que serão vistos em detalhes nas seções seguintes.

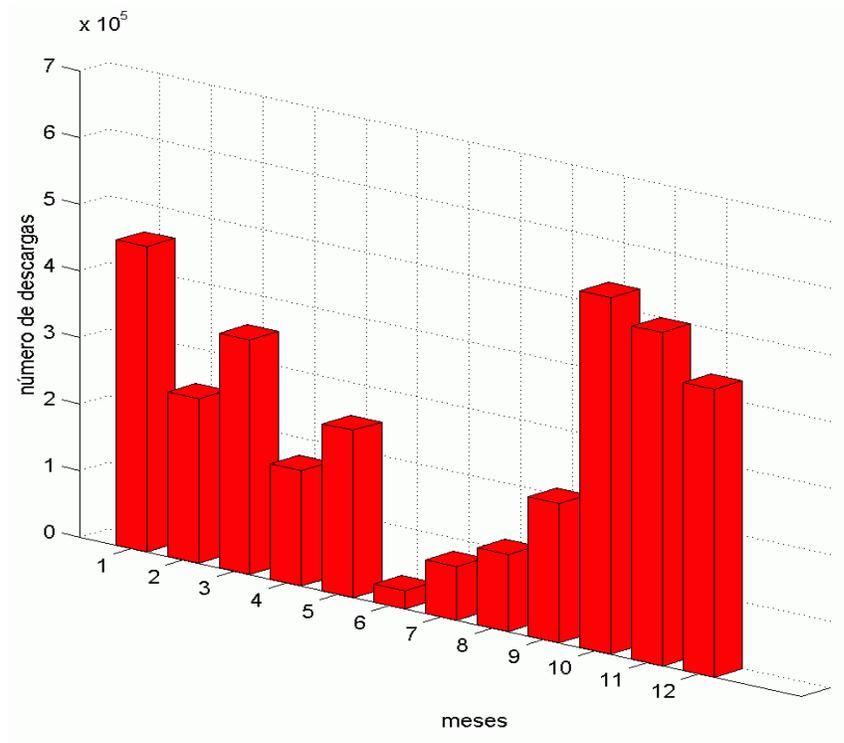


FIGURA 28 –Distribuição mensal de Descargas Elétricas Atmosféricas no ano de 2002.

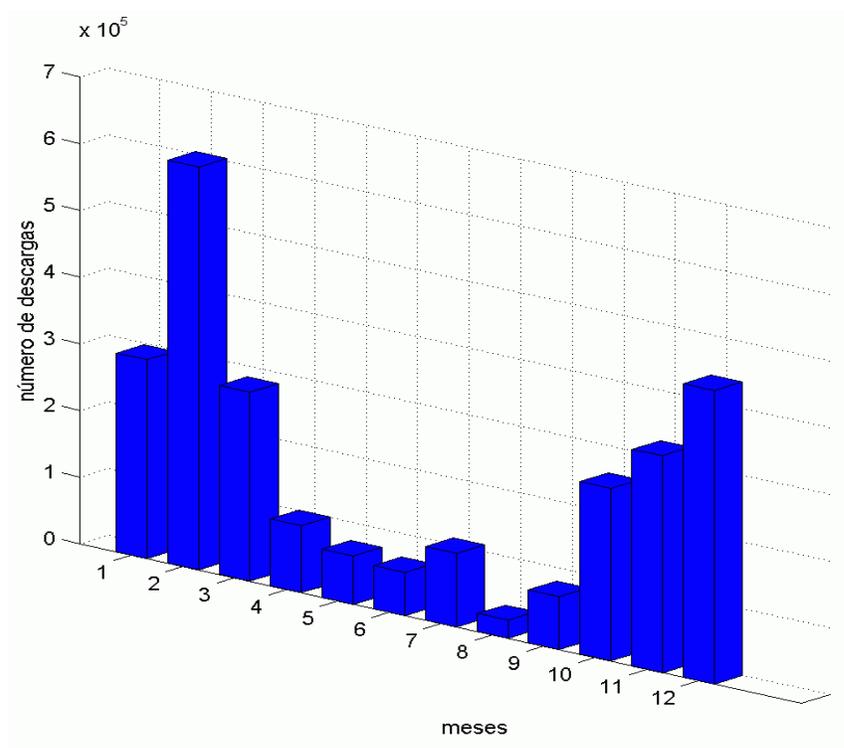


FIGURA 29 –Distribuição mensal de Descargas Elétricas Atmosféricas no ano de 2003.

4.2. ESTUDO DOS CASOS SELECIONADOS

Para o estudo dos três casos de SCM foram utilizadas: imagens de satélite, dados de descargas elétricas atmosféricas e campos meteorológicos obtidos com o modelo de mesoescala MM5.

As imagens de satélite mostradas para cada SCM apresentam intervalo, de aproximadamente, 1 hora. A escolha do intervalo de tempo entre as imagens foi baseada na identificação de mudanças significativas na estrutura do SCM durante seu tempo de vida e na disponibilidade das imagens. Este intervalo de tempo também possibilitou a comparação das imagens com a distribuição espacial das DEA e com os campos do modelo MM5. Nas imagens de satélite estarão presentes círculos, na cor magenta, ressaltando a região onde o SCM de interesse irá se desenvolver. Assim, na seqüência serão abordados os principais resultados referentes aos casos de SCM em estudo. Lembra-se, ainda, que os SCM selecionados precisavam satisfazer os critérios especificados anteriormente (ver item 3.2.1). Finalmente, tendo em vista as diferenças entre os SCM que serão analisados no seguimento do trabalho, foram incluídas, para o domínio menor, as avaliações dos seguintes campos: temperatura do ar (casos 13-14 de março de 2002 e 19-20 de dezembro de 2003) e temperatura potencial equivalente (caso 22-23 de dezembro de 2003), no intuito de colocar em evidência um aspecto em particular.

4.2.1. Caso: 13-14 de março de 2002

O SCM que ocorreu nos dias 13-14 de março se formou no litoral do Estado de Santa Catarina em consequência da circulação de brisa marítima, fenômeno cuja evolução é altamente dependente da situação de grande escala (Freitas e Silva Dias, 2004).

4.2.1.1. Interpretação das Imagens de Satélite

A evolução do SCM em questão foi acompanhada por meio de imagens de satélite (Figura 30) desde seu início, no dia 13/03/2002 às 1409HL, até o seu término, às 0545HL do dia 14/03/2002. Abaixo, o ciclo de vida deste sistema será descrito.

Fase de formação

Na tarde do dia 13/03/2002 (Figura 30a) verifica-se o início da formação convectiva do SCM, como indica a nebulosidade que está sobre o Estado de Santa Catarina. Após trinta minutos, às 1439HL em 13/03/2002 (Figura 30b), o SCM torna-se mais visível com regiões instáveis deslocadas mais à leste de Santa Catarina. Já nas Figuras 30c e 30d, nota-se que o SCM agora apresenta um núcleo convectivo intenso e encontra-se no litoral Catarinense. O SCM continua se intensificando e está situado na divisa entre os Estados de Santa Catarina e do Paraná, conforme se pode perceber nas Figuras 30e, 30f e 30g. Na Figura 30h, às 1939HL em 13/03/2002, pode-se perceber que o SCM permanece muito intenso, com a existência de um núcleo mais ativo e deslocando-se para o Paraná. Este SCM apresenta um formato linear, com sua maior porção sobre o Oceano Atlântico. Ao longo do dia 13, o SCM continuou se intensificando, como pode ser visto na Figura 30i, onde permanece com seu núcleo bastante ativo e encontra-se no litoral Paranaense. Salienta-se que o SCM está localizado no litoral, com uma metade sobre o continente e a outra sobre o Oceano. Na continuidade do texto a fase de maturação do SCM será avaliada.

Fase de maturação

No final do dia 13/03/2002, o SCM continua em desenvolvimento, apresentando uma região convectiva mais intensa na região do litoral Paranaense. Grande parte do sistema continua sobre o Oceano Atlântico. Às 2309HL do dia 13/03/2002 (Figura 30j) o SCM apresenta maiores proporções, indicando ter alcançado seu estágio de maturação. O núcleo convectivo cobre todo o litoral Paranaense e a sua área instável começa a adentrar no Estado de São Paulo. Entretanto, a maior parte do SCM ainda encontra-se sobre Oceano Atlântico. A fase de dissipação do sistema será mostrada abaixo.

Fase de dissipação

O SCM apresenta, no horário das 0039HL do dia 14/03/2002 (Figura 30l), atividade convectiva menos intensa em seu núcleo e apenas a área menos instável do SCM encontra-se no litoral Paranaense e Paulista. Nesta fase, o sistema atinge o seu maior tamanho, mas com atividade convectiva em decaimento. Por fim, na Figura 30m observa-se o SCM em estado de dissipação final, no litoral de São Paulo. A partir das análises acima, o tempo de vida total deste SCM pode ser estimado em aproximadamente 16 horas.

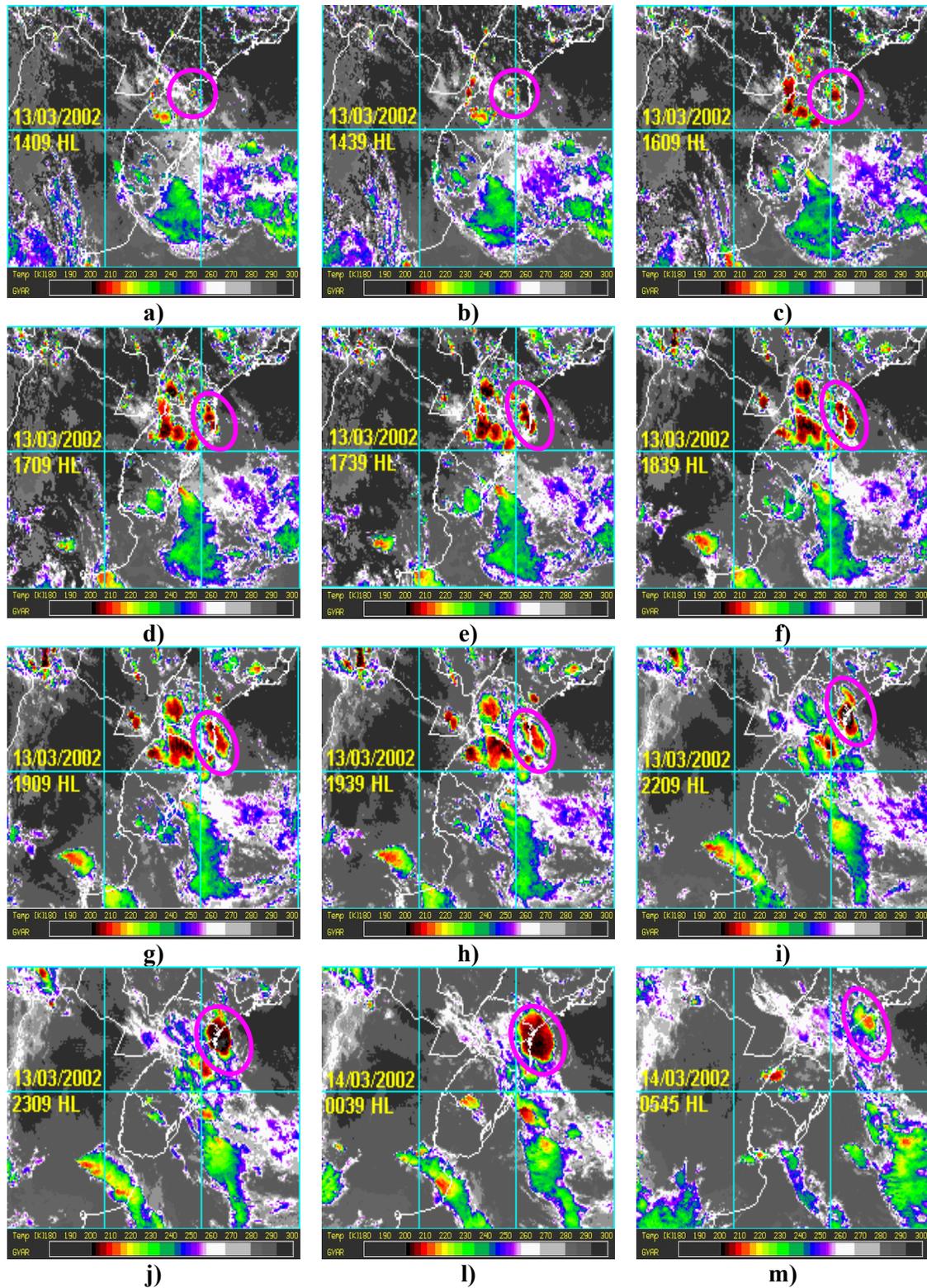


FIGURA 30 – Sequência de fragmentos das imagens do satélite geostacionário GOES-8, no canal infravermelho, referente ao caso 13-14 de março de 2002.

4.2.1.2. Distribuição Espacial das Descargas Elétricas Atmosféricas

Para complementar a informação sobre a atividade convectiva ao longo do ciclo de vida deste SCM, é apresentada a distribuição espacial da ocorrência de DEA. Com a acumulação de localizações de DEA ao longo do tempo, espera-se encontrar a estrutura da área convectiva deste SCM que se desenvolveu sobre o Paraná. Aqui a preocupação consiste em buscar explicações para a ocorrência das DEA associadas unicamente com a nebulosidade do SCM em estudo.

Nas Figuras 31a até 31e não se consegue identificar uma relação direta entre o SCM e as DEA. Já na Figura 31f, nota-se que na fase de formação do SCM (sobre o Estado de Santa Catarina), apesar de distante do Paraná, os sensores até conseguiram captar os sinais de DEA associados ao SCM, porém com uma significativa defasagem espacial. Ao comparar-se a região onde foram detectadas as DEA com aquela de localização do SCM (observada na imagem de satélite, Figura 30g) percebe-se uma grande discrepância, pois às 19HL do dia 13/03/2002 o sistema está situado no litoral nordeste de Santa Catarina, não sendo compatível com a distribuição espacial das DEA. São mostradas nas Figuras 31g e 31h um aglomerado de DEA sobre o leste de Santa Catarina, aparentemente relacionado ao SCM. Contudo, para estes horários, o SCM não mais se localiza nestes pontos. Ressalta-se que às 22HL em 13/03/2002 (Figura 31i) o SCM adentra o Paraná, logo se esperava que os sensores detectassem a presença do SCM, porém isto não acontece. Às 23HL de 13/03/2002 (Figura 31j) é visível na imagem de satélite (Figura 30j), que o SCM está isolado e a caminho de seu desenvolvimento máximo. Entretanto, a distribuição espacial das DEA mostra uma configuração na forma de “arco”, sobre o litoral Catarinense, Paranaense e Paulista, o que não condiz com a estrutura do SCM. Somente às 00HL do dia 14/03/2002 (Figura 31l) observa-se alguma compatibilidade de localização das DEA com as observações na imagem de satélite, principalmente sobre o litoral do Paraná. À 01HL em 14/03/2002 (Figura 31m) é o melhor momento em que se consegue perceber a relação direta entre a distribuição espacial das DEA com a localização do SCM, possivelmente devido ao fato do SCM estar atingindo o local onde estão instalados os sensores de Paranaguá e de Curitiba. Na análise das Figuras 31n até 31s é possível verificar que a distribuição espacial de DEA continua mantendo alguma associação com a localização do SCM, na sua fase dissipativa.

Dentre os três casos de SCM selecionados para análise, este foi o que mostrou alguma relação entre a ocorrência do SCM e a distribuição espacial das DEA detectadas.

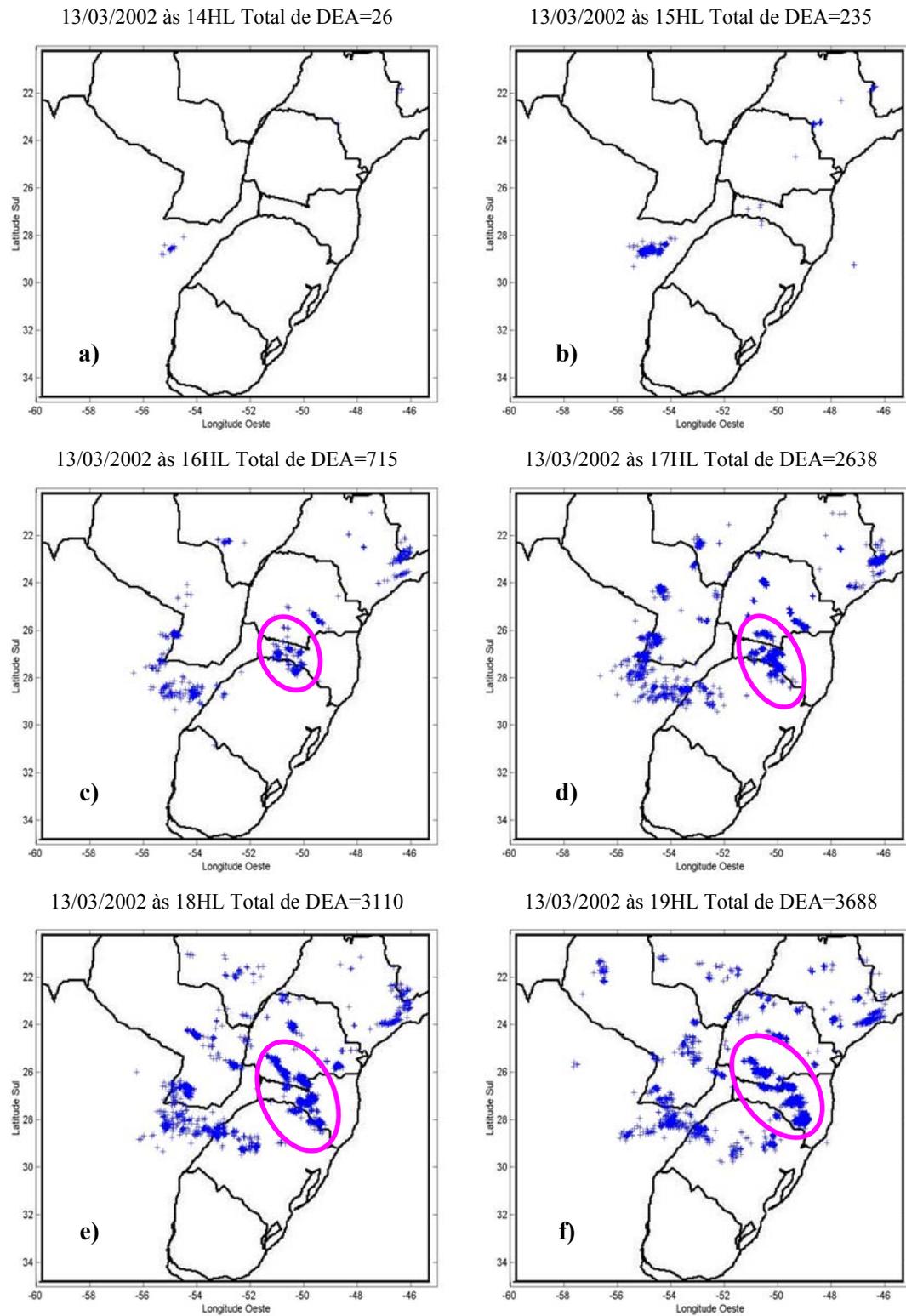
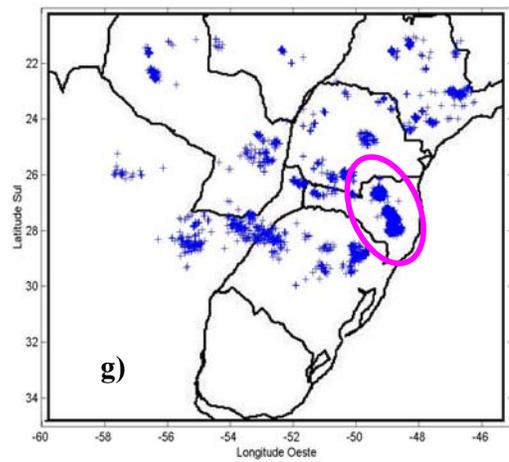
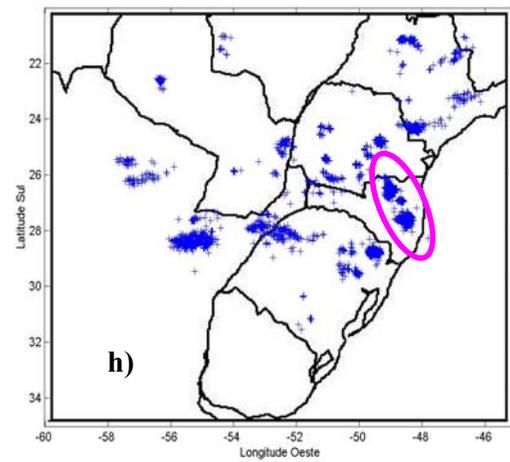


FIGURA 31 – Distribuição espacial das DEA para o caso 13-14 de março de 2002.

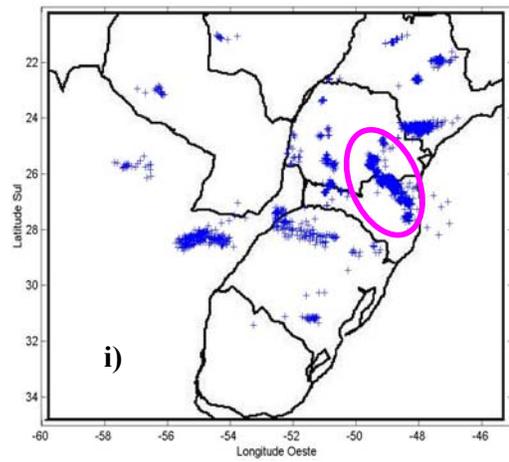
13/03/2002 às 20HL Total de DEA=4430



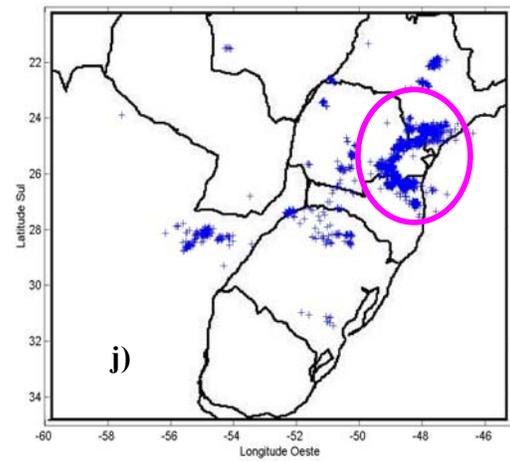
13/03/2002 às 21HL Total de DEA=4588



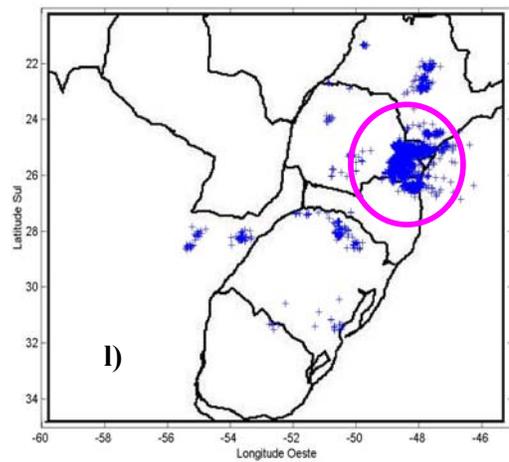
13/03/2002 às 22HL Total de DEA=4120



13/03/2002 às 23HL Total de DEA=4078



14/03/2002 às 00HL Total de DEA=5714



14/03/2002 à 01HL Total de DEA=7763

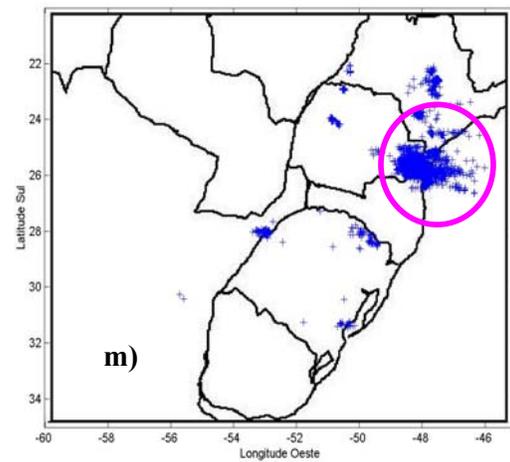
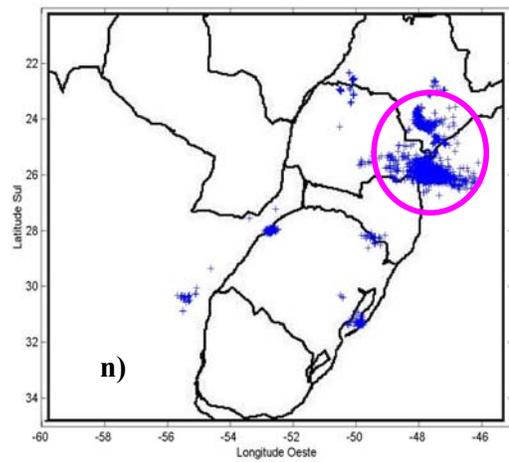
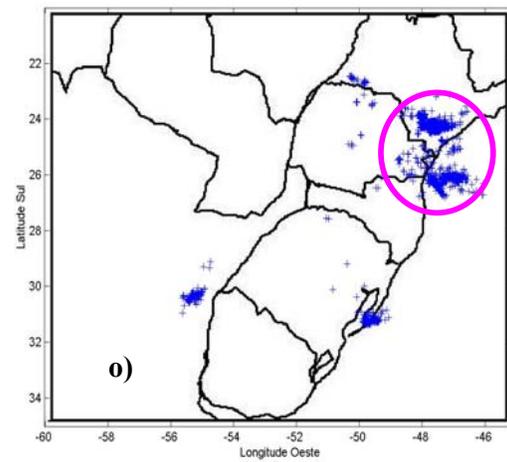


FIGURA 31 – Continuação.

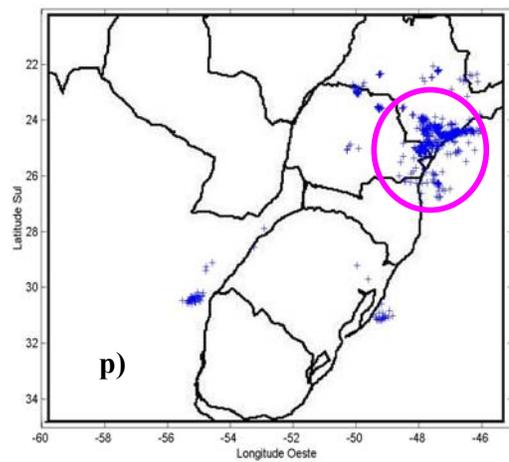
14/03/2002 às 02HL Total de DEA=4522



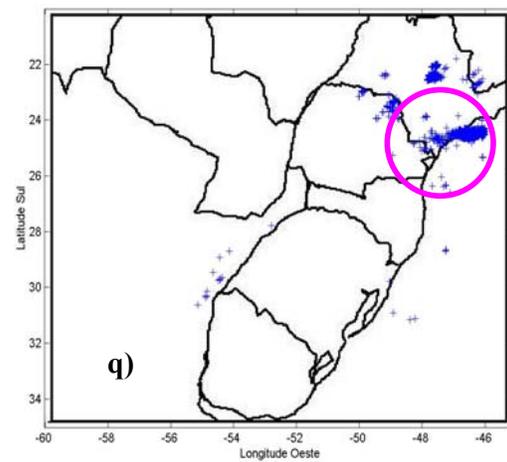
14/03/2002 às 03HL Total de DEA=2348



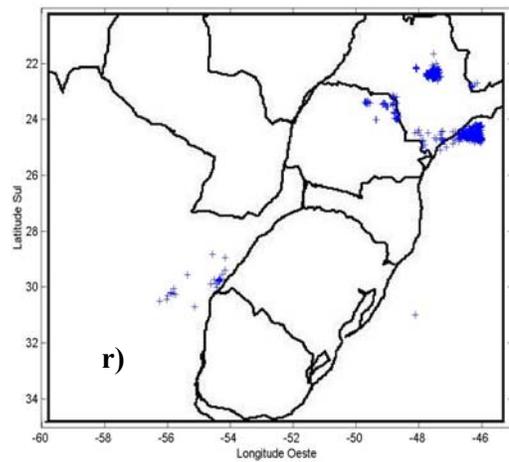
14/03/2002 às 04HL Total de DEA=758



14/03/2002 às 05HL Total de DEA=2507



14/03/2002 às 06HL Total de DEA=1125



14/03/2002 às 07HL Total de DEA=452

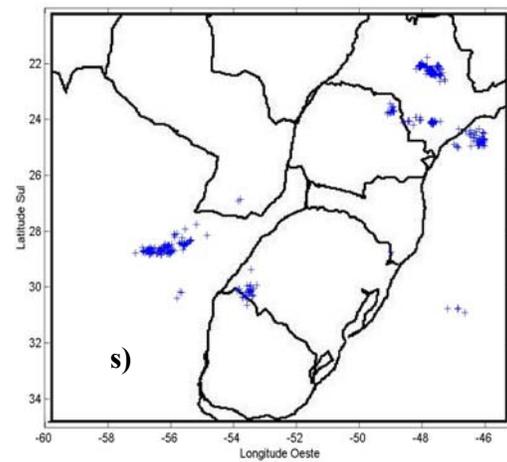


FIGURA 31 – Continuação.

4.2.1.3. Modelo de Mesoescala MM5

Conforme dito anteriormente (página 40), os campos do modelo MM5 serão apresentados nos períodos: de início, intermediário e de maturação do SCM. No caso que será apresentado abaixo, estes horários correspondem às 15HL (início), 19HL (intermediário) e 23HL (maturação). A ocorrência deste SCM foi provocada pela circulação de brisa marítima.

As variáveis vento horizontal, temperatura do ar e razão de mistura apresentadas na Figura 32 correspondem ao nível da superfície, para às 15HL do dia 13/03/2002.

Próximo a este horário, conforme se pode observar na imagem de satélite (Figura 30b), o SCM encontra-se em fase de formação no leste do Estado de Santa Catarina.

Ao analisar a Figura 32a, notam-se ventos de forte intensidade (superiores a 12m/s) associados a Alta Subtropical do Oceano Atlântico, mas que possivelmente não influenciou na ocorrência deste SCM, pois encontra-se bastante afastada do local de origem do SCM. O posicionamento dos sistemas de alta pressão é determinante no desenvolvimento da circulação de brisa e na sua propagação (Freitas e Silva Dias, 2004). Também observa-se um escoamento de noroeste, oriundo da Bolívia, passando pelo Paraguai em direção ao sul do Brasil, com velocidades de 6m/s. Este escoamento converge com o ar proveniente do Oceano, onde já está configurada a existência de brisa marítima. Devido ao comportamento do vento citado acima ocorre, na área em que o sistema está situado, a convergência do vento e, portanto, as condições são adequadas para haver movimento ascendente. Esta convergência do vento e a configuração da brisa marítima são vistas mais detalhadamente no domínio 2 (Figura 32b). Assim, no litoral Catarinense, percebe-se uma convergência pronunciada formada pelos ventos de oeste (valores de aproximadamente 6m/s) com ventos de leste, provenientes do Oceano que entram no continente. Os maiores valores (8m/s) se encontram na área onde o SCM irá se desenvolver. No litoral Paulista também percebe-se a presença de brisa marítima, porém a direção do vento é leste/sudeste, com valores de até 6m/s. Além dessas condições de vento, têm-se valores elevados de temperatura, de até 32°C no litoral Catarinense (Figura 32c). Com detalhes (Figura 32d) observa-se que, no litoral Catarinense, Paranaense e Paulista, existem valores de temperatura do ar superiores a 31°C, enquanto que sobre o Oceano a temperatura do ar, em sua maior área, oscila entre 25 e 27°C. Esta situação mostra um gradiente de temperatura acentuado entre o continente e o Oceano, causado pelo aquecimento diferencial entre as superfícies. Tal

situação é necessária para a existência da circulação de mesoescala do tipo brisa marítima. Ainda, para este caso, acrescenta-se umidade (Figura 32e), que também apresenta um gradiente intenso, perpendicularmente à costa de Santa Catarina. Valores menores que 14g/kg de umidade estão presentes em todo o Estado de Santa Catarina, enquanto que no Oceano Atlântico a quantidade de umidade supera 22g/kg. Nota-se um núcleo na região litorânea, desde Santa Catarina até o Rio de Janeiro, com valores de 20 a 22g/kg. Nenhum dos outros dois SCM analisados neste trabalho apresentaram valores tão elevados de razão de mistura próximos da costa. Este núcleo se fará presente durante todo o período de análise. Assim, neste momento, o ambiente está mostrando condições atmosféricas favoráveis a maior atividade convectiva e, então para o desenvolvimento do SCM em questão.

Ainda, os mesmos campos meteorológicos citados anteriormente, porém para o horário das 19HL do dia 13/03/2002 são ilustrados na Figura 33.

Este horário (19HL) é representativo do período intermediário entre as fases de formação e de maturação do SCM, que está ocorrendo na divisa litorânea de Santa Catarina, com sua maior área sobre o Oceano Atlântico (Figura 30g).

Na Figura 33a observa-se que o escoamento do ar sobre o Paraguai sofreu uma rotação e se dirige para a Argentina. A circulação de brisa marítima se desintensifica, seguindo o ciclo diurno de temperatura. São observados ventos no Oceano que sopram quase que paralelamente à costa, desde o litoral Paulista, indo em direção sul. Ao sul do Rio Grande do Sul, este escoamento se une à circulação da Alta Subtropical. Estes ventos marítimos, mais fortes neste horário, continuam invadindo o litoral do Estado de Santa Catarina (Figura 33b), embora com menos organização, possibilitando ainda a ascensão do ar. A Figura 33b mostra a ocorrência de ventos com direções e velocidades variáveis em Santa Catarina e no limite com o Paraná (localização do SCM), com ventos entre 2 e 6m/s. Nas Figuras 33c e 33d, ainda pode ser observado um gradiente de temperatura entre o continente e o Oceano Atlântico, apesar de menos intenso, em relação ao horário anterior. Na maior parte destes dois Estados já predominam temperaturas menores, obedecendo ao ciclo diurno. A umidade (Figura 33e) para este horário, que antecede a fase de amadurecimento do sistema, ainda é elevada no litoral sudeste e sul do Brasil, com valores superiores a 22g/kg. Os maiores valores estão localizados no Oceano, envolvendo a região onde este SCM está se desenvolvendo. Portanto, as condições atmosféricas seguem favoráveis a fim de que o sistema alcance seu estado de severidade máxima.

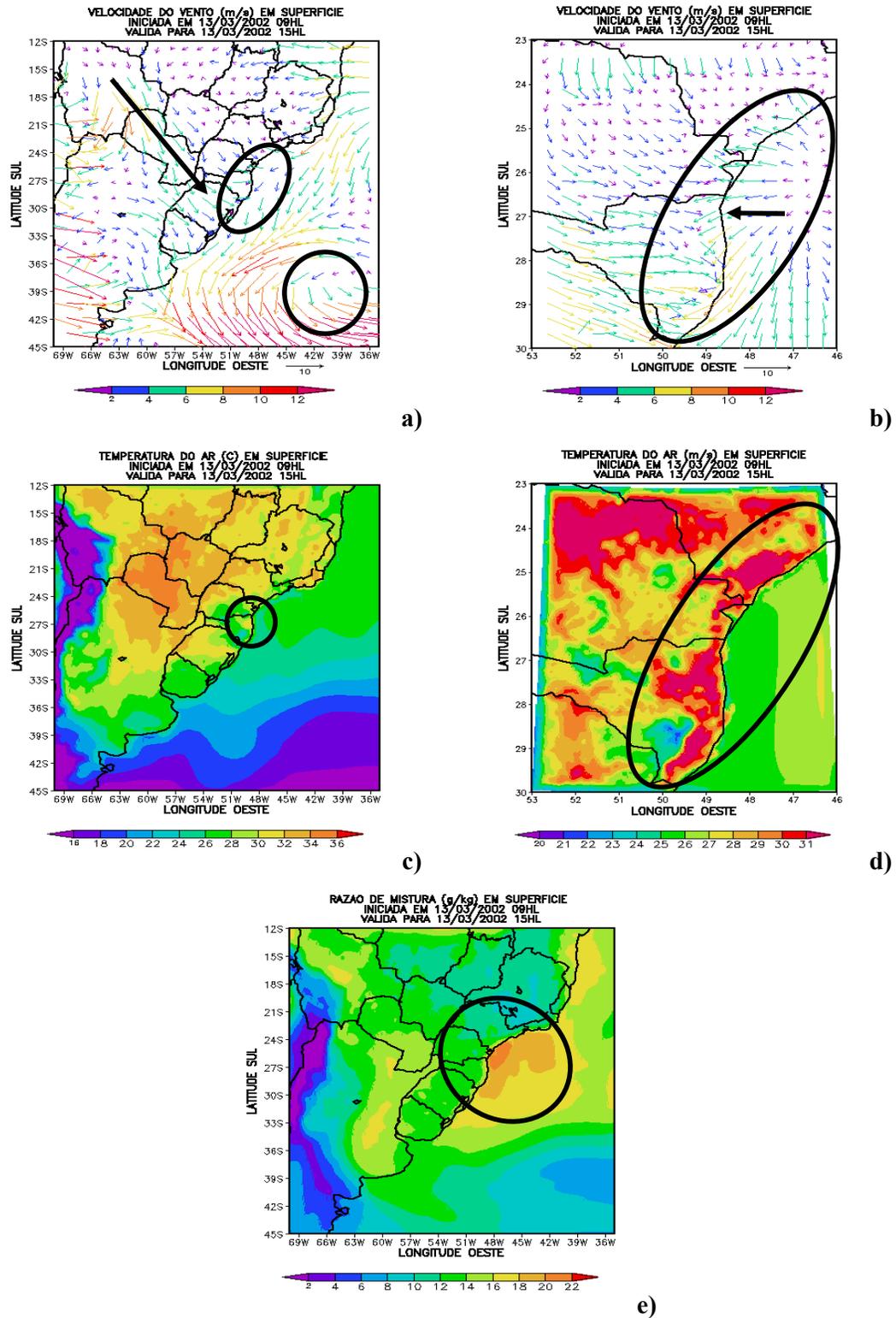


FIGURA 32 – a) Vento horizontal (domínio 1), b) Vento horizontal (domínio 2), c) Temperatura do ar (domínio 1), d) Temperatura do ar (domínio 2) e e) Razão de mistura (domínio 1) em superfície, com previsão de 06 horas válida para às 15HL do dia 13/03/2002.

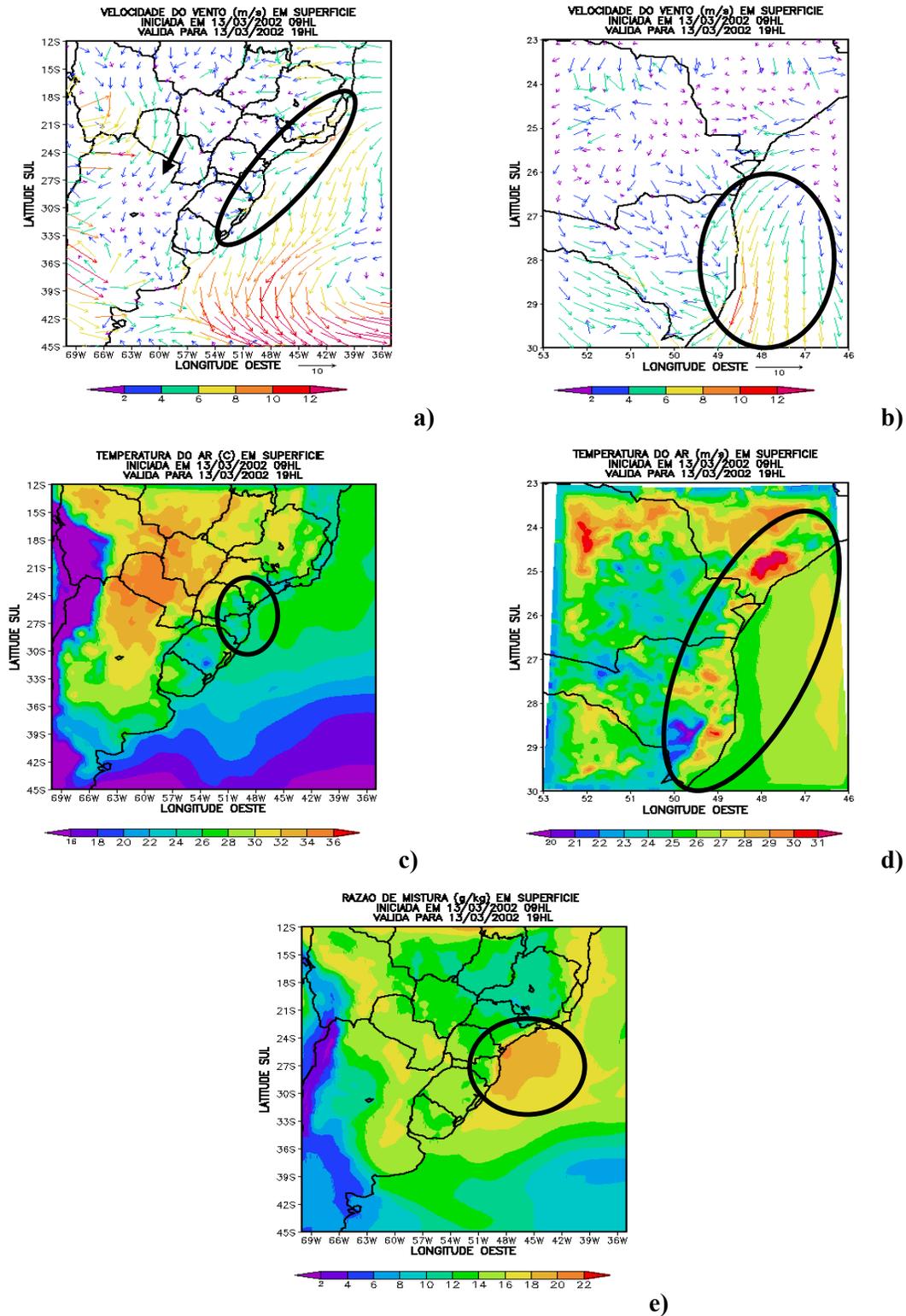


FIGURA 33 – a) Vento horizontal (domínio 1), b) Vento horizontal (domínio 2), c) Temperatura do ar (domínio 1), d) Temperatura do ar (domínio 2) e e) Razão de mistura (domínio 1) em superfície, com previsão de 10 horas válida para às 19HL do dia 13/03/2002.

Dando continuidade às análises dos campos meteorológicos, a Figura 34 expõe as seguintes variáveis: vento horizontal, temperatura do ar e razão de mistura. Todas relativas à superfície, para o horário das 23HL em 13/03/2002.

O horário em análise diz respeito à fase de maturação deste SCM que se encontra, neste horário principalmente no litoral do Paraná, conforme observado na imagem de satélite (Figura 30j).

É observado na Figura 34a que o centro da Alta Subtropical está bem distante do continente, sobre o Oceano Atlântico. Ao comparar-se este horário com os horários das fases de formação e intermediária do SCM, o escoamento do ar sobre o Paraguai está melhor organizado (ventos de nordeste) e com velocidades do vento horizontal quase que inalteradas. É visível a existência da brisa terrestre desde o litoral Catarinense até o Paulista. No campo de vento no domínio menor (Figura 34b) visualiza-se com mais detalhes a existência da brisa terrestre nesta faixa litorânea, com ventos indo em direção ao Oceano Atlântico. Esta circulação de mesoescala ocorre à noite, concordante com o horário de análise. No campo de temperatura do ar, mostrado na Figura 34c, os valores são menores em quase toda a área continental, analisando a região em que este SCM ocorreu, observa-se a inversão do sentido do gradiente horizontal de temperatura, porque os valores maiores estão agora sobre o Oceano (Figura 34d). Assim, no período noturno ocorre uma situação inversa àquela observada no período diurno, porque o Oceano tem maior capacidade calorífica que o continente. Assim, o Oceano se aquece mais lentamente que o continente mas, também, se resfria mais lentamente. O núcleo de umidade com valores de até 22g/kg (Figura 34d) sempre presente no Oceano e próximo ao litoral sul e sudeste, agora ocupa uma área bem maior do que nos horários anteriores. Neste caso, de SCM formado pela brisa marítima, os altos valores de umidade sobre o Oceano tiveram grande influência, pois os valores na região em que o SCM se desenvolveu não foram muito elevados, ao contrário, permaneceram entre 14 e 16g/kg desde a formação até a maturação do sistema.

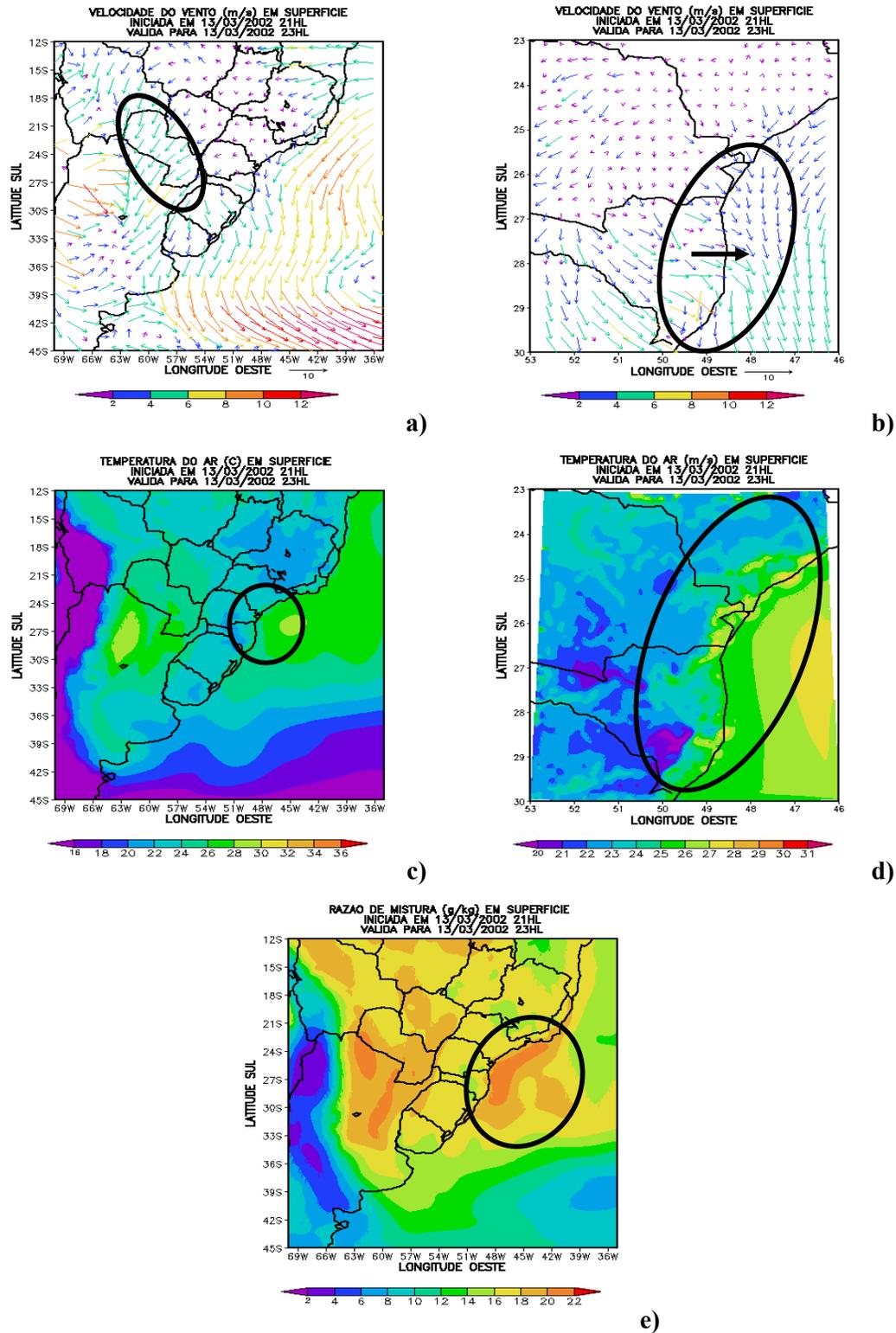


FIGURA 34 – a) Vento horizontal (domínio 1), b) Vento horizontal (domínio 2), c) Temperatura do ar (domínio 1), d) Temperatura do ar (domínio 2) e e) Razão de mistura (domínio 1) em superfície, com previsão de 02 horas válida para às 23HL do dia 13/03/2002.

No nível de 850hPa, são mostrados na Figura 35 os campos de vento horizontal referentes ao dia 13/03/2002, para os horários de formação (15HL), intermediário (19HL) e de maturação (23HL) deste SCM.

A Figura 35a mostra a existência de um intenso cisalhamento vertical do vento, pois a comparação deste campo com o de superfície (Figura 32a, página 60) mostra direção do vento inalterada, mas intensificação das velocidades com a altura. Na superfície, os ventos eram de 6m/s e agora passaram para 10m/s, no nível de 850hPa. Um aspecto interessante a ressaltar no campo de vento neste nível é o fato de, na fase de maturação, haver um máximo de vento próximo à localização deste SCM (no litoral norte do Estado do Rio Grande do Sul). Na Figura 35b percebe-se que os ventos provenientes da região equatorial estão se intensificando e apresentam duas direções: centro da Argentina e sul do Brasil. A maturidade do SCM é caracterizada pelo escoamento de noroeste, oriundos da região tropical, com velocidades maiores (15m/s), como mostra a Figura 35c.

Finalmente, o nível de 200hPa será avaliado. Os campos de vento horizontal do dia 13/03/2002 são ilustrados na Figura 36, para os horários de formação, intermediário e de maturação.

Observa-se nos três horários, que o escoamento do ar sobre a Argentina se fragmenta em duas partes: uma segue trajetória sul, com velocidades elevadas e a outra sofre um giro anticiclônico e segue em direção à Alta da Bolívia. Nos horários das 15 e 19HL (Figuras 36a e 36b) este escoamento se funde com a Alta da Bolívia que tem, neste mês, seu centro deslocado da posição climatológica (círculo preenchido na cor preta), para sua posição em março/2002 (círculo preenchido na cor magenta), conforme Climanálise (2002). Às 23HL (Figura 36c) já se configura uma circulação anticiclônica alongada fechada, bem definida, desde a faixa costeira dos Estados de Santa Catarina, Paraná e indo até a Bolívia. A parte do escoamento que segue para o sul, citado anteriormente, tem um aspecto quase que zonal e nele está localizada a corrente de altos níveis, ao sul de 39°S, com velocidades da ordem de 50m/s.

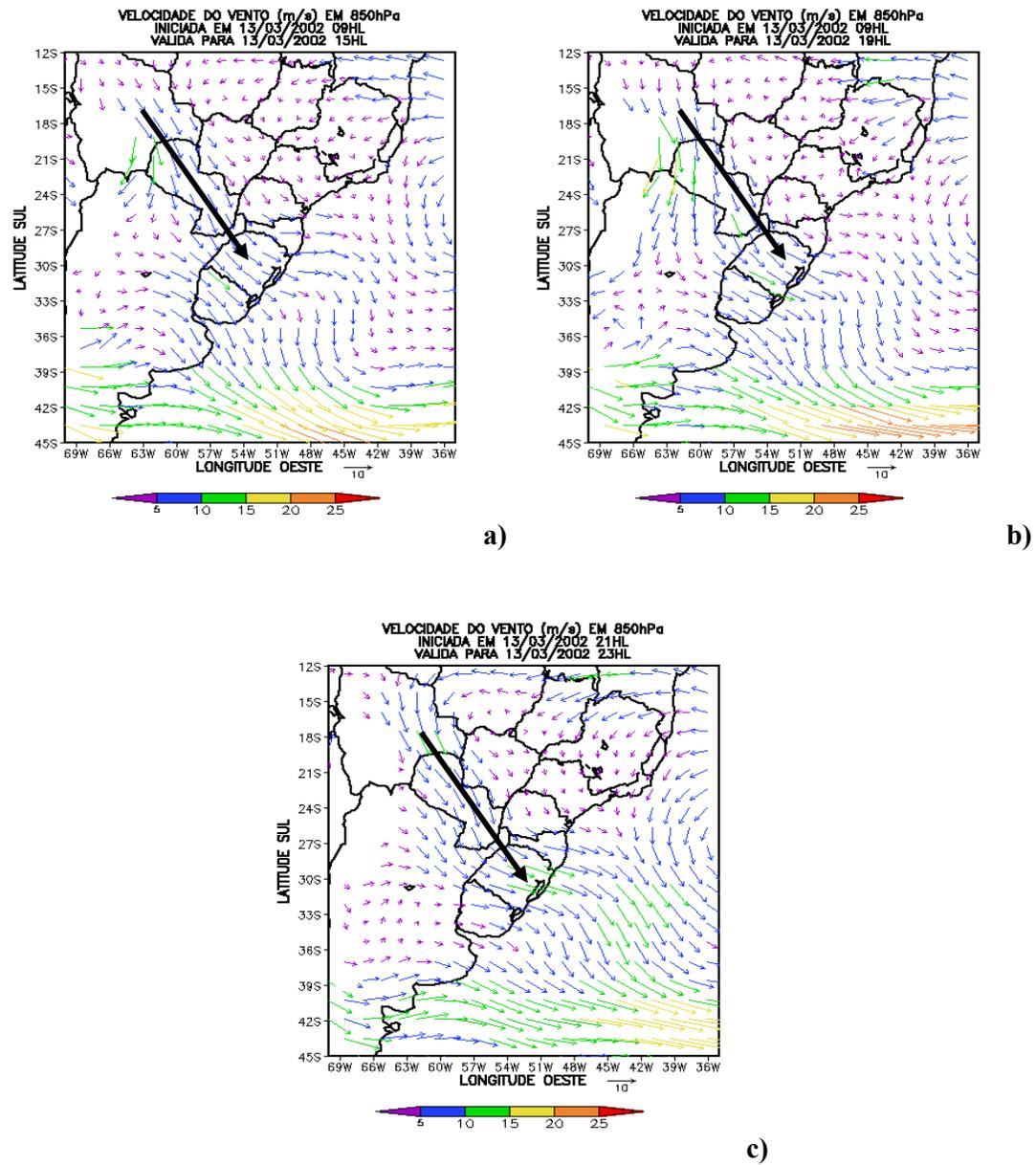


FIGURA 35 – Vento horizontal (domínio 1), para os três períodos de análise referente ao dia 13/03/2002 no nível de pressão 850hPa.

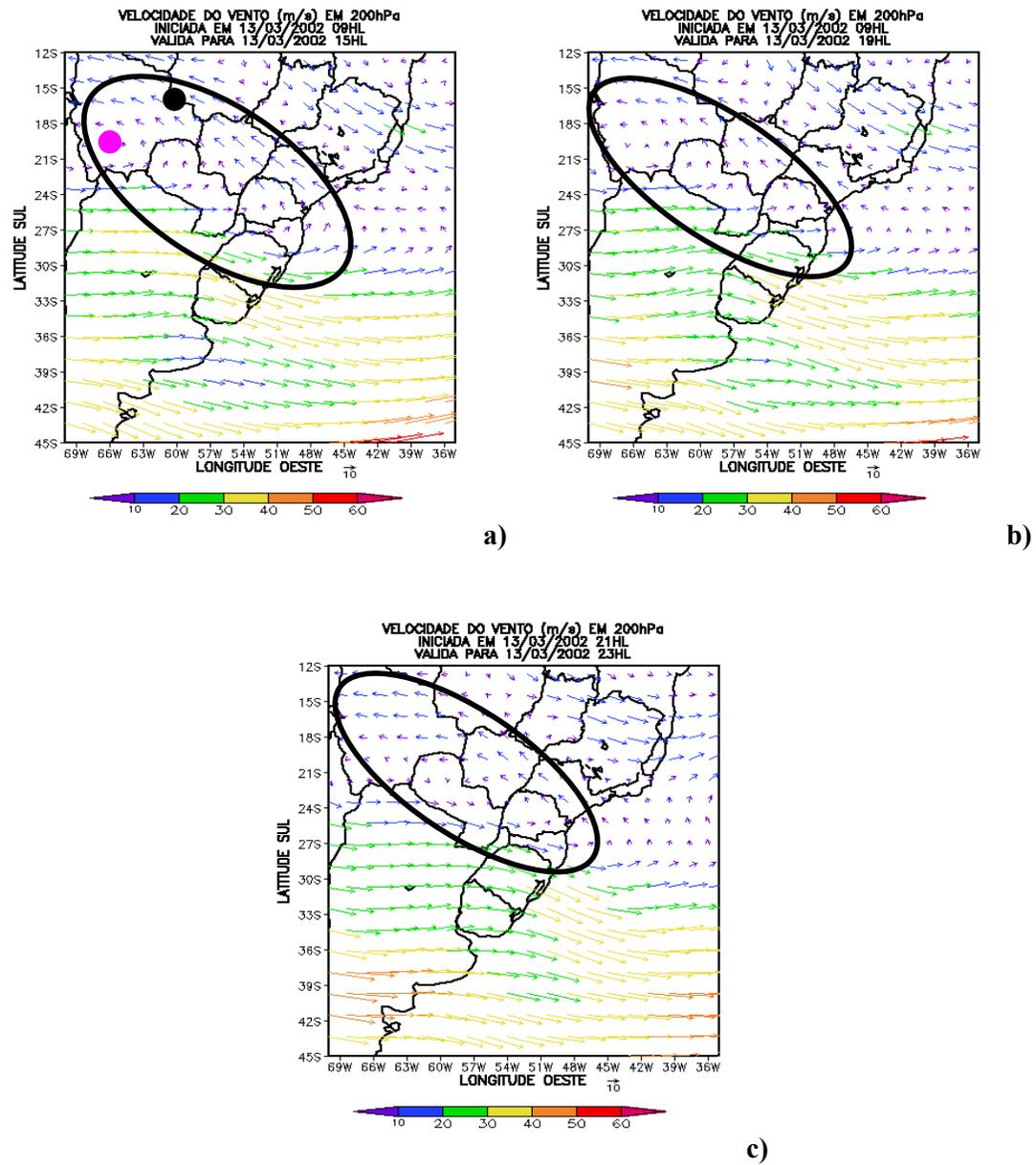


FIGURA 36 – Vento horizontal (domínio 1), para os três períodos de análise referente ao dia 13/03/2002 no nível de pressão 200hPa.

4.2.2. Caso: 22-23 de dezembro de 2003

A ocorrência deste SCM esteve associada com a passagem de um sistema frontal.

4.2.2.1. Interpretação das Imagens de Satélite

A seguir descreve-se a Figura 37, a qual mostra a seqüência de fragmentos das imagens de satélite relativas ao ciclo de vida do SCM em análise.

As Figuras 37a e 37b mostram a nebulosidade no sul da América do Sul antes da formação do SCM que será descrito neste item, com o objetivo de deixar evidenciadas as diferenças significativas das condições meteorológicas associadas a este caso. Observa-se na Figura 37a um sistema frontal bem definido, com áreas mais instáveis localizadas na extremidade da frente fria. Estas áreas se desprendem da frente fria (Figura 37b) e continuam a se desenvolver no leste da Argentina, Uruguai e extremo sul do Brasil. É neste horário que o SCM deste caso se forma. Ressalta-se que estas duas Figuras estão em escala diferente das seguintes.

Fase de formação

Este SCM (indicado pelo círculo, na Figura 37c) se forma dentro de uma extensa área estratiforme, que se estende desde o norte/nordeste da Argentina, sul do Paraguai, sul do Brasil, Uruguai até o Oceano Atlântico às 1139HL do dia 22/12/2003. Às 1239HL (Figura 37d), o SCM já havia se intensificado, com a presença de um núcleo convectivo bem forte (temperatura do topo da nuvem de -70°C), ainda no nordeste da Argentina. Na Figura 37e, no dia 22/12/2003 às 1339HL, vê-se que o SCM continua se intensificando e seu núcleo convectivo adentra os Estados de Santa Catarina e Paraná. Depois de uma hora, às 1439HL do dia 22/12/2003 Figura 37f, a área convectiva associada ao SCM apresenta uma estrutura maior com dois núcleos intensos. O sistema encontra-se em grande atividade convectiva e praticamente duplica o seu tamanho, ocupando o oeste de Santa Catarina e parte do oeste do Paraná. Neste momento, o SCM está suficientemente intenso, entrando na sua fase de maturação, que será explicada a seguir.

Fase de maturação

Na tarde do dia 22/12/2003, às 1639HL (Figura 37g), o SCM alcança seu estado de maturação, pois as temperaturas dos topos das nuvens atingem os valores mais negativos. O SCM abrange completamente o Paraná, com seu núcleo convectivo situado no centro do Estado. Às 1709 (Figura 37h) o SCM encontra-se com área maior, porém com atividade convectiva menor. A partir de então, as partes internas mais ativas do SCM se fragmentam em núcleos (Figuras 37i e 37j). Com isto, a área total do SCM aumenta, mas sua intensidade começa a diminuir. Na seqüência, será abordada a fase de dissipação do SCM.

Fase de dissipação

O SCM entra na sua fase de dissipação (Figura 37l), pois seus núcleos convectivos começam a diminuir tanto em intensidade quanto em tamanho. No final do dia 22/12/2003, às 2309HL (Figura 37m), o SCM deixa o Paraná, que agora está com pouca nebulosidade estratiforme e avança para o Estado de São Paulo. Este SCM teve um tempo de vida total de aproximadamente 12 horas.

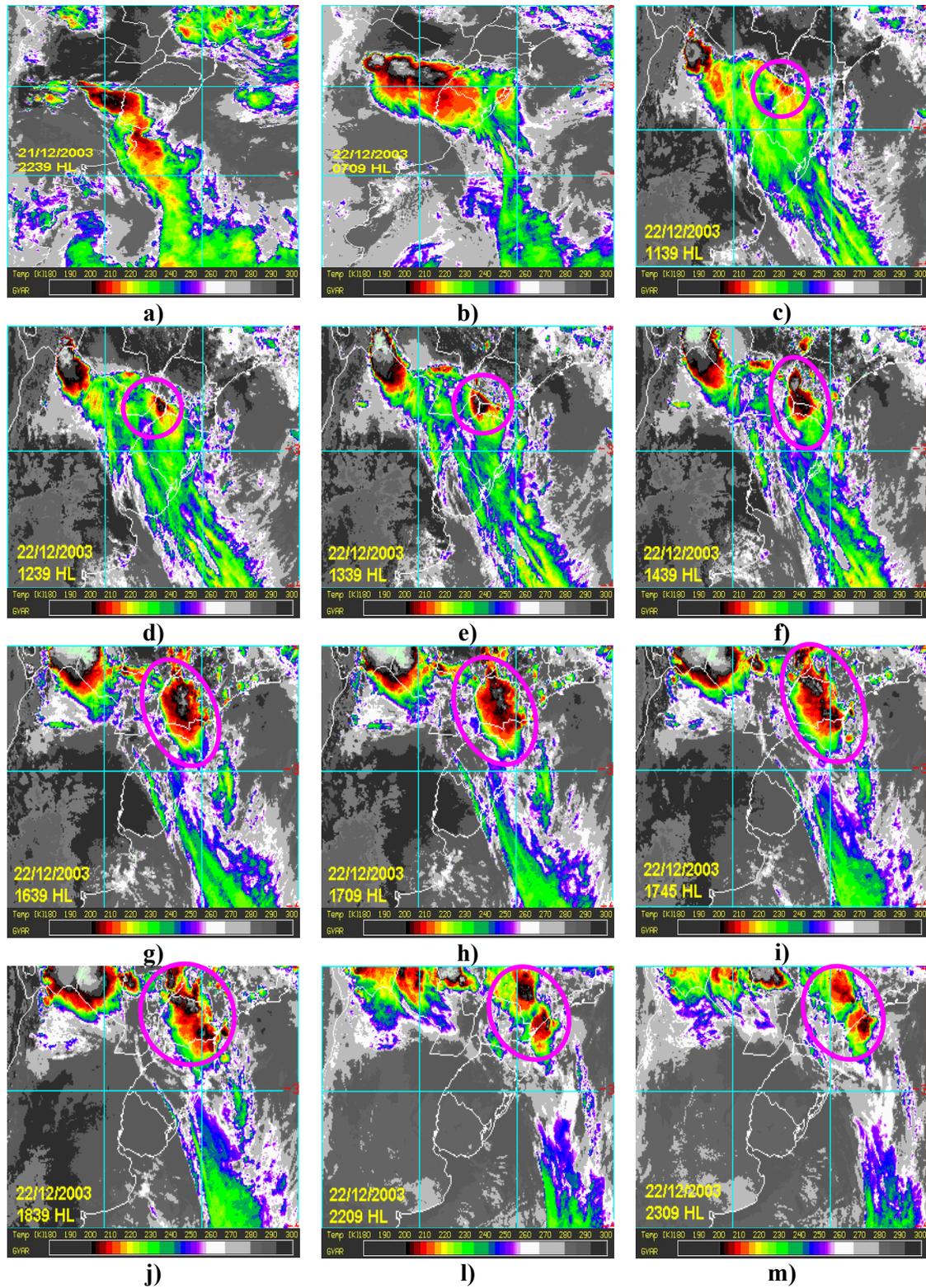
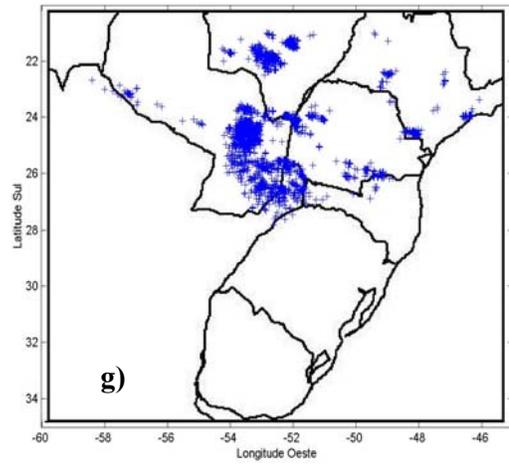


FIGURA 37 – Sequência de fragmentos das imagens do satélite geostacionário GOES-12, no canal infravermelho, referente ao caso 22-23 de dezembro de 2003.

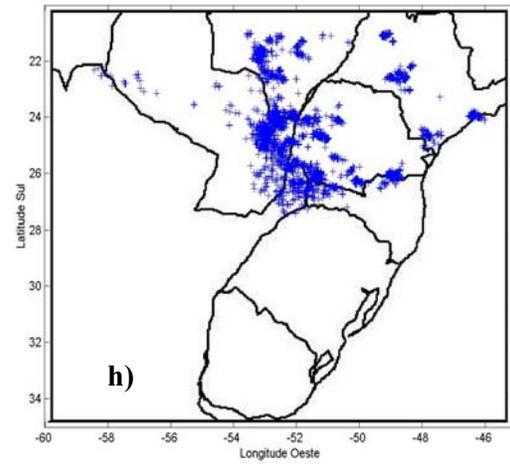
4.2.2.2. Distribuição Espacial das Descargas Elétricas Atmosféricas

Na Figura 38 é mostrada a distribuição espacial das DEA para o caso ocorrido nos dias 22-23 de dezembro de 2003. Este é outro caso que apresentou sua fase de maturação sobre o Estado do Paraná mas que, analogamente ao observado no caso anterior, não foi possível relacionar o ciclo de vida do SCM com a intensidade da atividade elétrica associada ao mesmo. Nos horários de 11HL até 15HL (Figura 38a até 38e) percebe-se um aglomerado de DEA localizado no nordeste da Argentina e adentrando no Paraguai. Entretanto, em nenhum destes horários é possível relacionar a evolução do SCM com a incidência das DEA. Ao visualizar-se a Figura 38f nota-se também discordância, pois as DEA estão localizadas sobre o sul do Paraguai, sendo que o SCM em estudo se formou na divisa oeste dos Estados de Santa Catarina e Paraná. No horário de máxima atividade convectiva do sistema, às 1639HL em 22/12/2003 (Figura 37g), o SCM cobre inteiramente o Estado do Paraná. No entanto, ao verificar-se a distribuição espacial das DEA vê-se incoerência novamente, pois a localização do aglomerado de DEA encontra-se no sul do Paraguai indicando uma defasagem espacial importante. As DEA ainda estão se deslocando para o Paraná (Figuras 38g, 38h e 38i), enquanto que o SCM já adentrou o Paraná há horas. Somente às 20HL em 22/12/2003 (Figura 38j) estas englobam integralmente o Estado mas, para este horário, a parte ativa do SCM já se encontra na fronteira do Paraná com São Paulo. É interessante notar que as Figuras 38l, 38m e 38n mostram a localização das DEA ainda sobre o Paraná, enquanto que na imagem de satélite percebe-se que o SCM já deixou o Paraná e agora se concentra em São Paulo. As DEA adentram, completamente, em São Paulo às 00HL do dia 23/12/2003 (Figura 38o), quando o SCM já fez a sua incursão no Estado há horas atrás. Das Figuras 38p à 38s, a distribuição espacial das DEA até consegue mostrar a fase dissipativa do sistema, entretanto com defasagem espacial, como aconteceu durante todo o ciclo de vida do SCM.

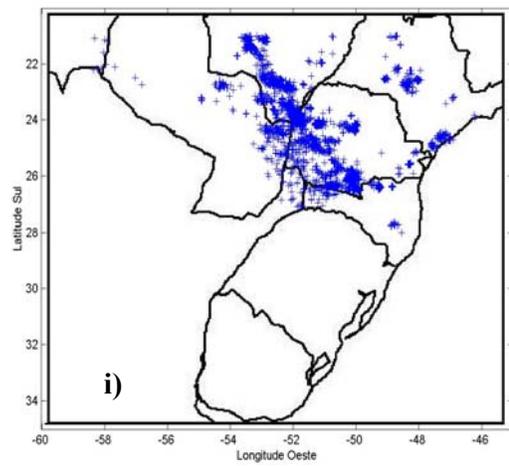
22/12/2003 às 17HL Total de DEA=3534



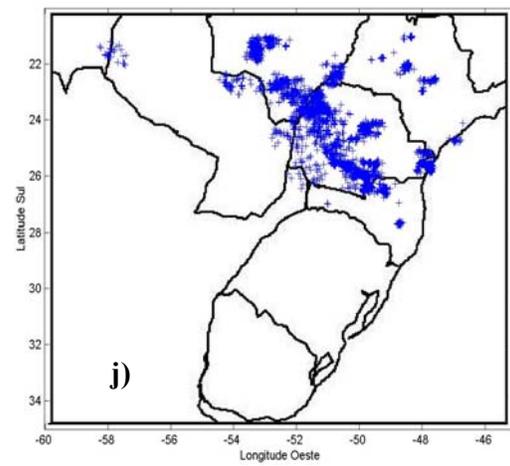
22/12/2003 às 18HL Total de DEA=3688



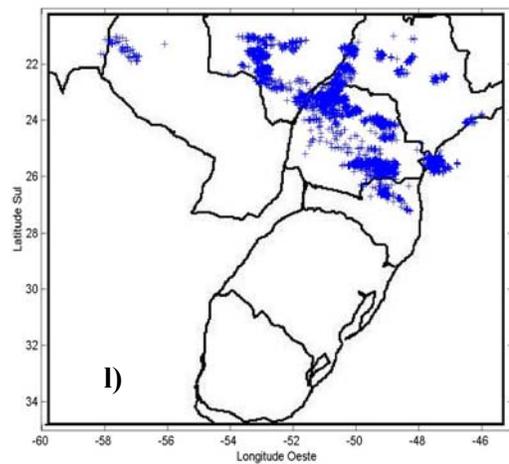
22/12/2003 às 19HL Total de DEA=3791



22/12/2003 às 20HL Total de DEA=4655



22/12/2003 às 21HL Total de DEA=5998



22/12/2003 às 22HL Total de DEA=5211

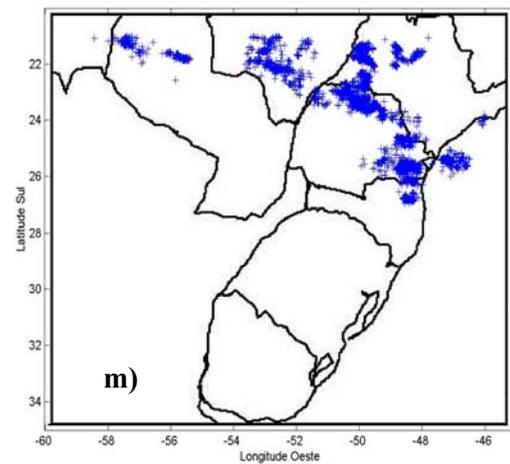
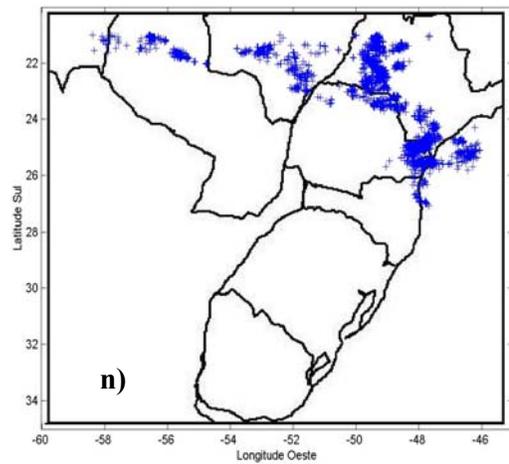
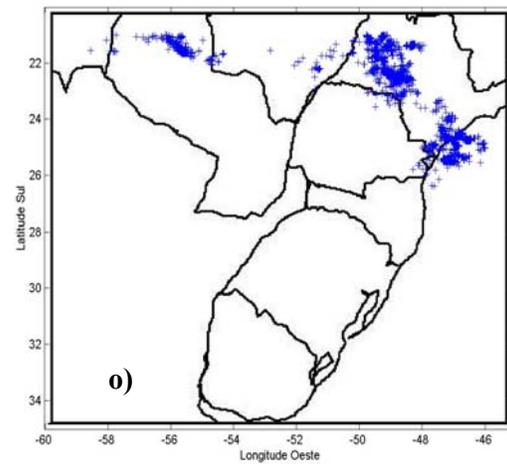


FIGURA 38 – Continuação.

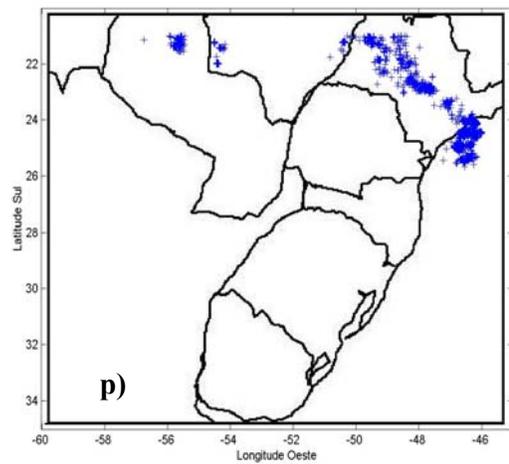
22/12/2003 às 23HL Total de DEA=3957



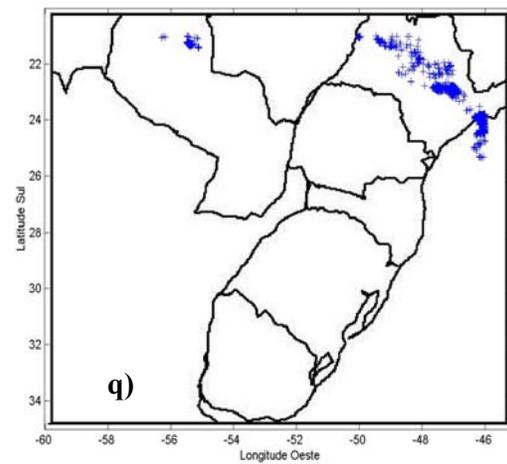
23/12/2003 às 00HL Total de DEA=2285



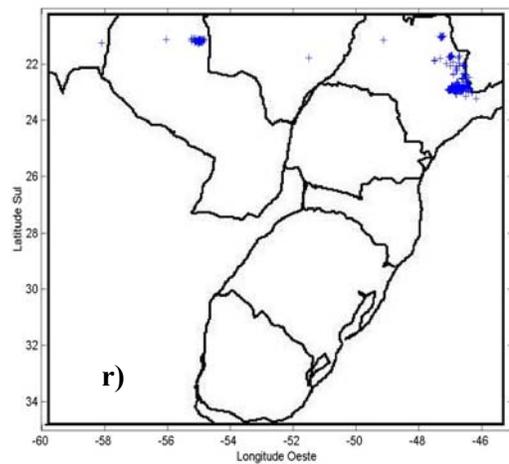
23/12/2003 às 01HL Total de DEA=1898



23/12/2003 às 02HL Total de DEA=1298



23/12/2003 às 03HL Total de DEA=458



23/12/2003 às 04HL Total de DEA=150

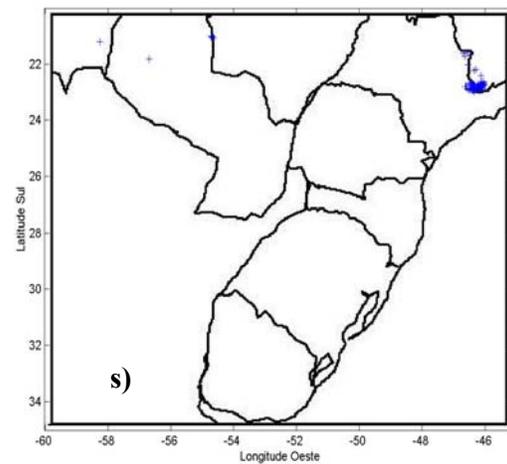


FIGURA 38 – Continuação.

4.2.2.3. Modelo de Mesoescala MM5

Como anteriormente mostrado na análise das imagens de satélite, este SCM se formou dentro de uma área muito instável que esteve ligada à extremidade de uma frente fria.

Analogamente ao caso anterior, serão mostrados os campos relativos aos períodos de formação, intermediário e maturação deste SCM, cujos horários são: 12HL, 14HL e 16HL, respectivamente.

Na Figura 39 podem ser vistos o vento horizontal, temperatura do ar e razão de mistura em superfície para às 12HL do dia 22/12/2003. Nesta fase o SCM está se formando, já com núcleo convectivo localizado na fronteira entre a Argentina e o Estado de Santa Catarina (Figura 37d).

Averiguando o campo de vento mostrado na Figura 39a, observa-se um escoamento de noroeste desde a Bolívia até o sul do Brasil, com velocidades fortes de até 12m/s, que diminui de intensidade à medida que se aproxima do sul do Brasil. No lado esquerdo da Figura observa-se a circulação anticiclônica do sistema de alta pressão que sucede a passagem do sistema frontal em superfície. Em consequência, ocorre maior quantidade de nuvens estratiformes nesta área. No sul do Paraguai pode-se perceber convergência entre os ventos de sudoeste/sul do anticiclone pós-frontal com os ventos de noroeste do escoamento de origem tropical. A extremidade do sistema frontal está, agora, no Oceano. A Figura 39b, que tem maior resolução espacial, fornece mais detalhes a respeito do vento horizontal. Nota-se nitidamente que na área de localização do SCM há convergência dos ventos das circulações mencionadas acima: de noroeste (9m/s) com os de sudoeste/sul (12m/s). O encontro destas massas de ar de origens diferentes gera uma área de instabilidade muito grande. Na região de localização do SCM (Figura 39c e 39d) é visível o gradiente de temperatura muito intenso. Em relação ao campo de umidade, o local em que se encontra o SCM (Figura 39e), apresenta valores elevados ($> 16\text{g/kg}$) e observa-se uma divisão no campo de razão de mistura, salientada pela reta, com valores de razão de mistura muito baixos ($< 8\text{g/kg}$) associados com a circulação anticiclônica, e elevados ($> 14\text{g/kg}$), em associação ao escoamento tropical. Assim, o ambiente que envolve o SCM está propício para que haja aumento na sua atividade convectiva.

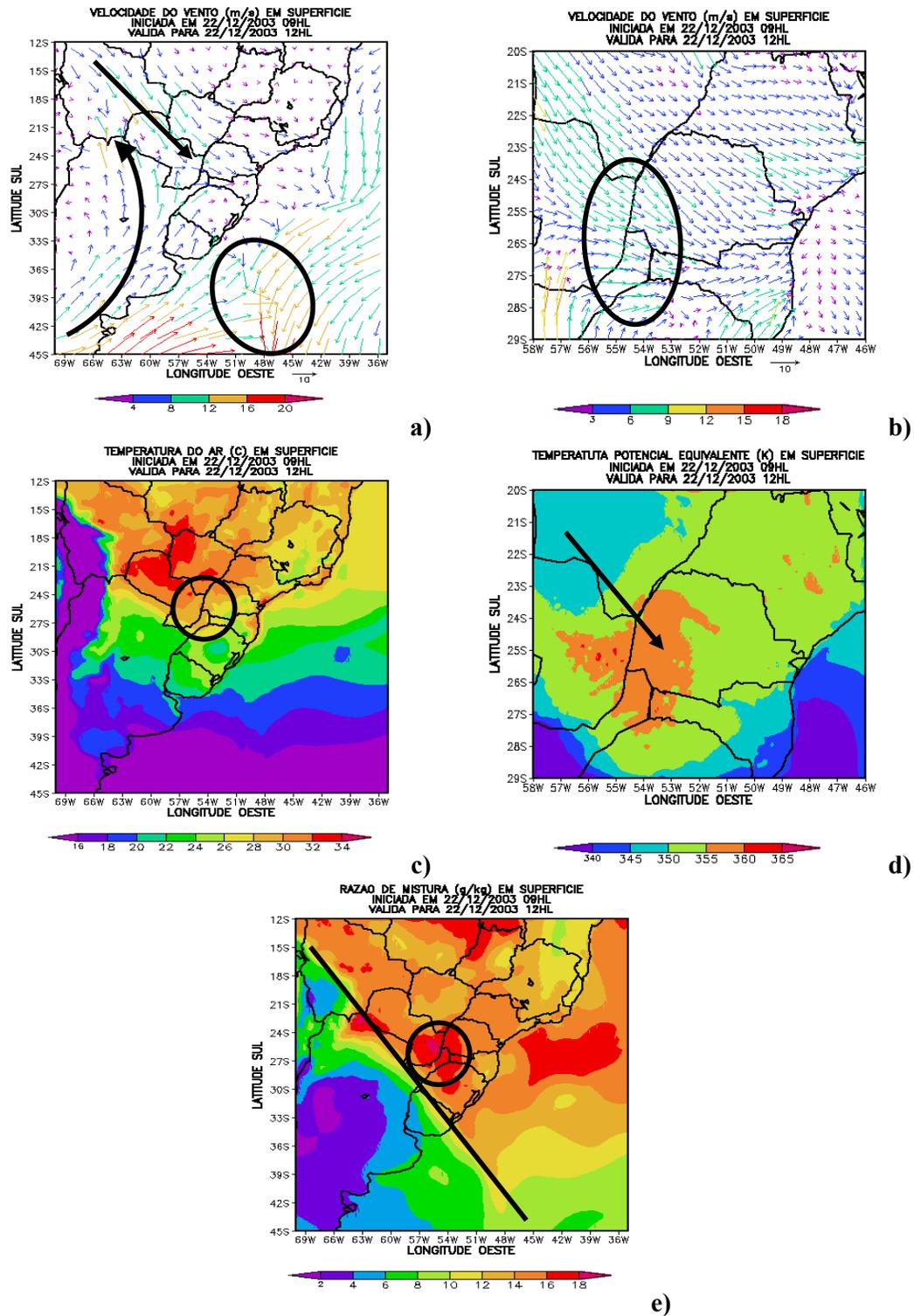


FIGURA 39 – a) Vento horizontal (domínio 1), b) Vento horizontal (domínio 3), c) Temperatura do ar (domínio 1), d) Temperatura potencial equivalente (domínio 3) e e) Razão de mistura (domínio 1) em superfície, com previsão de 03 horas válida para às 12HL do dia 22/12/2003.

A Figura 40 apresenta o vento horizontal, temperatura do ar e razão de mistura, em superfície para às 14HL de 22/12/2003.

Nesta etapa, o SCM se encontra próximo de sua fase de maturação. Ocupa uma área maior com núcleo bastante ativo e atinge os lados oeste dos Estados de Santa Catarina e do Paraná (ver Figura 37f).

Na área de localização do SCM (marcado pelo círculo, na Figura 40a) existe o encontro dos escoamentos de noroeste tropical e de sudoeste (indicados pelas setas) associado à circulação anticiclônica pós-frontal. Tais escoamentos são caracterizados por velocidades mais elevadas sobre o continente, como se fossem “corredores” de ventos mais fortes. A extremidade do sistema frontal já se encontra mais afastada da costa, em relação ao horário anterior (Figura 39a).

Os campos apresentados na Figura 40b e 40c mostram, ainda, que no litoral Catarinense, existe a intrusão de ar do Oceano e um gradiente horizontal de temperatura apontado para o continente, caracterizando a circulação de brisa marítima. Então, por que não há formação de um SCM, como o descrito no caso do item anterior? Talvez a resposta esteja no campo de razão de mistura, que mostra valores inferiores a 16g/kg neste local (círculo menor, Figura 40e).

Em resolução maior (Figura 40b) na região de atuação deste SCM nota-se a convergência dos ventos tropical (de noroeste) e extratropical (de sul/sudoeste). É visível na Figura 40c que, na região onde este SCM está localizado (oeste de Santa Catarina e do Paraná), existem valores elevados de temperatura (de até 30°C) e a presença de um gradiente horizontal de temperatura, que é melhor visualizado na Figura 40d (indicado pela seta). O Estado do Paraná, o qual após algumas horas será ocupado pelo sistema na sua maior atividade convectiva, apresenta altas temperaturas que chegam até 32°C. Além disso, o modelo reproduziu uma área com núcleo de umidade, superior a 18g/kg, na região em que o SCM se encontra (círculo maior, Figura 40e). Assim, as condições descritas anteriormente serão fundamentais na continuação do desenvolvimento do SCM.

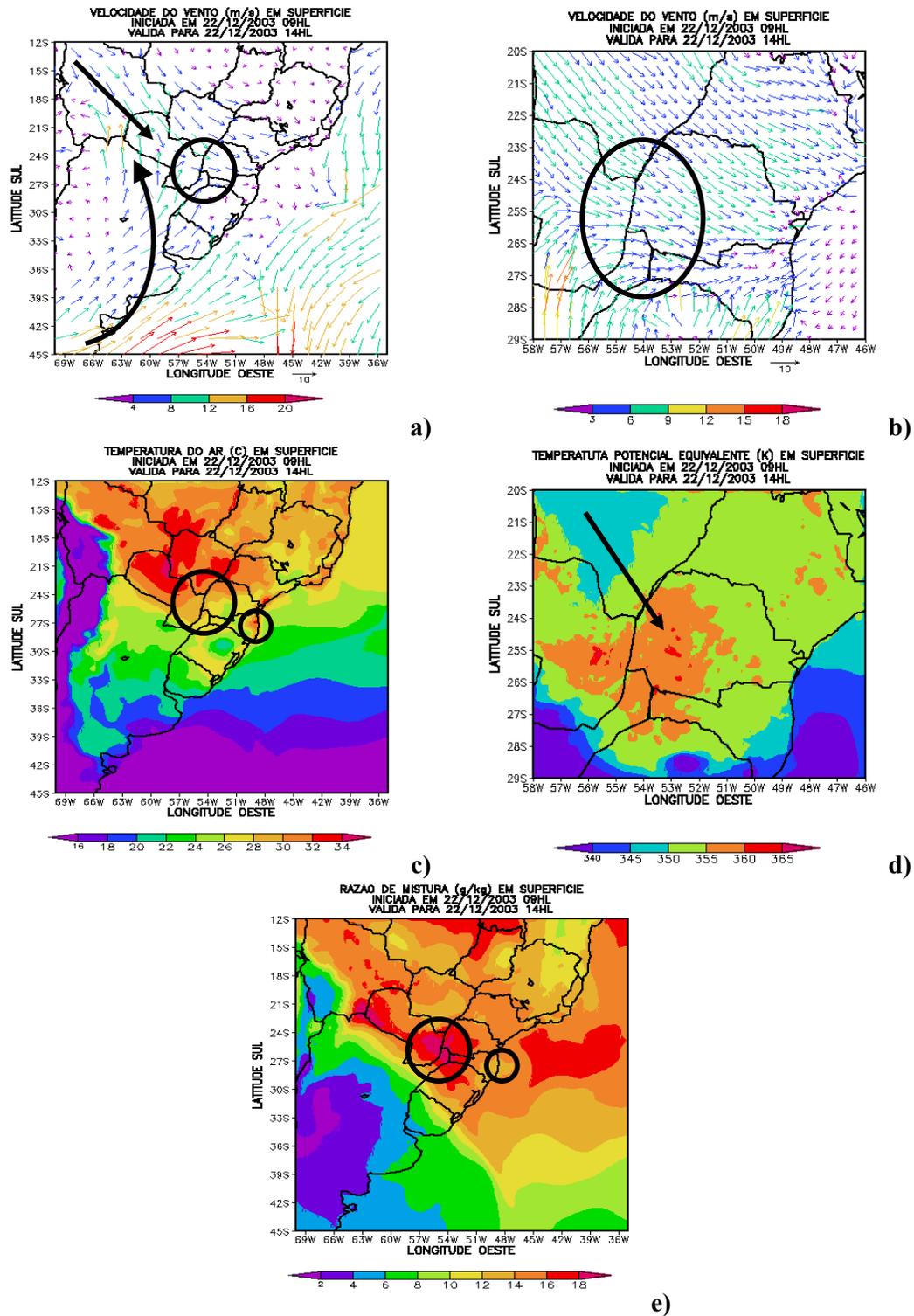


FIGURA 40 – a) Vento horizontal (domínio 1), b) Vento horizontal (domínio 3), c) Temperatura do ar (domínio 1), d) Temperatura potencial equivalente (domínio 3) e e) Razão de mistura (domínio 1) em superfície, com previsão de 05 horas válida para às 14HL do dia 22/12/2003.

Na Figura 41 verifica-se as variáveis: vento horizontal, temperatura do ar e razão de mistura, em superfície para às 16HL do dia 22/12/2003.

Na imagem de satélite às 1639HL o SCM esta em fase de maturação, abrangendo totalmente o Paraná, com núcleo convectivo bastante intenso.

Uma interessante questão observada são os ventos de noroeste (Figura 41a) oriundos da região tropical em direção ao Paraná e dos ventos associados à circulação anticiclônica sobre a Argentina, presentes desde o início das análises. Cada um destes escoamentos contribuiu para a intensificação deste SCM. O escoamento anticiclônico extratropical juntamente com o escoamento tropical agiram sobre o campo de temperatura, intensificando o gradiente horizontal de temperatura. O escoamento tropical foi determinante sobre os valores de umidade do ar na área em que este SCM ocorreu, com o transporte de ar úmido, dos trópicos para as latitudes médias. Para o campo de vento no domínio 3 (Figura 41b) observa-se a convergência dos ventos, favorecendo a evolução do SCM. Os valores de temperatura (Figura 41c) são bastante contrastantes, visto que na região do SCM as temperaturas variam entre 22 e 34°C. Esta situação mostra que na região em que o SCM atingiu o estágio de maturação houve intensificação do gradiente horizontal de temperatura (Figura 41d) e aumento de razão de mistura (Figura 41e), com valores superiores a 18g/kg sobre o Paraná no local onde estava o SCM. Comparando este campo desde o horário de formação do SCM, nota-se que seus valores de razão de mistura sempre aumentaram no local onde evoluiu este SCM. O agente responsável por este fato foi o escoamento de noroeste tropical presente desde o início das análises e que, por este motivo, ajudou a “acumular” valores de razão de mistura.

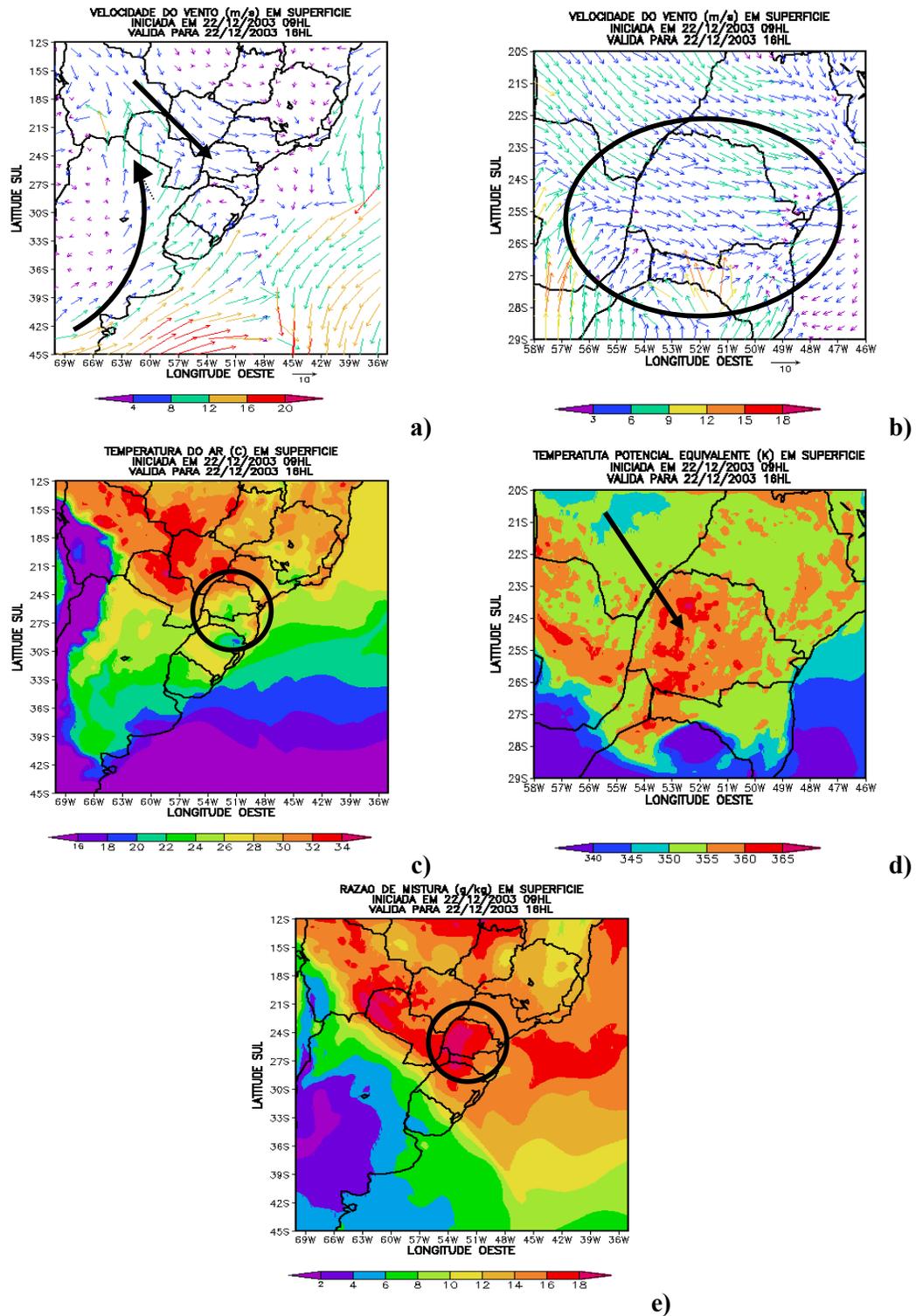


FIGURA 41 – a) Vento horizontal (domínio 1), b) Vento horizontal (domínio 3), c) Temperatura do ar (domínio 1), d) Temperatura potencial equivalente (domínio 3) e e) Razão de mistura (domínio 1) em superfície, com previsão de 07 horas válida para às 16HL do dia 22/12/2003.

Na Figura 42 apresenta-se exclusivamente o vento horizontal em 850hPa referente ao dia 22/12/2003, nos horários de formação (12HL), intermediário (14HL) e de maturação (18HL). Analisando as três Figuras em conjunto, percebem-se semelhanças entre a configuração de vento neste nível com o observado em superfície. Nitidamente, os ventos mantêm a direção, porém aumentam de intensidade, o que caracteriza uma situação de cisalhamento do vento, o que favorece a organização dos elementos convectivos do sistema (Houze, 1993). A corrente de ventos de noroeste, que transporta ar quente e úmido da região tropical para as latitudes médias, é um dos principais mecanismos fornecedores de energia para a formação do SCM de latitudes médias. Estes ventos de noroeste tropicais apresentavam valores predominantes de 10-15m/s em todas as fases, com picos de até 20m/s em algumas partes, especificamente na fase de formação.

As mudanças verificadas nos diferentes níveis até agora analisados, se completam com as observações a serem realizados para o SCM ocorrido no dia 22/12/2003, no nível de 200hPa (Figura 43). É verificada uma bifurcação do escoamento em altos níveis com um ramo para norte e outro para sul. O ramo norte, visível em torno de 25°S apresenta circulação anticiclônica, associado à Alta da Bolívia. O ramo sul, observado em torno de 33°S mostra uma curvatura horária, associado ao cavado de altos níveis vinculado ao sistema frontal em superfície. É marcante o jato pós-frontal em altos níveis, com altas velocidades ($> 60\text{m/s}$), extenso e praticamente imóvel.

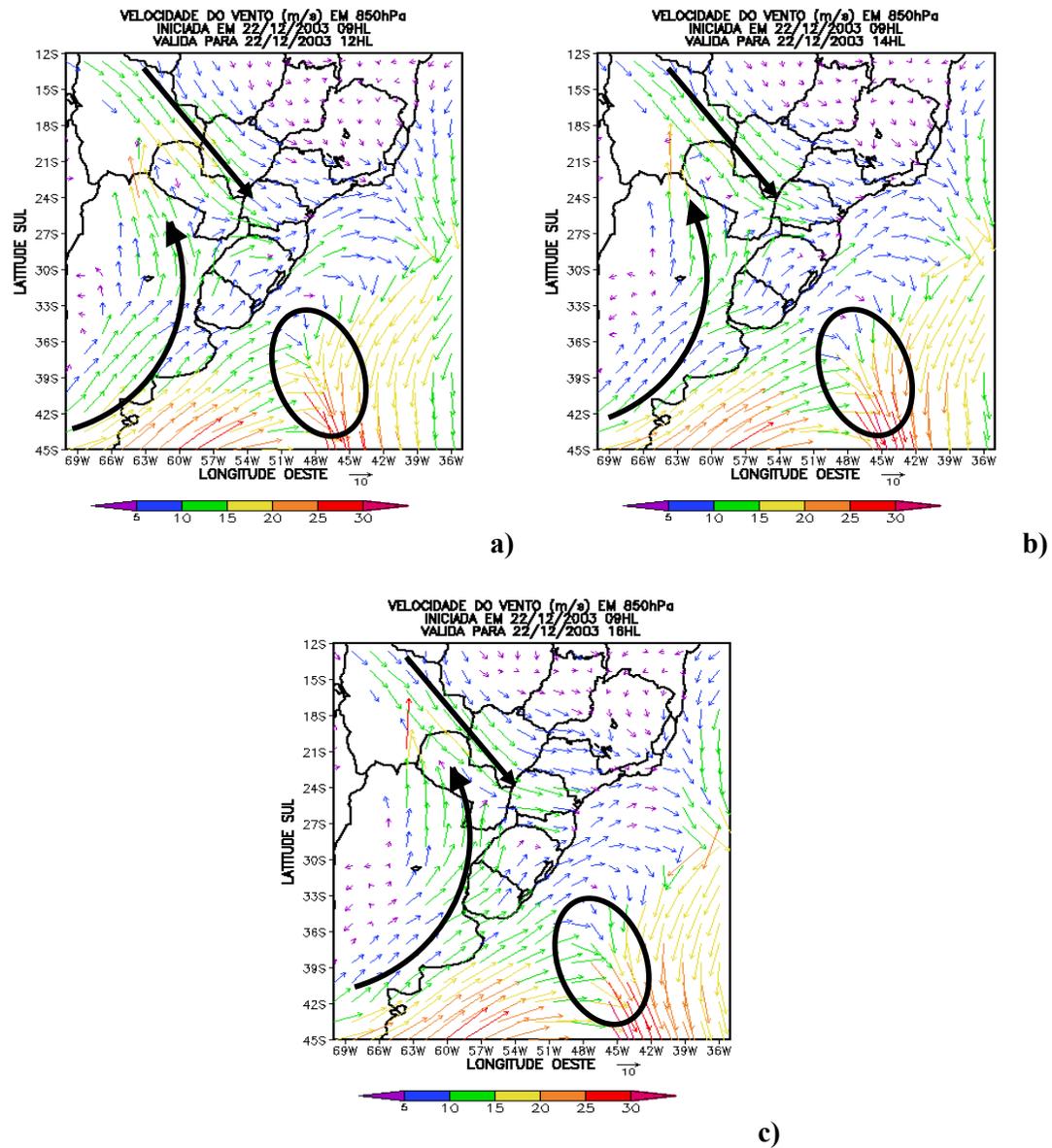


FIGURA 42 – Vento horizontal (domínio 1), para os três períodos de análise referente ao dia 22/12/2003 no nível de pressão 850hPa.

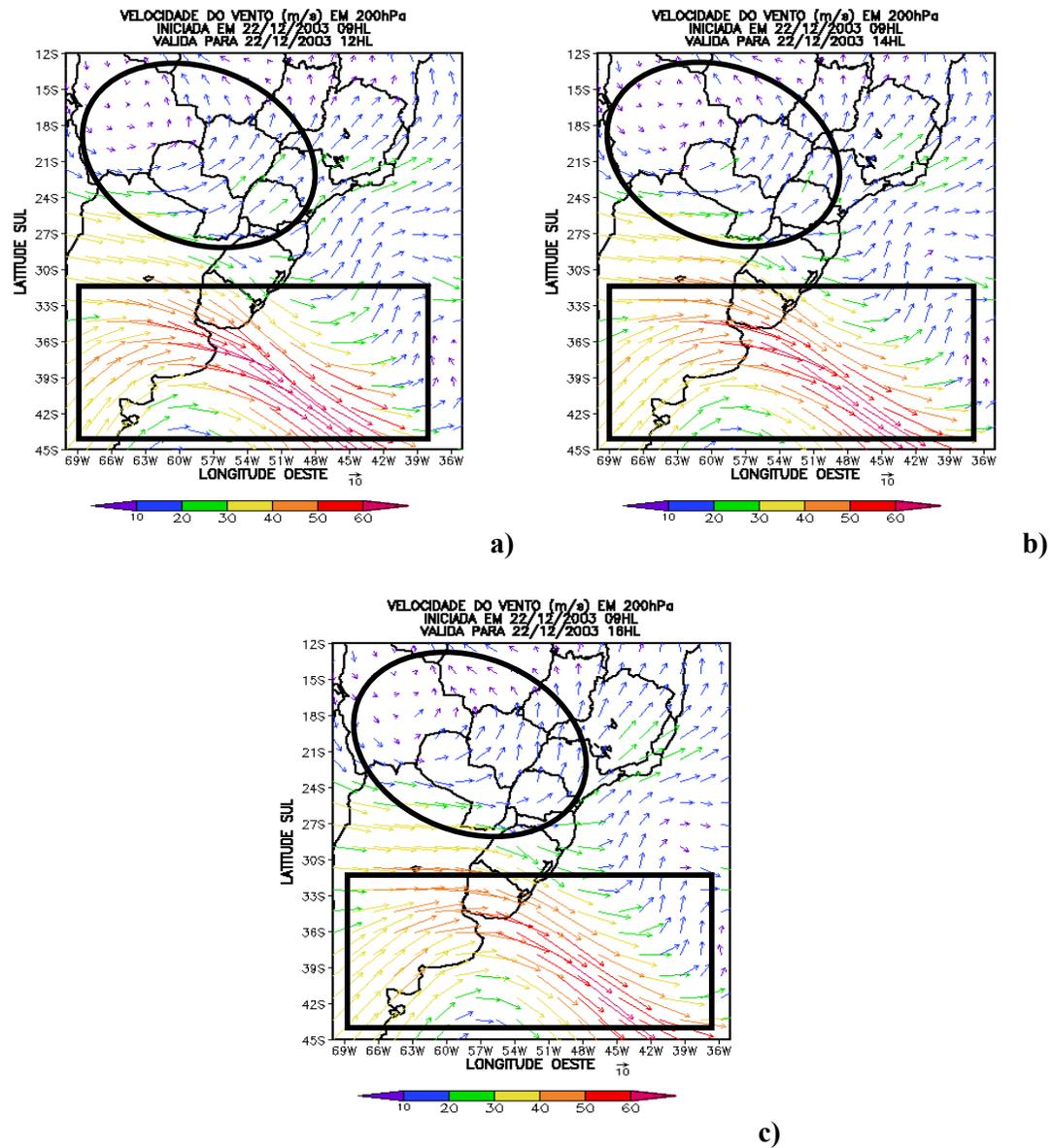


FIGURA 43 – Vento horizontal (domínio 1), para os três períodos de análise referente ao dia 22/12/2003 no nível de pressão 200hPa.

4.2.3. Caso: 19-20 de dezembro de 2003

O caso apresentado aqui se refere ao SCM que ocorreu no interior do continente devido ao aquecimento superficial.

4.2.3.1. Interpretação das Imagens de Satélite

A Figura 44 mostra a seqüência de fragmentos das imagens de satélite para o caso 19-20 de dezembro de 2003. Segue a descrição relativa ao ciclo de vida deste SCM.

Fase de formação

Na Figura 44a em 19/12/2003 às 2110HL pode-se notar a existência de uma nebulosidade aparentemente insignificante, mas que com o passar do tempo será responsável pela formação deste SCM. Já na Figura 44b consegue-se perceber a nebulosidade mais esbranquiçada, denotando aumento de atividade convectiva. A Figura 44c, relativa ao dia 19/12/2003 às 2239HL, mostra que o SCM está em fase de intensificação, com tamanho e formato mais perceptíveis à nordeste da Argentina. Ainda neste horário, observa-se a presença de uma nebulosidade estratiforme sobre o Estado do Rio Grande do Sul. Uma hora depois, às 2339HL do dia 19/12/2003 (Figura 44d), é nítida a intensidade do núcleo convectivo do SCM, com tamanho consideravelmente maior, quando comparado com a imagem anterior, e formato aproximadamente circular, se aproximando ainda mais do oeste do Rio Grande do Sul (possivelmente provocando precipitação na área onde está atuando). À 0139HL de 20/12/2003 (Figura 44e) o SCM continua em grande atividade convectiva, apresentando o dobro do tamanho encontrado anteriormente. O seu formato ainda é visivelmente circular e abrange uma área maior iniciando sua incursão à oeste do Rio Grande do Sul, unindo-se à nebulosidade estratiforme existente à nordeste do Estado. O núcleo convectivo do SCM está bastante intenso. No decorrer de quatro horas, ou seja, às 0409HL em 20/12/2003 (Figura 44f) o SCM assume proporções cada vez maiores e apresenta atividade convectiva bastante intensa, com o seu núcleo convectivo afetando apenas o nordeste da Argentina e sua parte estratiforme se encontra sobre o Rio Grande do Sul. Na seqüência será mostrada a descrição da fase de maturação do SCM.

Fase de maturação

Na Figura 44g às 0539HL em 20/12/2003, é interessante notar que o núcleo do SCM vem se mantendo à nordeste da Argentina, mas sua parte estratiforme atinge o sul do Paraguai, quase que completamente o Rio Grande do Sul e o noroeste do Uruguai. Nesta fase, o SCM continua se intensificando para atingir o seu máximo desenvolvimento. Na Figura 44h, em 20/12/2003 às 0739HL, o sistema alcança a fase de maturação, isto é, seu máximo desenvolvimento, com temperaturas dos topos atingindo seus valores mais negativos. Nesta fase, o núcleo convectivo deste SCM também apresenta seu máximo tamanho. A partir daqui o sistema entrará em fase de dissipação. Portanto, na seqüência será apresentada a fase de dissipação do SCM.

Fase de dissipação

Na fase de dissipação, conforme a Figura 44i em 20/12/2003 às 1009HL, o SCM mostra seu núcleo convectivo um tanto quanto desconfigurado não apresentando mais o seu formato circular, que perdurou durante as fases de formação e de maturação. A área instável do sistema domina grande parte do Rio Grande do Sul. Segundo a Figura 44j, em 20/12/2003 às 1139HL, verifica-se que o núcleo do SCM está se desintensificando, porém abrangendo uma área bem maior quando comparado com seu estado de maior desenvolvimento. O Rio Grande do Sul ainda se encontra tomado por uma parte ativa do SCM e por nuvens estratiformes. Na Figura 44l, às 1309HL de 20/12/2003, nota-se o enfraquecimento total do núcleo convectivo do SCM, agora apresentando núcleos insignificantes. Na Figura 44m, às 1439HL, na tarde do dia 20/12/2003, a área instável do SCM está com tamanho menor sobre o sul do Paraguai, norte do Rio Grande do Sul, oeste de Santa Catarina, mostrando-se em fase dissipativa total. A partir da análise acima, este SCM teve 18 horas como tempo total de vida.

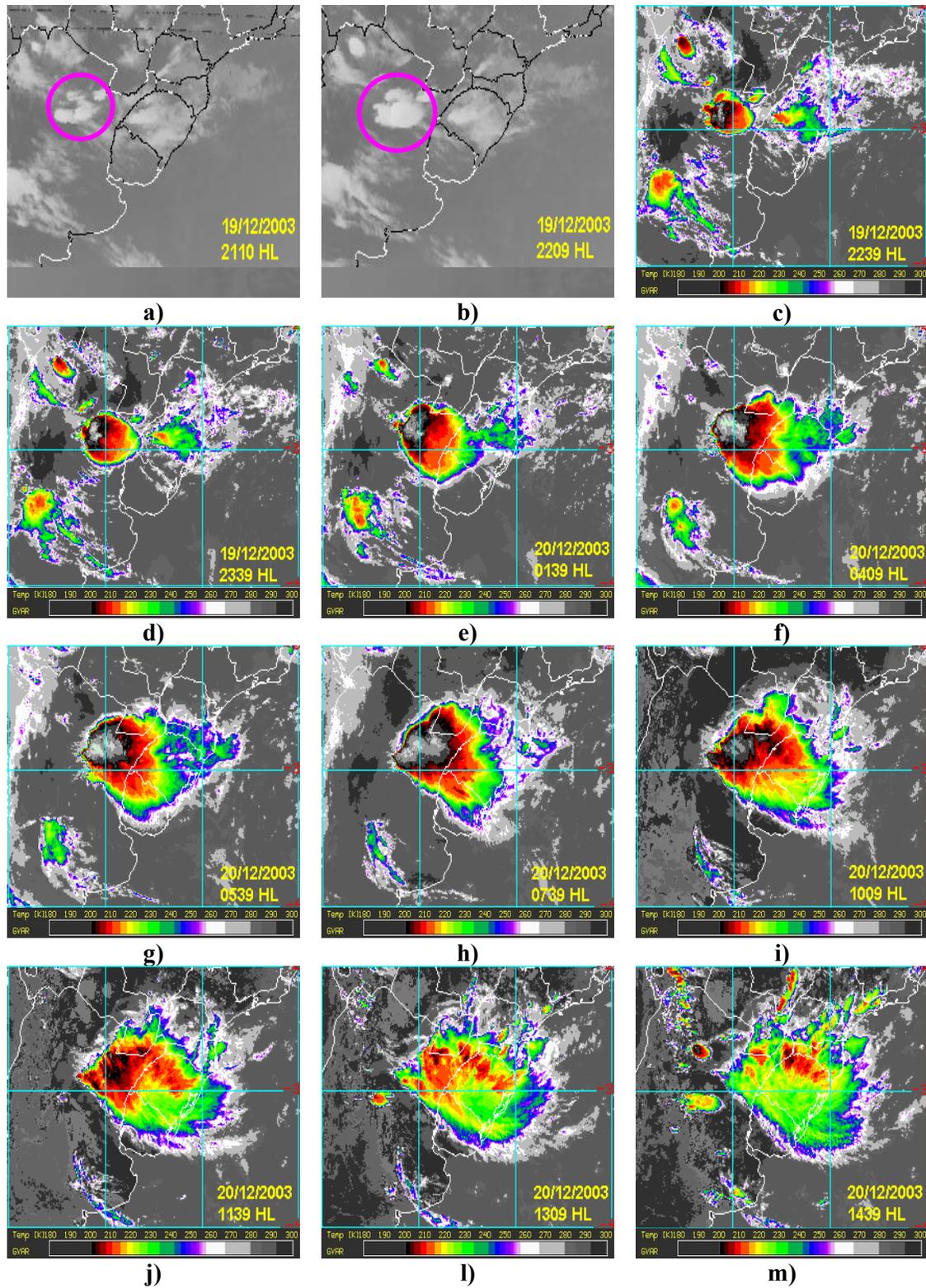


FIGURA 44 – Seqüência de fragmentos das imagens do satélite geostacionário GOES-12, no canal infravermelho, referente ao caso 19-20 de dezembro de 2003.

4.2.3.2. Distribuição Espacial das Descargas Elétricas Atmosféricas

A Figura 45 refere-se à distribuição espacial de DEA, registradas durante os dias 19-20 de dezembro de 2003.

O SCM analisado neste caso ocorreu dentro da área de cobertura do SIMEPAR, porém não sobre o Paraná, onde estão instalados os sensores de detecção de DEA. Situação que irá se refletir consideravelmente na quantidade e na distribuição espacial das DEA. Uma vez que trata-se de um SCM isolado, é possível levar em consideração a quantidade de DEA associadas exclusivamente ao SCM, já que não existe outro tipo de nebulosidade que possa interferir nesta quantidade.

Nas Figuras 45a até 45m as quantidades de DEA são insignificantes, quando relacionadas com a severidade do SCM em questão. Ao comparar-se a quantidade e a região de detecção das DEA com aquela de localização do SCM, a concordância espacial e temporal é péssima, pois os sensores não conseguiram detectar as DEA deste sistema, que apresentou tamanho e atividade convectiva importantes. Isto torna bastante evidente que os sensores detectam DEA muito pior quando o SCM não ocorre sobre o Paraná. De fato, foi o que aconteceu com este SCM que, em grande parte do seu ciclo de vida, permaneceu à nordeste da Argentina, ou seja, distante do Paraná.

A partir da fase de maturação, aparentemente, é quando os sensores começam a detectar as DEA no local onde o sistema está situado, entretanto a quantidade de 416 DEA detectadas (Figura 45n), no horário de máxima atividade do sistema é irrisória.

Na análise das Figuras 45o até 45s é perceptível enorme contrariedade, pois para os horários referentes a estas Figuras, o SCM encontra-se em fase de dissipação, não obstante, são verificadas quantidades crescentes de DEA. As imagens de satélite próximas destes horários não mostram nebulosidade que justificasse, mesmo considerando a defasagem espacial identificada na detecção das DEA, estes valores. Como se não bastasse, a distribuição espacial das DEA também está defasada, porque a concentração de DEA ainda está no nordeste da Argentina, sendo que o SCM já se encontra deslocado para o Rio Grande do Sul.

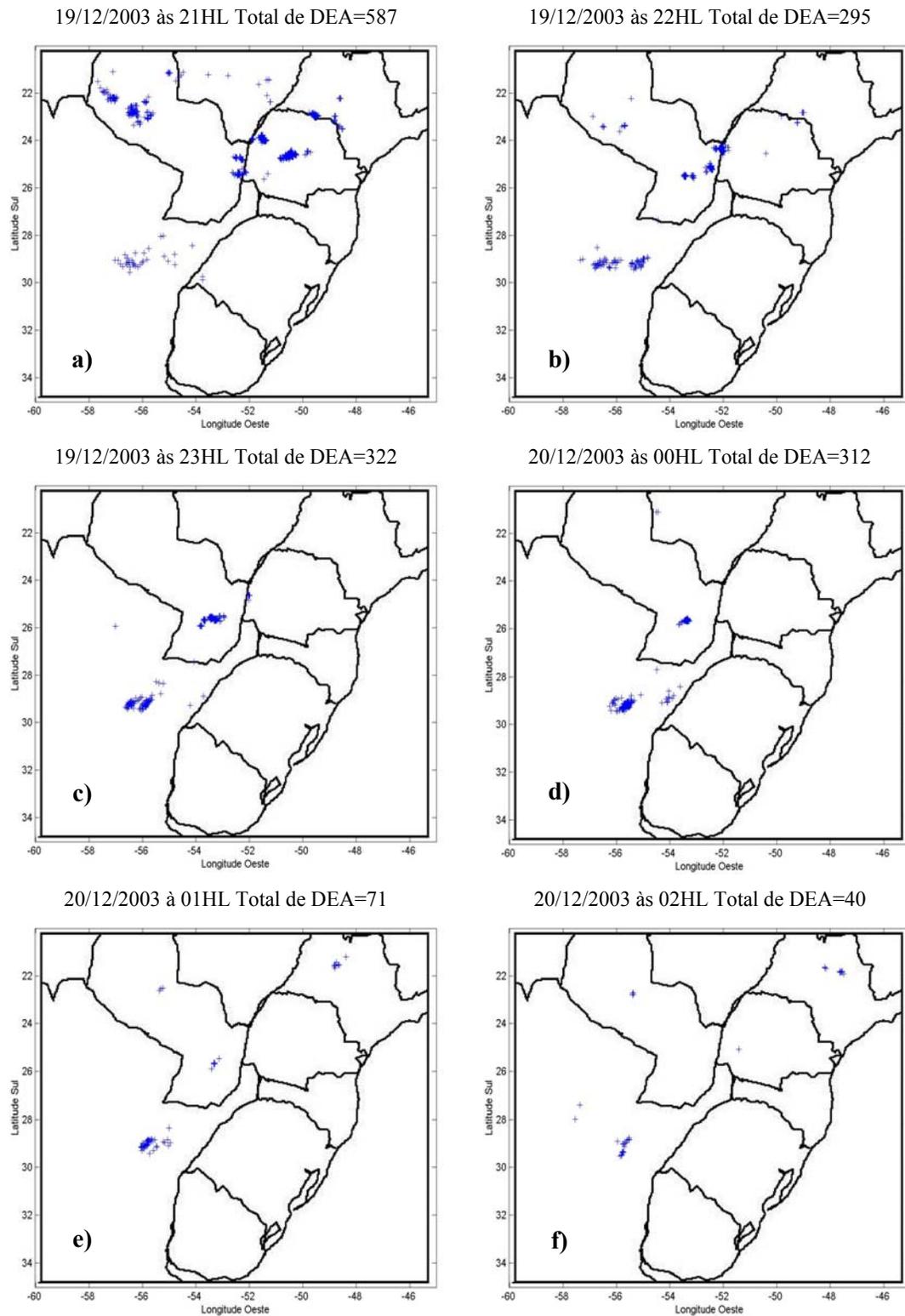


FIGURA 45– Distribuição espacial das DEA para o caso 19-20 de dezembro de 2003.

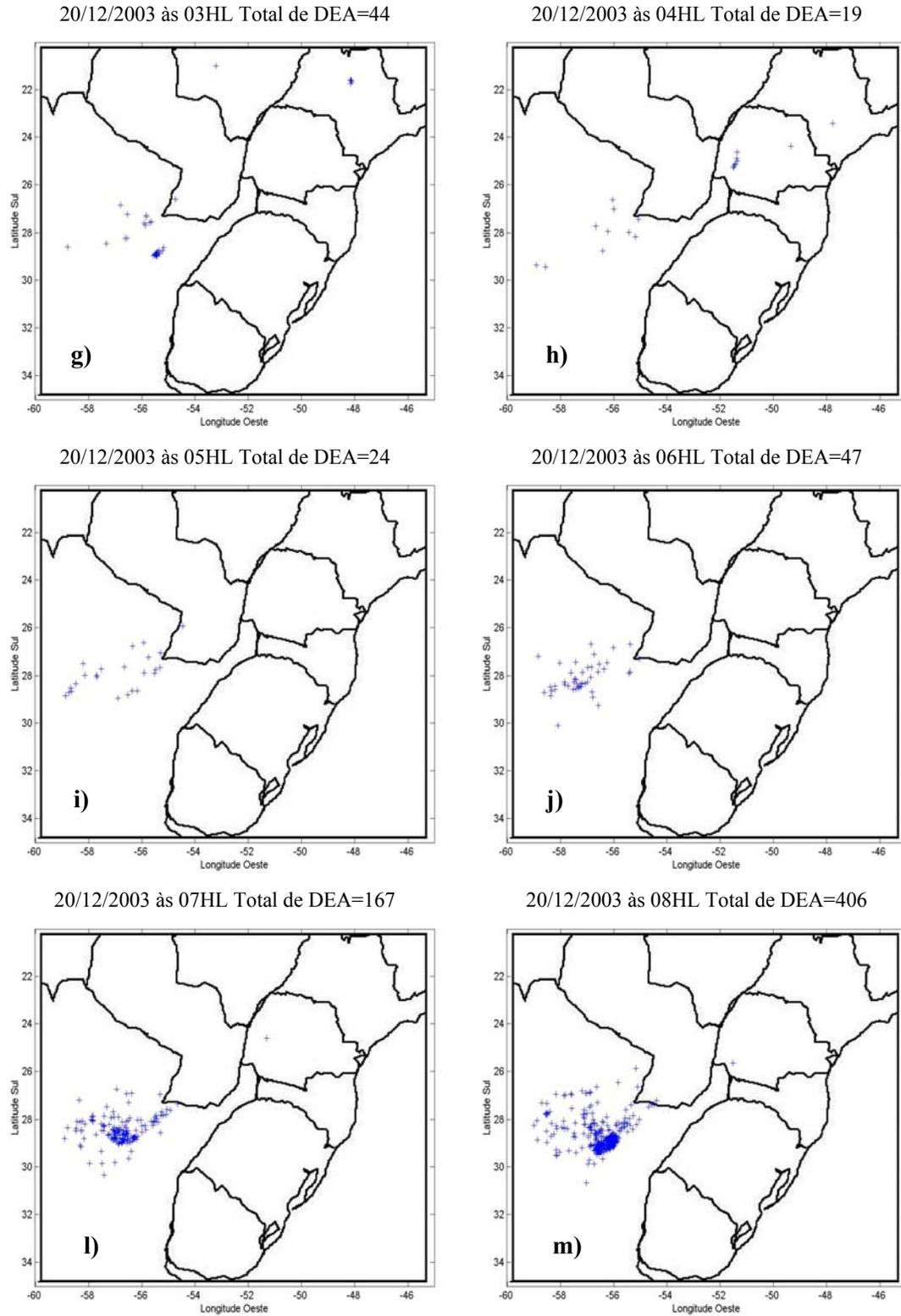
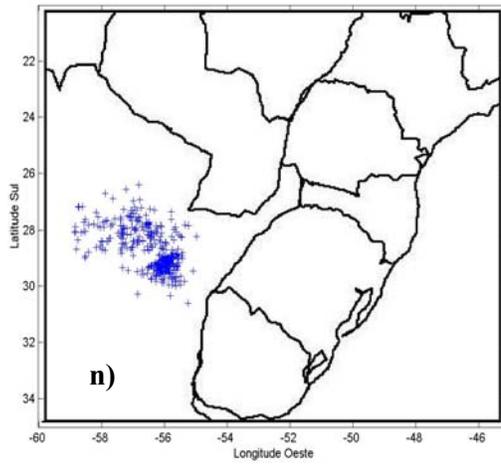
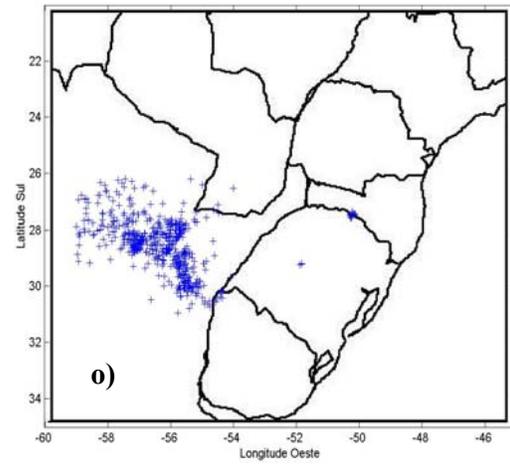


FIGURA 45 – Continuação.

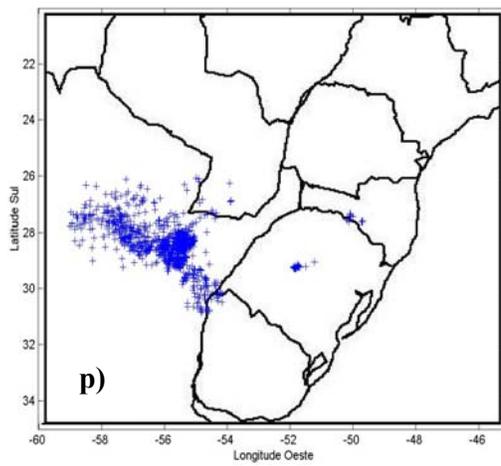
20/12/2003 às 09HL Total de DEA=416



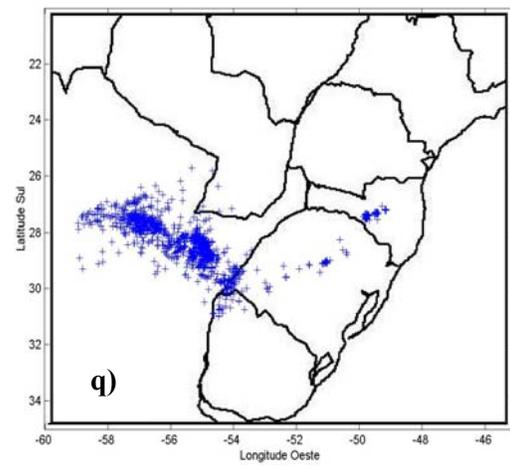
20/12/2003 às 10HL Total de DEA=561



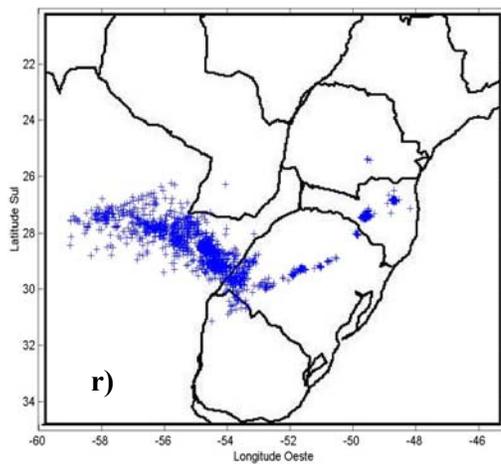
20/12/2003 às 11HL Total de DEA=1038



20/12/2003 às 12HL Total de DEA=1242



20/12/2003 às 13HL Total de DEA=1622



20/12/2003 às 14HL Total de DEA=1838

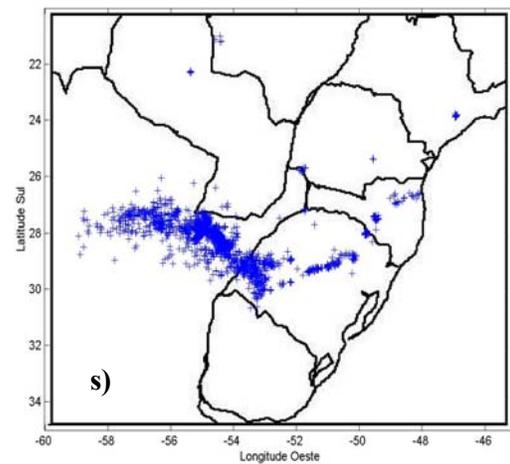


FIGURA 45 – Continuação.

4.2.3.3. Modelo de Mesoescala MM5

Mostra-se na Figura 46 o vento horizontal, temperatura do ar e razão de mistura em superfície para às 21HL relativo ao dia 19/12/2003.

A nebulosidade associada ao SCM que viria a se formar, às 21HL apresenta-se insignificante, situada à nordeste da Argentina, visível na Figura 44a.

Olhando o campo de vento na Figura 46a notam-se ventos de intensidade forte que fazem parte da circulação anticiclônica sobre o Oceano Atlântico, que influenciou o SCM em questão, pois há intrusão de ar continente adentro. Ainda pode-se perceber, à leste da Cordilheira dos Andes, uma linha de convergência dos ventos que começa a se organizar. Na Figura 46b é bem nítida a existência do escoamento que se desloca em direção aos Andes. Por outro lado, na região em que está se formando o SCM existe um gradiente horizontal de temperatura muito forte (Figura 46c), que é mostrado em detalhes na Figura 46d, indicando a existência de instabilidade convectiva significativa. A umidade apresenta-se bastante elevada, com um núcleo superior a 20g/kg, como mostra a Figura 46e, no local onde o SCM está se formando.

Na fase de formação do SCM a baroclinia e a alta umidade tiveram um papel muito importante na geração de células convectivas ou nuvens *Cumulonimbus*.

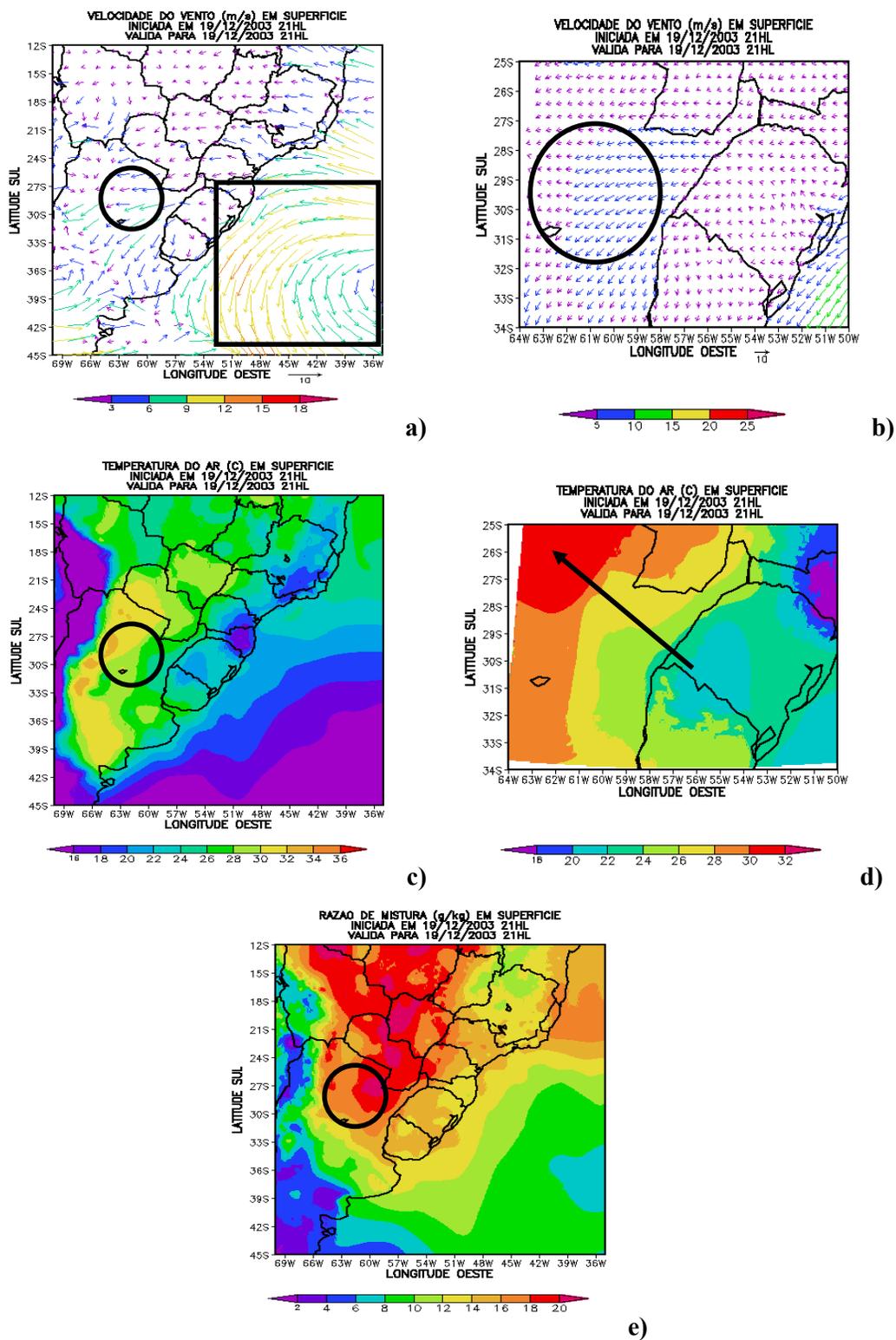


FIGURA 46 – a) Vento horizontal (domínio 1), b) Vento horizontal (domínio 4), c) Temperatura do ar (domínio 1), d) Temperatura do ar (domínio 4) e e) Razão de mistura (domínio 1) em superfície, análise das 21HL do dia 19/12/2003.

Os mesmos campos meteorológicos citados anteriormente são agora analisados à 01HL do dia 20/12/2003.

Na imagem de satélite (Figura 44e) o sistema mostra-se em grande atividade convectiva atuando ainda no nordeste da Argentina.

Percebe-se na Figura 47a que os ventos associados à Alta Subtropical do Oceano Atlântico, com velocidades da ordem de 12m/s, diminuem de intensidade à medida que penetram no continente (por causa da rugosidade do solo) e se encontram com os ventos descendentes à sotavento dos Andes. Neste momento, inicia-se a configuração de mais um escoamento, quase que de norte (ao norte da Argentina e oeste do Paraguai), que se une aos escoamentos citados anteriormente. Estes ventos advectam (Figura 47b e 47e) umidade para a região onde o SCM se encontra (círculo, nas Figuras). Em relação ao campo de temperatura, observa-se uma diminuição de valores, em toda a grade como pode ser visto na Figura 47c, influenciada, de um lado, pelo ciclo diurno e, de outro lado, pelos ventos que entram no continente (Figuras 47a e 47b) impulsionados pela circulação da Alta Subtropical. Entretanto, olhando o campo de temperatura na grade de 5km (Figura 47d), apesar dos valores um pouco menores (como dito anteriormente) nota-se que o gradiente horizontal de temperatura permanece praticamente inalterado, pois a variação de seus valores na região em que o SCM se encontra é a mesma. Percebe-se uma linha de convergência a leste dos Andes, formada pelo encontro dos ventos descendentes da Cordilheira com os ventos que penetram no continente a partir da circulação anticiclônica, localizada no Oceano Atlântico. Tucker e Crook (1999) investigaram um SCM que se desenvolveu perto das Montanhas Rochosas. Os autores argumentaram que, nos meses quentes, a atividade convectiva nas Montanhas Rochosas gera uma circulação que favorece a formação de SCM nesta região. Além disto, anteriormente Tripoli e Cotton (1989) já haviam analisado as interações existentes entre as circulações termicamente e mecanicamente induzidas pela topografia e a geração de SCM no lado leste das Montanhas Rochosas. Assim, a formação do SCM estudado neste caso teve a influência da Cordilheira dos Andes e da zona de alta pressão localizada no Oceano Atlântico.

Assim, continuam se consolidando as condições favoráveis para que o sistema alcance seu estágio de maturação.

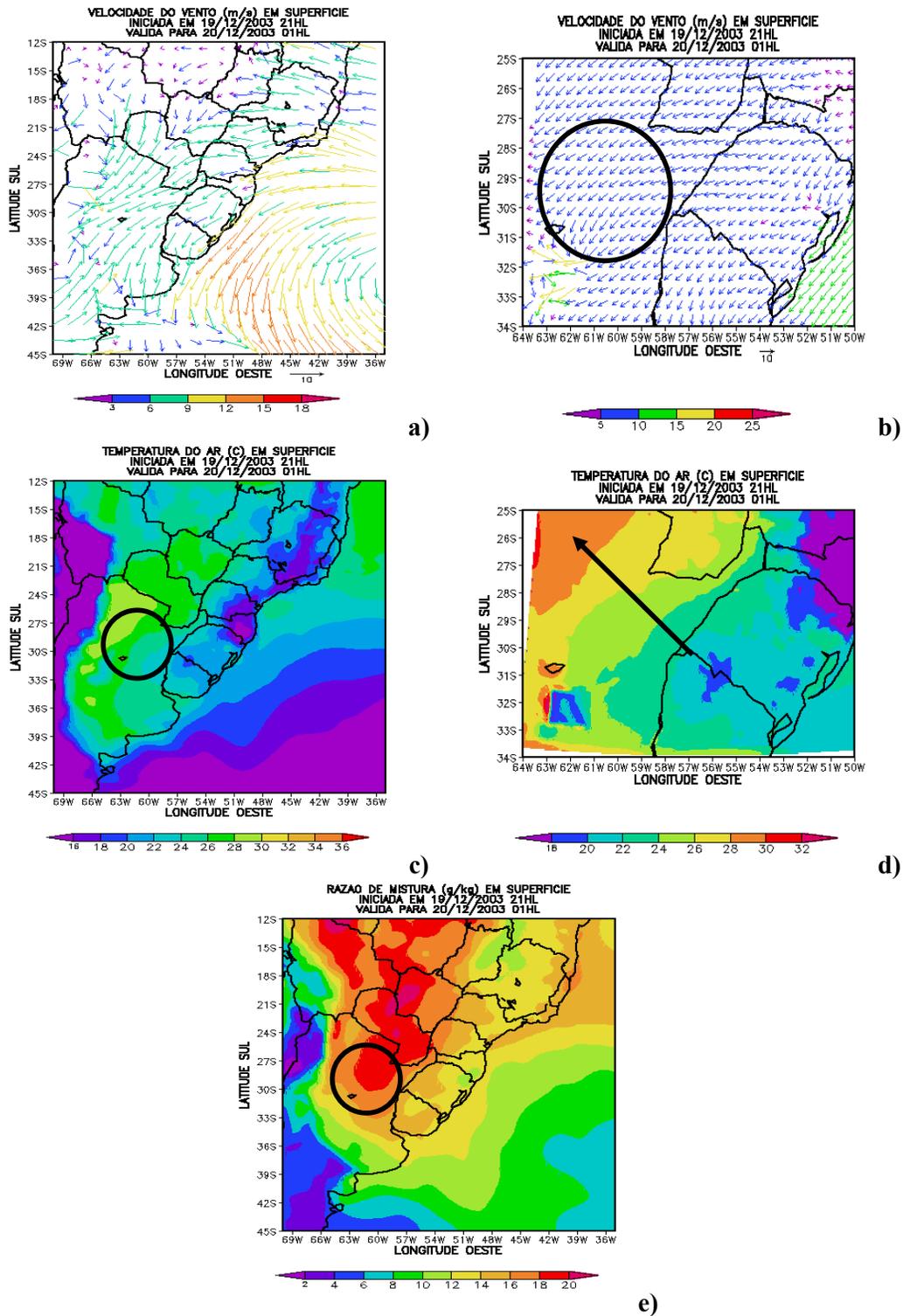


FIGURA 47 – a) Vento horizontal (domínio 1), b) Vento horizontal (domínio 4), c) Temperatura do ar (domínio 1), d) Temperatura do ar (domínio 4) e e) Razão de mistura (domínio 1) em superfície com previsão de 04 horas válida para à 01HL do dia 20/12/2003.

São visualizados na Figura 48 os campos meteorológicos do vento horizontal, da temperatura do ar e da razão de mistura em superfície, para às 07HL relativo ao dia 20/12/2003.

O horário que será analisado corresponde ao momento em que o SCM alcança seu estágio de máxima atividade convectiva, com seu núcleo mais ativo no nordeste da Argentina, mas afetando também o sul do Paraguai, oeste do Rio Grande do Sul e noroeste do Uruguai (Figura 44h).

Após as características atmosféricas iniciais, de grande instabilidade convectiva e altos valores de umidade, é de se esperar que o sistema alcance seu estágio de maturação. Observa-se na Figura 48a, convergência dos ventos do escoamento tropical (de norte), do escoamento da alta pressão no Oceano (de nordeste) e dos ventos descendentes dos Andes (de oeste), na região em que o SCM está localizado (quadrado na Figura). O encontro destes três escoamentos forma uma linha de convergência, mostrada na Figura 48b, muito bem definida. Ao longo desta linha é que se encontra a atividade convectiva mais forte deste SCM como mostrado na (Figura 44h). De forma geral, os valores de temperatura diminuíram (Figura 48c) sendo que as maiores temperaturas estão localizadas na região deste SCM. Analisando este campo com 5km de resolução espacial (Figura 48d), observa-se que o gradiente horizontal de temperatura diminuiu levemente de intensidade, indicando a permanência de um estado instável convectivamente da atmosfera, naquela região. Os valores de umidade permanecem elevados (entre 16 e 20g/kg) mantendo o suprimento de água para a convecção (Figura 48e).

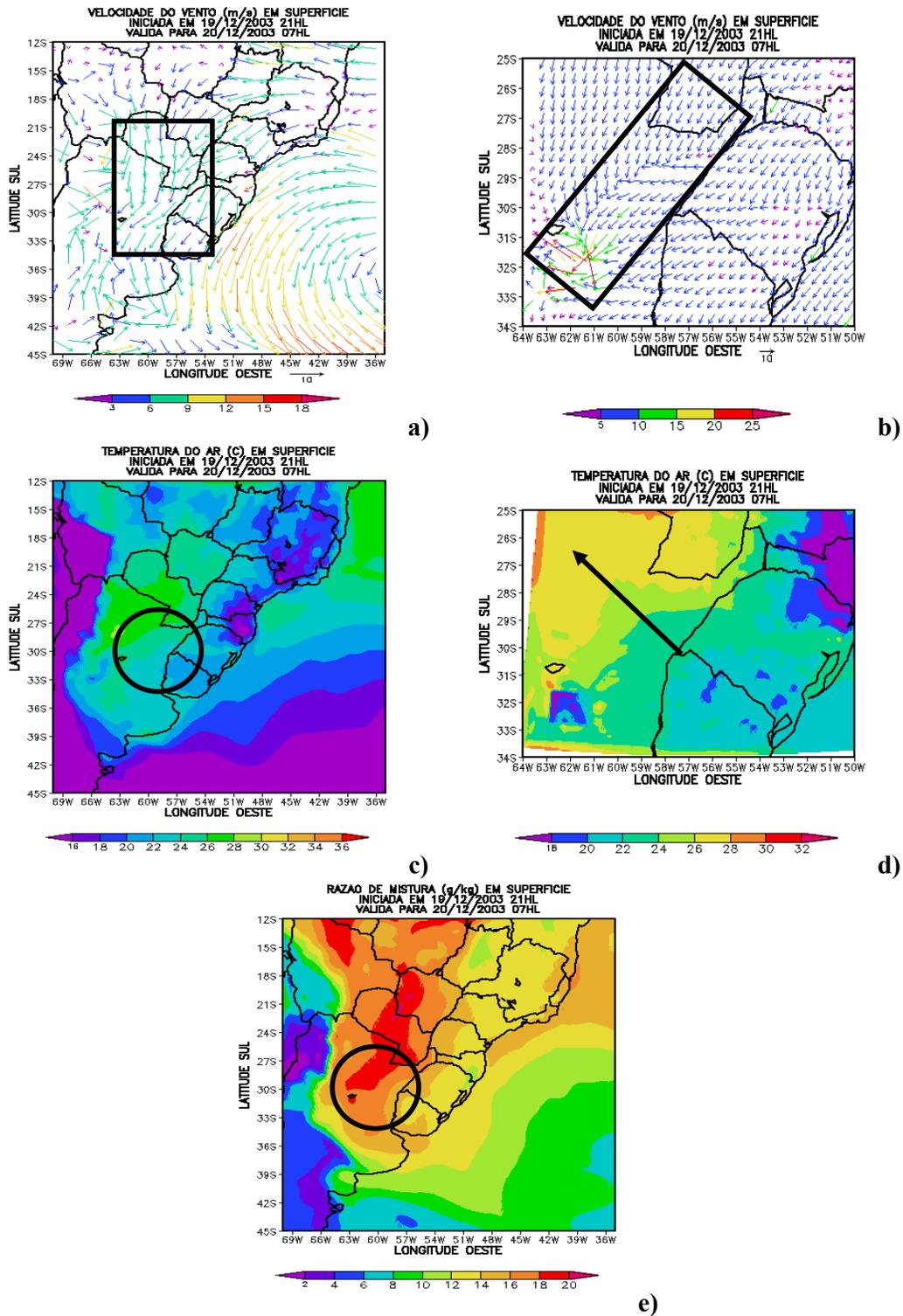


FIGURA 48 – a) Vento horizontal (domínio 1), b) Vento horizontal (domínio 4), c) Temperatura do ar (domínio 1), d) Temperatura do ar (domínio 4) e e) Razão de mistura (domínio 1) em superfície, com previsão de 10 horas válida para às 07HL do dia 20/12/2003.

Analisa-se agora o campo de vento horizontal no nível de 850hPa, para os dias 19 e 20/12/2003, nos horários de formação, intermediário e de maturação deste SCM.

Na análise da Figura 49, em conjunto, neste nível, observa-se escoamento quase de norte no local onde o SCM está situado, com velocidades elevadas de 15m/s. As áreas ocupadas com estas velocidades aumentam com o passar do tempo. Este escoamento com velocidades mais elevadas, de 15 a 20m/s, são provenientes da região tropical, sendo que houve intensificação do máximo de vento a partir da fase de formação do SCM.

Dando término a este caso analisa-se o vento horizontal, no nível de 200hPa durante os dias 19 e 20/12/2003, para os horários de formação, intermediário e de maturação visíveis na Figura 50. De maneira geral, percebe-se a presença de um jato forte em altos níveis, com valores de 50m/s. Este jato se desloca para leste, apresentando largura maior, porém comprimento menor. O jato está localizado bem ao lado de onde o SCM ocorreu. Além deste jato existe outro, localizado ao sul de 40°S, aproximadamente.

Zhang et al. (2003) estudaram um SCM (usando campos do modelo MM5) que apresentou, um Jato de Altos Níveis de mesoescala (JANm). O JANm se diferencia do Jato de Altos Níveis (JAN) pela sua localização. No caso em análise, o JANm se localizou perto de onde o SCM se desenvolveu. Segundo Zhang et al. (2003) o JANm tem sua origem na força do gradiente de pressão (e, então no gradiente de temperatura) e na advecção vertical de quantidade de movimento, principalmente nos estágios iniciais e, depois, até o seu estágio maduro. O acoplamento entre o Jato de Baixos Níveis (JBN) e o JANm ocorre devido ao movimento vertical, desde a saída do JBN até a entrada do JANm, que transporta quantidade de movimento para cima. Esta situação é reproduzida pelos campos que o MM5 restituiu para este caso.

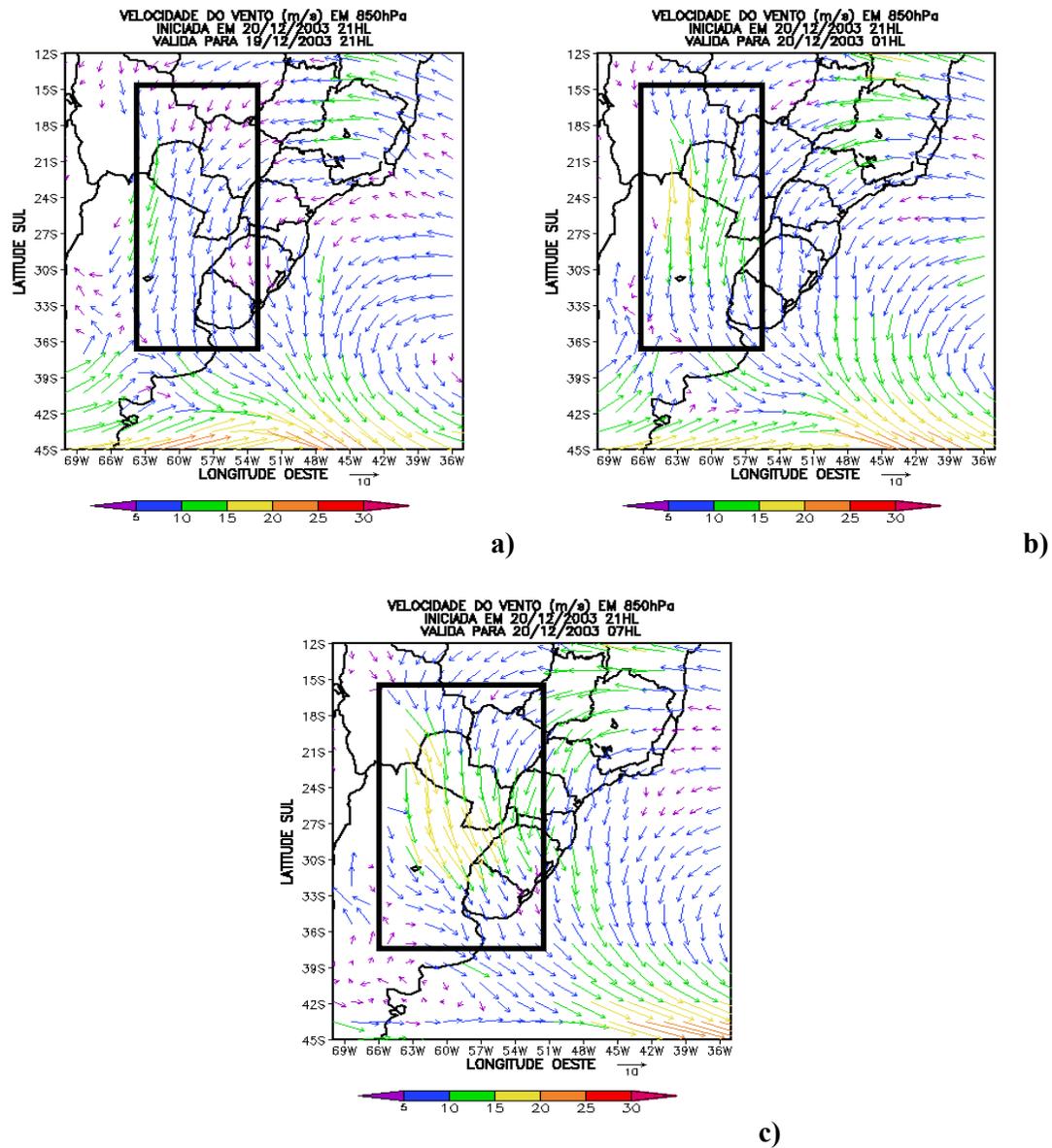


FIGURA 49 – Vento horizontal (domínio 1), para os três períodos de análise referente aos dias 19 e 20/12/2003 no nível de pressão 850hPa.

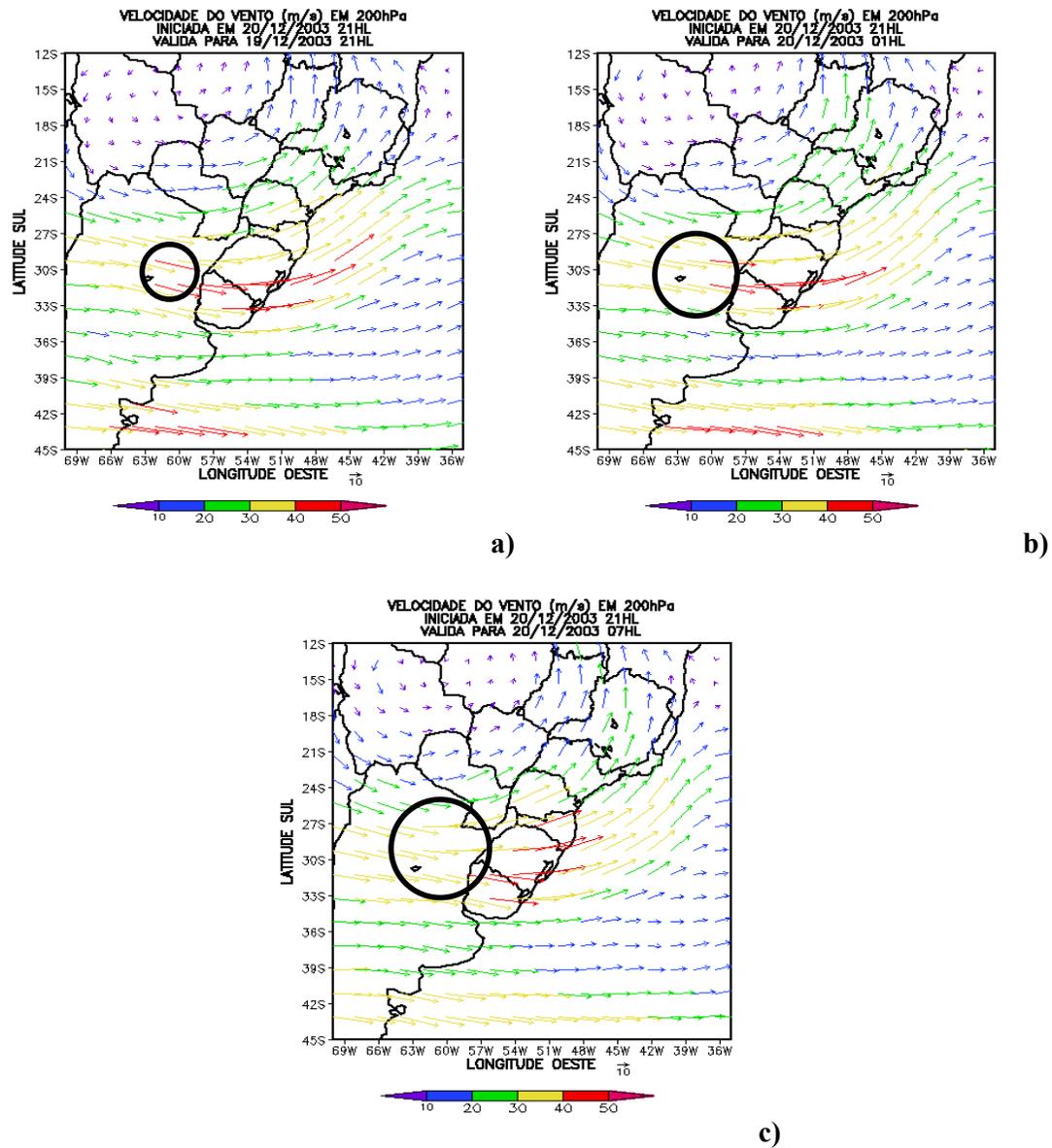


FIGURA 50 – Vento horizontal (domínio 1), para os três períodos de análise referente aos dias 19 e 20/12/2003 no nível de pressão 200hPa.

4.3. Influência da Temperatura da Superfície do Mar

A variável Temperatura da Superfície do Mar (TSM) é abordada neste item, em particular, por ter se mostrado diferente no caso de estudo do SCM ocorrido durante os dias 13-14 de março de 2002 no litoral Catarinense e Paranaense.

A TSM possui uma grande importância no estudo dos fenômenos de interação oceano-atmosfera e na variabilidade das condições climáticas regionais e globais. Possui um papel fundamental nos oceanos, pois determina as trocas de calor entre o oceano e a atmosfera adjacente. Pesquisas realizadas enfatizaram a importância da TSM do Oceano Atlântico Sul sobre o clima global e regional.

Uma vez que o mês de março de 2002 foi afetado pela presença do evento El Niño, segundo o Climanálise (2002), foram verificadas anomalias positivas de TSM sobre o Oceano Pacífico Tropical, indicando a evolução do fenômeno El Niño. Ainda, foi observado aumento da área coberta por desvios positivos de TSM em todo o setor subtropical do Oceano Pacífico Sul. Este aquecimento estava ocorrendo desde o mês de outubro de 2001. No setor norte do Oceano Atlântico Tropical, foram observadas áreas com desvios positivos de TSM (valores entre 0,5°C e 1,5°C). Na costa da Região Nordeste do Brasil, os valores de TSM estiveram 0,5°C acima dos valores médios climatológicos. Próximo à costa sudeste e sul da América do Sul, também predominaram desvios positivos de TSM. Situação oposta ocorreu durante o mês de dezembro de 2003, onde no Oceano Atlântico Sul destacou-se uma grande área com anomalias negativas desde o sul do Brasil até à costa leste da Argentina.

Dado o exposto acima de fato, nesta pesquisa, para o caso ocorrido durante o mês de março verificaram-se valores bem mais elevados de TSM com variação de 26°C a 30°C, que percorrem o Oceano Atlântico desde o litoral nordeste até o sul do Brasil. Ao passo que a extensa área de TSM mais elevada observada em março de 2002, não esteve presente em dezembro de 2003. Beneti et al. (2002) afirmam que as variações da temperatura da superfície do Oceano Atlântico influenciam diretamente a faixa litorânea do Paraná e mantêm condições apropriadas para a formação de tempestades. Assim, pode-se dizer que a anomalia positiva da TSM em março pode ter sido um dos fatores preponderantes para a ocorrência do SCM no litoral de Santa Catarina e Paraná, já que os outros dois casos estudados ocorreram em um mês de anomalia negativa da TSM e em ambiente continental.

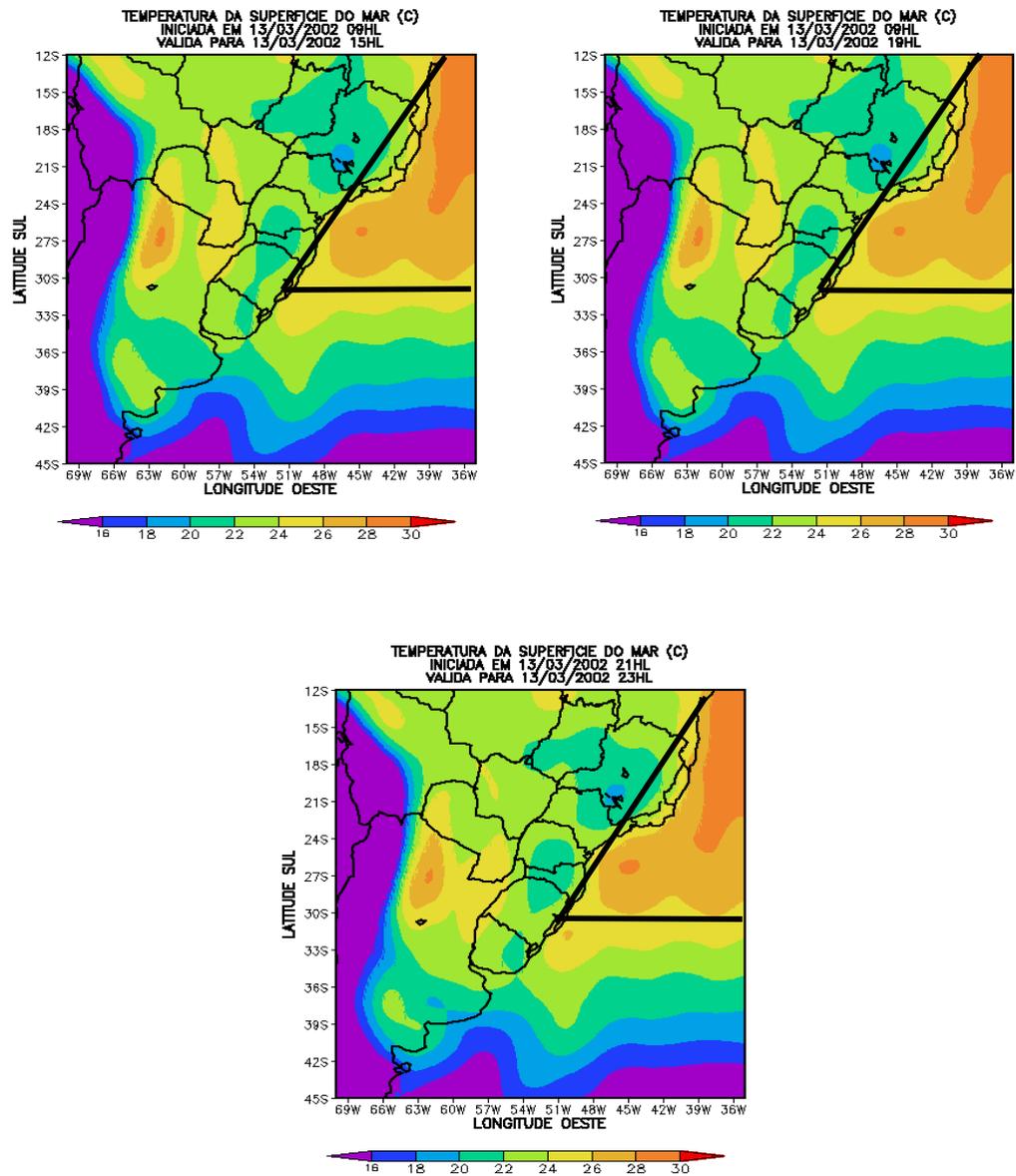


FIGURA 51 – Temperatura da superfície do mar (domínio 1), para os três períodos de análise referente ao caso dos dias 13 e 14/03/2002.

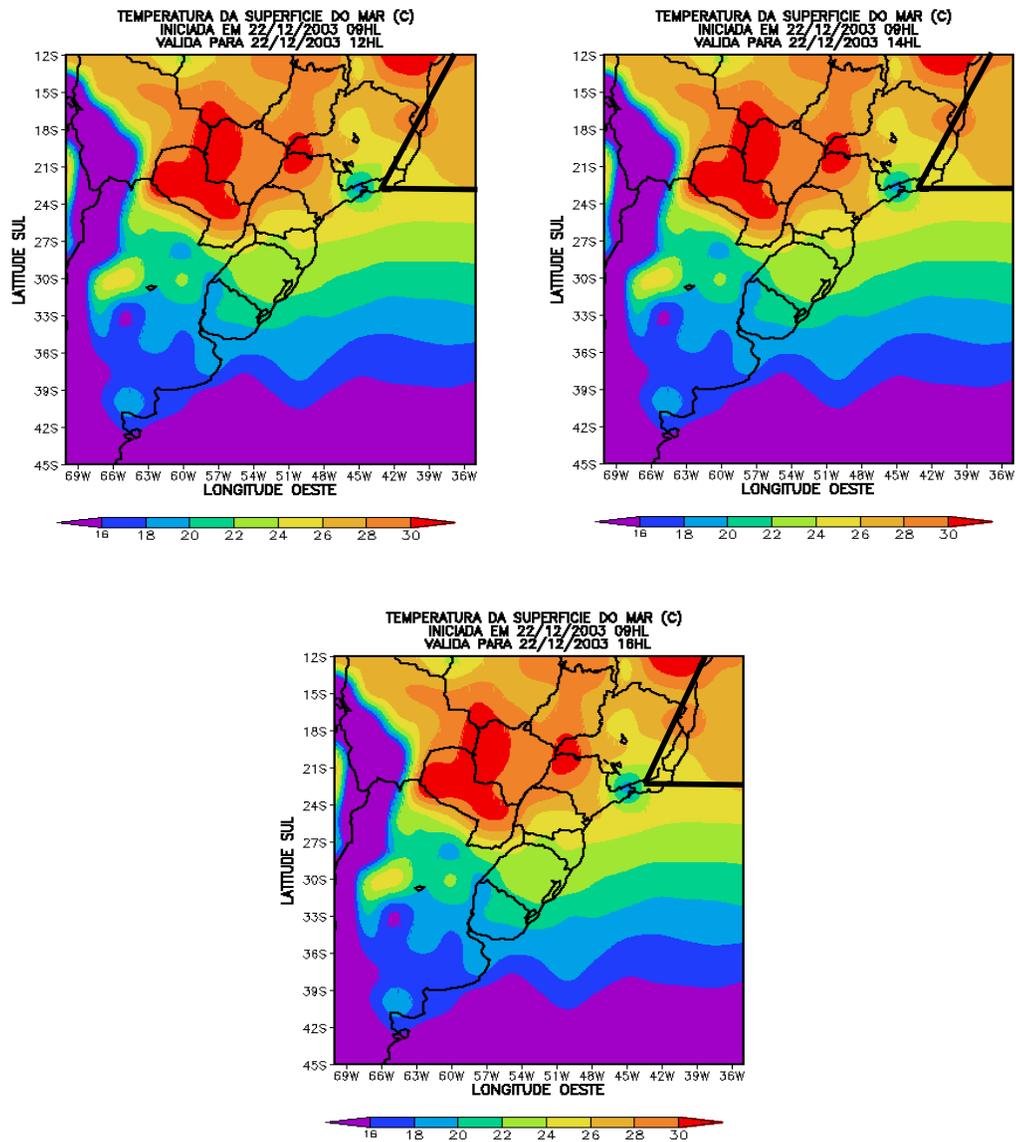


FIGURA 52 – Temperatura da superfície do mar (domínio 1), para os três períodos de análise referente ao caso dos dias 22 e 23/12/2003.

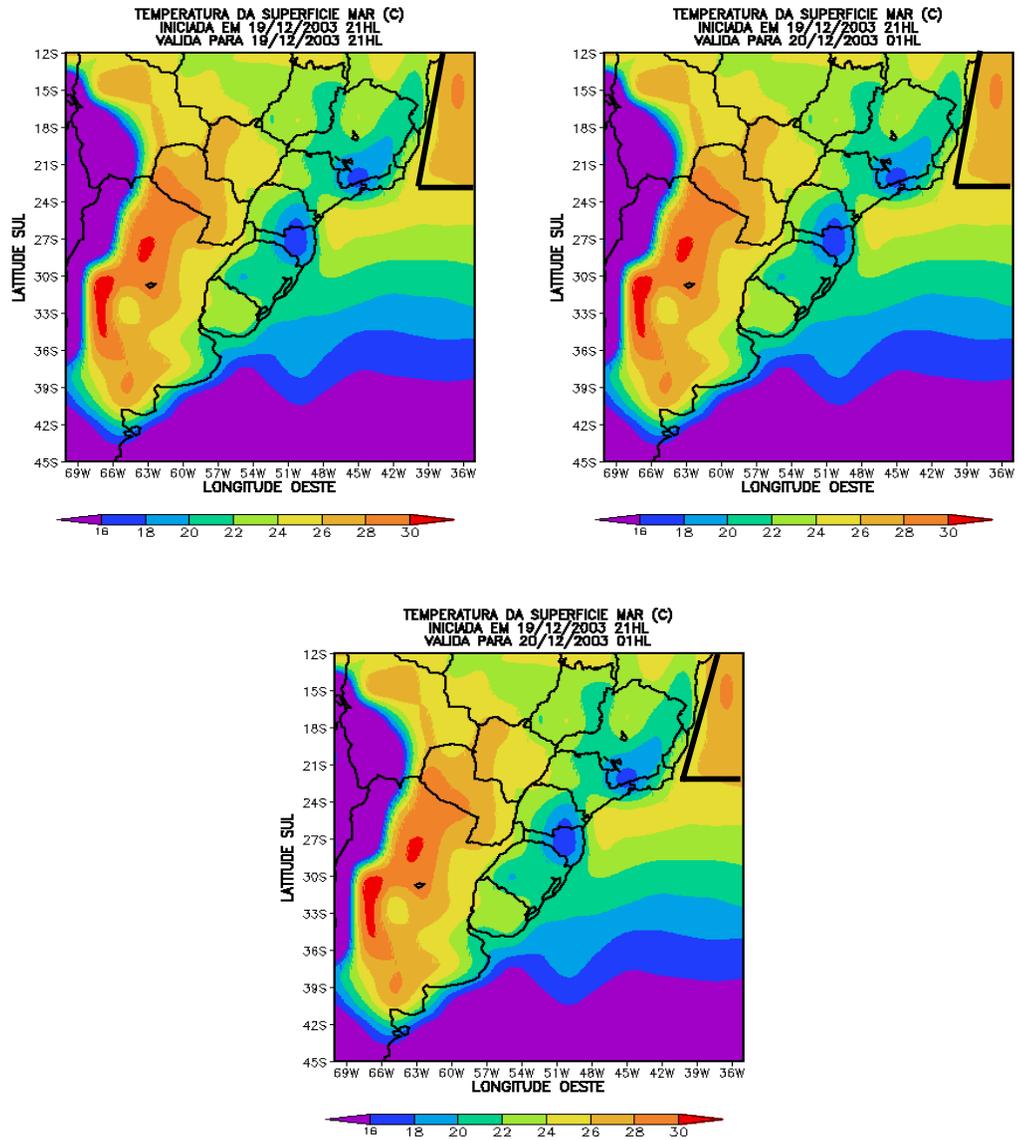


FIGURA 53 – Temperatura da superfície do mar (domínio 1), para os três períodos de análise referente ao caso dos dias 19 e 20/12/2003.

4.4. Discussão dos Resultados

Neste item são apresentadas as explicações para os resultados encontrados neste trabalho.

☞ DISTRIBUIÇÕES ANUAIS E MENSAIS

Nesta etapa do trabalho conseguiu-se fazer uma análise qualitativa da ocorrência de DEA no sul da América do Sul. No que diz respeito às distribuições anuais, o ano de 2002 apresentou maior quantidade de DEA com relação ao ano de 2003. Isto porque o ano 2002 foi afetado pela presença do evento El Niño. Conforme relatos na literatura, este fenômeno exerce influência em quantidades maiores de DEA quando está atuando. Logo, o El Niño foi o responsável, ao menos em parte, pela maior quantidade de DEA registradas durante o ano de 2002.

Com relação às distribuições mensais pôde-se verificar que os maiores valores detectados de DEA foram nos meses mais quentes, enquanto que as menores quantidades foram observadas nos meses mais frios, ou seja, houve uma relação direta dos maiores valores de temperatura do ar em superfície com as maiores quantidades de DEA. Situação concordante com o que diz a literatura, pois quanto maior a temperatura em superfície, maiores são as condições propícias para a formação de nuvens *Cumulonimbus*, as quais são grandes produtoras de DEA. Nos meses mais frios, como as temperaturas em superfície são menores, as chances de ocorrência de *Cumulonimbus* diminuem, logo o número de DEA também.

☞ SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA: ESTUDO DE CASOS

Vale ressaltar que os três casos selecionados para análise apresentaram diferentes mecanismos de formação.

Caso: 13-14 de março de 2002

O SCM que ocorreu no litoral de Santa Catarina e Paraná esteve associado ao fenômeno de brisa marítima, fenômeno de mesoescala, comum em região litorânea. A brisa marítima ocorre durante os dias ensolarados. A superfície do continente, na orla marítima, se aquece mais rapidamente que a do oceano adjacente. Como consequência, já pela manhã, surge uma faixa de pressão mais baixa sobre o litoral, ocasionando o

desenvolvimento de correntes convectivas ascendentes sobre o continente, as quais geram nuvens convectivas. Acima do oceano a pressão continua elevada, devido a menor temperatura da água à superfície. Dessa maneira, se estabelece uma circulação fechada, com movimentos ascendentes na costa e subsidentes sobre o mar. O vento, à superfície, sopra do oceano para o continente, em direção aproximadamente perpendicular à linha da costa. O posicionamento da alta pressão contribui para a intensificação da circulação da brisa (Freitas e Silva Dias, 2004). Neste caso, como o centro de alta pressão estava mais para o sul, no Oceano Atlântico, a frente da brisa não entrou continente adentro, ficando predominantemente perto do litoral Catarinense, onde o SCM se formou.

No local de ocorrência do SCM, o aquecimento diferencial entre o continente e o oceano, causador da brisa marítima, foi bem retratado pelo modelo MM5, bem como um núcleo de umidade bastante alta (22g/kg) que esteve presente na costa de Santa Catarina e Paraná, durante todo o ciclo de vida do SCM em questão. Ainda, na costa da Região Nordeste do Brasil, os valores de TSM estiveram 0,5°C acima dos valores médios climatológicos (Climanálise, 2002). Próximos à costa sudeste e sul da América do Sul, predominaram desvios positivos de TSM. Estes desvios positivos de TSM foram decorrentes da presença do evento El Niño durante o ano de 2002. Também, na literatura foi encontrado que a ocorrência de tempestade no litoral do Paraná tem associação com as variações da TSM. Logo, estes foram os possíveis motivos para formação e manutenção do SCM que ocorreu no litoral.

Caso: 22-23 de dezembro de 2002

A ocorrência deste SCM, no nordeste da Argentina, foi ocasionada pela passagem de um sistema frontal no sul da América do Sul. Anabor et al. (2004) também analisaram o desenvolvimento de um SCM em decorrência da passagem de um sistema frontal, onde as condições atmosféricas encontradas foram semelhantes às encontradas neste trabalho. Por intermédio de simulação numérica foi verificado, na área de localização do SCM, um ambiente à superfície em que haviam ventos convergentes da circulação anticiclônica (pós-frontal) extratropical com ventos provenientes de escoamento tropical. O contraste de temperatura entre estes dois escoamentos intensificou o gradiente horizontal de temperatura no local onde ocorreu este SCM.

Ainda, o escoamento tropical, presente em todas as fases do SCM e nos três níveis analisados, trouxe umidade para o local.

Neste caso, os Jatos de Baixos Níveis (JBN) e Jatos de Altos Níveis (JAN) estiveram marcantes desde o início até a maturação do SCM, sendo que a maior parte da atividade convectiva se desenvolveu entre os dois jatos. Este acoplamento dos jatos favorece o aumento da instabilidade convectiva (Ucellini e Johnson, 1979). Berry e Inzunza (1993) e Campetella e Vera (2002) mostraram que a localização e orientação do escoamento em baixos níveis influenciam na intensidade da atividade convectiva no Sul da América do Sul.

Caso: 19-20 de dezembro de 2002

Este SCM se difere dos outros dois por ter se desenvolvido apenas por aquecimento continental, mas com influência de outras circulações atmosféricas. O SCM de formato quase circular desenvolveu-se no nordeste da Argentina, permanecendo com o seu núcleo convectivo desde a fase de formação até a maturação sobre o mesmo local. Apenas no estágio de dissipação este se deslocou para o Estado do Rio Grande do Sul. O nordeste da Argentina constitui um dos locais favoráveis para o desenvolvimento de SCM. Uma possível explicação para esta tendência se deve ao fato desta região estar localizada em ambiente predominantemente continental, à sotavento da Cordilheira dos Andes e abaixo do corredor dos JBN, que são encarregados de trazer ar quente e úmido da região tropical para as latitudes médias, alimentando a convecção local (Ferreira et al., 2003). O ciclo de vida do SCM aqui analisado apresentou características semelhantes aos SCM estudados por Nicolini e Torres (2002). Os autores analisaram 27 casos de SCM no sul da América do Sul, durante o período de outubro de 1998 à abril de 1993, e relataram que as principais características dos SCM foram que seu início ocorreu preferencialmente à tarde, à leste dos Andes, sendo claramente continental. Ainda, os SCM atingiram sua maturidade durante à noite e dissiparam-se na madrugada, com média de duração de 17 horas. A simulação do MM5 para este caso, também, foi bem sucedida. O modelo reproduziu as condições favoráveis para a ocorrência do SCM como: elevada temperatura (34°C), alto teor de umidade (20g/kg), convergência de ventos e escoamento de norte.

☞ DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS DESCARGAS ELÉTRICAS ATMOSFÉRICAS

A literatura mostra que é possível analisar as características de relação da ocorrência de Descargas Elétricas Atmosféricas em Sistemas Convectivos de Mesoescala. Isto porque Goodman e MacGorman (1986) relacionaram a ocorrência das DEA com a severidade das tempestades. Ainda, Clodman e Chisholm (1993) mostraram que as localizações de frequência máxima são bem coincidentes no tempo e no espaço. Rutledge e Petersen (1994) estudaram casos de SCM apenas na fase de maturação dos SCM (que é sujeita à maior eletrificação). Toracinta et al. (1996) fizeram observações de DEA em SCM e verificaram que a maior frequência da atividade elétrica ocorre nos estágios inicial e de maturidade do SCM, ou seja, associadas às áreas mais convectivas do SCM.

Infelizmente, todos estes argumentos vão de encontro aos resultados encontrados neste trabalho, quando se pretendia estudar a ocorrência de DEA em SCM, haja visto que não foi possível associar a distribuição espacial das DEA com o ciclo de vida de três SCM. É cabível comentar que Domingues et al. (2004) para estudar as características do tempo e do clima da região central do Brasil, utilizaram medidas experimentais realizadas em um sítio localizado em Miranda, uma cidade na região do Pantanal no Mato Grosso do Sul. No período de 14 a 23 de setembro de 1999, houve uma campanha intensiva de coleta de dados. O objetivo do trabalho foi analisar as condições de tempo local durante essa campanha. A análise baseou-se em imagens de satélite, documentação visual de elementos meteorológicos, perfis atmosféricos e dados de DEA detectadas pela antiga Rede Integrada de Detecção de Descargas Atmosféricas (RIDAT). Com relação a análise dos dados de DEA, os autores comentam que os valores de atividade elétrica registrados estavam subestimados devido à ineficiência do sistema de detecção na região do experimento.

Dado a situação em questão, buscaram-se possíveis explicações para os problemas encontrados com os dados de DEA oriundos do SIMEPAR na dissertação de Nacaratto (2001) que fez um estudo de relâmpagos no Brasil com base na análise de desempenho do sistema de localização de tempestades. Um dos objetivos daquele trabalho, foi o de avaliar o desempenho do sistema de localização de tempestades instalado na região sudeste do Brasil. O autor afirma que os resultados do trabalho são próprios para a região sudeste do Brasil e, com isso, tornam-se necessários estudos para outras regiões do Brasil.

Na seqüência são colocados alguns aspectos que possam estar relacionados com má qualidade dos dados de DEA utilizados nesta pesquisa.

1. A ocorrência de DEA em tempestades isoladas pode não ser detectada pelos sensores, porque a eficiência de detecção da rede de sensores não é uniforme em todas as direções devido à geometria espacial dos sensores. Desta forma, diferentes tempestades que venham a ocorrer em diferentes pontos da malha dos sensores, certamente apresentarão algumas variações nos dados de DEA associadas;
2. A existência de apenas um sensor IMPACT, pois este sensor apresenta tecnologia mais avançada que o LPATS. Avaliações nos sensores IMPACT revelaram que o desempenho da combinação dos métodos MDF e TOA supera o desempenho de cada método isoladamente, tanto na precisão de localização quanto na probabilidade de detecção, minimizando assim a probabilidade de obter-se uma localização completamente errada. No estudo de Nacaratto (2001) a rede de detecção da qual ele obteve os dados de DEA utilizaram três sensores IMPACT, sendo que um quarto estava com problemas;
3. Eficiência individual de cada sensor;
4. Consistência dos dados de localização;
5. Existem certas situações onde a geometria relativa entre os sensores e a DEA não produz bons resultados. Mais especificamente, no caso de uma DEA ocorrer justamente na reta que une dois sensores, e se for detectada apenas por esses dois sensores, então erros na medida do azimute podem levar a erros significativos de localização. Em algumas circunstâncias, é possível até que nem se obtenha uma solução válida (não há intersecção). Devido a esse problema, na prática, as redes de detecção devem possuir, pelo menos, três sensores com tecnologia MDF, ou seja, sensores do tipo IMPACT;
6. A distribuição espacial dos sensores apresenta um papel fundamental na precisão de localização de um sistema de detecção;

7. Nem todas as DEA são detectadas e informadas. Aquelas que apresentarem formas de onda incoerentes ou intensidade de sinal abaixo do limiar dos sensores, não serão informadas pelas antenas detectoras. Por outro lado, a localização de determinadas DEA não poderá ser calculada pelo sistema se os respectivos dados informados (pelos sensores) não puderem ser correlacionados, produzindo soluções erradas. Assim, a habilidade de um sistema de localização em detectar e informar as soluções das DEA (determinar suas localizações) é denominada eficiência de detecção da rede, a qual é calculada como uma porcentagem da quantidade real de DEA detectadas pela rede;
8. O SIMEPAR utiliza sensores LPATS de série III, sendo que já existe a série IV, de tecnologia mais avançada;
9. O sensor IMPACT permite minimizar a contaminação dos dados de DEA nuvem-solo por DEA intranuvem muito intensas e, eventualmente, por ruídos do ambiente passíveis de serem confundidos com DEA reais. Portanto, a participação de pelo menos um sensor IMPACT no cálculo da localização de um relâmpago diminui significativamente a possibilidade de registrar-se um evento que não seja uma DEA nuvem-solo real;
10. Descargas Elétricas Atmosféricas muito distantes da malha de sensores apresentam desvios das informações dos sensores e a incerteza da localização é muito grande;
11. As informações de DEA ocorridas no oceano são melhor aproveitadas pelo sistema que aquelas referentes a DEA no continente para uma mesma distância da rede de sensores. Isto deve-se à menor atenuação sofrida pela radiação eletromagnética ao se propagar sobre o oceano que sobre o continente;
12. Descargas Elétricas Atmosféricas que ocorrem muito próximas de um sensor tendem a saturá-lo, impedindo assim o registro dos parâmetros de sua forma de onda. Com isso, somente os sensores mais distantes podem detectar o sinal integral;
13. Os sensores, juntamente com a configuração da central de processamento, possuem um papel fundamental na melhoria da qualidade dos dados gerados pelo sistema.

5. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho consistiu na análise da ocorrência de Descargas Elétricas Atmosféricas (DEA) associadas a três Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) que ocorreram no Sul da América do Sul. Os resultados encontrados nos permitiram chegar às conclusões descritas na seqüência.

Embora dois anos de dados sejam insuficientes para obter conclusões definitivas, foi possível fazer uma avaliação qualitativa da ocorrência de DEA no Sul da América do Sul, durante os anos de 2002 e 2003. O ano de 2002 esteve influenciado pelo fenômeno El Niño, por isso foram detectadas, pela rede de sensores do SIMEPAR, as maiores quantidades de DEA. A alta temperatura em superfície foi fundamental, para manter a relação do maior número de DEA com os meses mais quentes. A menor ocorrência de DEA esteve nos meses mais frios, onde as temperaturas em superfície são menores. Devido ao fato de se ter utilizado um período de apenas dois anos de dados de DEA e pela influência do El Niño, não foi possível estabelecer um mês de preferência para a ocorrência de DEA.

Foram analisados três SCM influenciados por diferentes mecanismos: brisa marítima, sistema frontal e aquecimento continental.

Não foi possível associar satisfatoriamente as distribuições espaciais de DEA com o desenvolvimento dos SCM analisados. Várias hipóteses foram levantadas na tentativa de entender as causas deste resultado.

O modelo MM5 restituiu muito bem o estado da atmosfera, quando da ocorrência dos três SCM. Em todos os três casos, valores elevados de razão de mistura ($\geq 18 \text{ g / kg}$) foram observados no estado de máximo desenvolvimento, bem como a existência de um forte gradiente horizontal de temperatura na região onde o SCM estava localizado. Estes aspectos mostram que são necessários: alto teor de umidade e um estado baroclínico para a evolução dos SCM. O campo de vento foi fundamental para explicar a evolução dos três sistemas.

☞ *Sugestões para Pesquisas Futuras*

1. Investigar Descargas Elétricas Atmosféricas com resolução temporal maior.
2. Realizar um estudo sobre a climatologia dos Sistemas Convectivos Mesoescala no Sul da América do Sul.
3. Investigar o desempenho dos sensores de Descargas Elétricas Atmosféricas do SIMEPAR.
4. Estudar esquemas de parametrizações mais adequadas para retratar os Sistemas Convectivos Mesoescala que ocorrem no Sul da América do Sul, usando modelagem de mesoescala.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, J. A.; ARRIT, R. W. Mesoscale Convective Complex and Persistent Elongated Convective System over the United State during 1992 and 1993. **Monthly Weather Review**, v. 126, p. 577-599, 1998.

ABDOULAEV, S.; MARQUES, V. S.; PINHEIRO, F. M. A.; MARTINEZ, E. F. A.; LENSKAIA, O. Análise de sistemas de mesoescala utilizando dados de descargas nuvem-terra. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 19(1), 2001.

ANABOR, V; FERREIRA, C. C.; PAZ, S. R. Desenvolvimento de um Sistema Convectivo de Mesoescala associado ao deslocamento de uma frente fria pela costa do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13, Fortaleza. **Anais...**, 2004.

AUGUSTINE, J. A.; TOLLERUD, E. I.; JAMISON, B. D. Distributions and other general characteristics of Mesoscale Convective System during 1986 as determined from GOES infrared imagery. In: Conference on Weather Analysis and Forecasting, 12, p. 437-442, Monterey-USA. **Anais...**, 1989.

BENETI, C. A. A.; VASCONCELLOS, C. SISRAIOS – Um sistema interativo de análise e visualização de descargas elétricas atmosféricas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12, Foz do Iguaçu. **Anais...**, 2002.

BENETI, C. A. A.; 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, 12, Foz do Iguaçu. **Anais...**, 2002.

BERLATO, A. M.; FONTANA, D. C. **El Niño e La Niña – Impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul – Aplicações de previsões climáticas na agricultura**, 110p., Porto Alegre, 2003.

BERRY, G. J.; INZUNZA, J. B. The effect of low-level jet on the poleward water vapor transport in the central region on South America. **Atmospheric Environmental**, v. 27A (3), p. 335-341, 1993.

BOTELHO, C. B. **Análise dos Sistemas Convectivos de Mesoescala ocorridos em março/2002 no Estado do Rio Grande do Sul**. Pelotas, 109p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Faculdade de Meteorologia, Universidade Federal de Pelotas, 2004.

BYERS, H. R., BRAHAM, JR. **The Thunderstorm**. U. S. Coovernment Printing Office, 287p., Washington, 1949.

CAMPETELLA, C. M.; VERA, C.; The influence of Andes mountain on the South America low level flow. In: VAMOS/CLIVAR/WCRP Conference on South American Low-Level Jet. Santa Cruz de la Sierra. **Resumos...**, 2002.

CHOU, S. C. Modelo Regional ETA. **Climanálise Especial – Edição Comemorativa de 10 anos**. 1996.

CLIMANÁLISE – **Boletim de Monitoramento e Análise Climática**. v.17, n. 3, dezembro, 2002.

CLODMAN, S.; CHISHOLM, W. Storms with very high lightning density in the southern great lakes area. **Conference on Atmospheric Electricity**, p. 803-807, St. Louis, 1993.

CORFIDI, S. F. Cold pools and MCS propagation: Forecasting the motion of downwind – Developing MCSs. **Weather and Forecasting**, v. 18, n. 6, p. 997-1017, 2003.

COTTON, W. R.; ANTHES, R. A. **Storm and Cloud Dynamics**. Academic Press., 883p., 1989.

DINIZ, G. B.; CALVETTI, L. Recomposição de séries temporais de temperatura máxima e mínima de estações do Rio Grande do Sul e Santa Catarina usando análise multivariada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 10 e CONGRESSO DA FLISMET, 8, Brasília. **Anais...**, 1998.

DOMINGUES, M. O.; MENDES JR. O.; CHOU, S. C.; SÁ, L. D. A.; MANZI, A. O. Análise das condições atmosféricas durante a 2ª campanha do experimento interdisciplinar do Pantanal sul Mato-Grossense. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 19, n. 1, p. 73-88, 2004.

DUDHIA, J.; GILL, D.; GUO, Y. R.; MANNING, K.; BOURGEOIS, A.; WANG, W.; BRUYERE, C. **PSU/NCAR Mesoscale Modeling System. Tutorial Class Notes and User's Guide: MM5 Modeling System Version 3**. National Center for Atmospheric Research, 2002.

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, 224p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2002.

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, 123p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 1998.

FERREIRA, R. N.; RICKENBACH, T. M.; HERDIES, D. L.; CARVALHO, L. M. V. Variability of South America convective cloud system and tropospheric circulation during january-march 1998 and 1999. **Monthly Weather Review**, v. 131, n. 5, p. 961-973, 2003.

FREITAS, E. D.; SILVA DIAS, P. L. Desenvolvimento de brisa marítima sob condições de grande escala: Um estudo de caso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13, Fortaleza. **Anais...**, 2004.

FRITSCH, J. M.; KANE, R. J.; CHELIUS, C. R. The Contribution of mesoscale convective weather systems to the warm-season precipitation in the United States. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, p. 1333-1345, 1986.

GEERTS, B. Mesoscale Convective Systems in the Southeast United States during 1994-1195: A survey. **Weather and Forecasting**, v. 13, p. 860-869, 1998.

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, 11, Rio de Janeiro. **Anais...**, 2000.

GLOBAL ATMOSPHERIC. **Fotografia do sensor LPATS**. [on line].
< <http://www.glatmos.com/products/wide/lpats.html> > 17/06/2004.

GLOBAL ATMOSPHERIC. **Fotografia do sensor IMPACT**. [on line].
< <http://www.glatmos.com/products/wide/impact.html> > 17/06/2004.

GLOBAL ATMOSPHERIC. **Representação esquemática para a detecção de relâmpagos utilizando sensores IMPACT**. [on line].
< <http://www.glatmos.com/products/wide/impact.html> > 17/06/2004.

GOMES, M. A. S. S. **Estudo dos relâmpagos na Região Sudeste do Brasil em função das características geográficas**. São José dos Campos, 149p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2002.

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

GOODMAN, S. J.; CHRISTIAN, H. J.; RUST, W. D.; MACGORMAN, D. R.; ARNOLD, R. T. Simultaneous observations of cloud-to-ground lightning above and below cloud tops. **Preprints Seventh International Conference on Atmospheric Electricity**. American Meteorological Society, p. 456-462, 1984.

GOODMAN, S. J. Lightning activity associated with severes storms embedded within a mesoscale convective storm complex. **Preprints Thirteen Conference on Severe Local Storms, Tulsa**. American Meteorological Society, p. 29-32, 1983.

GUEDES, R. L. **Condições de grande escala associadas a Sistemas Convectivos de Mesoescala sobre a região central da América do Sul**. São Paulo, 89p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, 1985.

GRIMM, A. M.; PSCHIEDT, I. Padrões atmosféricos associados a eventos severos de precipitação no sul do Brasil durante El Niño, La Niña e Anos Neutros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13, Fortaleza. **Anais...**, 2004.

HOLLE, R. L.; WATSON, A. I.; LÓPEZ, R. E.; MACGORMAN, D. R.; ORTIZ, R.; OTTO, W. D. The life cycle of lightning and severe weather in a 3-4 June 1985 PRE-STORM mesoscale systems. **Monthly Weather Review**, v. 122, n. 8, p. 1798-1808, 1994.

HOUZE JR., R. A.; RUTLEDGE, S. A.; BIGGERSTAFF, M. I.; SMULL, B. F. Interpretation of Doppler weather-radar displays in midlatitude Mesoscale Convective Systems. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 70, p. 608-619, 1989.

HOUZE JR., R. A.; SMULL, B. F.; DODGE, P. Mesoscale organization of springtime rainstorms in Oklahoma. **Monthly Weather Review**, v. 118, p. 613-654, 1990.

HOUZE JR., R. A. **Cloud Dynamics**. Academic Press., 570p., 1993.

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

JIRAK, I. L.; COTTON, W. R.; McANELLY, R. L. Satellite and radar survey of Mesoscale Convective System development. **Monthly Weather Review**, v. 131, n. 10, p. 2428-2449, 2003.

JORGENSEN, D. P.; WECKWERTH, T. M. Forcing and organization of convective systems. **Meteorological Monographs**, v. 30, n. 52, 75p., 2003.

KANE, R. J.; CHELIUS, C. R.; FRITSH, J. M. Precipitation characteristics of mesoscale convective weather systems. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, p. 1345-1357, 1987.

KNIEVEL, J. C.; JOHNSON, R. The kinematics of a midlatitude, continental Mesoscale Convective System and its mesoscale vortex. **Monthly Weather Review**, v. 130, n. 7, p. 1749-1770, 2002.

LAING, A. G.; FRITSCH, J. M. The global population of Mesoscale Convective Complexes. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 123, p. 389-405, 1997.

LAURENT, H.; MACHADO, L. A. T.; HERDIES, D.; MORALES, C. Características dos sistemas convectivos observados por satélite durante o experimento WETAMC/LBA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11, Rio de Janeiro. **Anais...**, 2000.

LEMOS, C. F.; CALBET, N. O. Sistemas frontais que atuaram no litoral do Brasil (período 1987-1995). **Climanálise Especial – Edição Comemorativa de 10 anos**. Cap. 14, 1996.

LIMA, E. C. S. **Análise de um Complexo Convectivo de Mesoescala (CCM) observado na região norte da Argentina no dia 27 de novembro de 2002: Um estudo de caso utilizando o modelo RAMS**. Pelotas, 91p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Faculdade de Meteorologia, Universidade Federal de Pelotas, 2004.

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, 1995.

MACHADO, L. A. T.; ROSSOW, W. B.; GUEDES, R. L.; WALKER, A. W. Life cycle variations of Mesoscale Convective Systems over the Americas. **Monthly Weather Review**, v. 126, n. 6, p. 1630-1654, 1998.

MACHADO, L. A. T.; GUEDES, R. L.; SILVEIRA, J. M. B.; WALTZ, R. C.; ALVES, M. A. S. Ciclo de vida de sistemas convectivos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 8, Belo Horizonte. **Anais...**, 1994.

MADDOX, R. A. Mesoscale Convective Complexes. **Bulletin of the American Meteorological Society**, p. 1374-1387, 1980.

MASON, B. J. The generation of electric charges and fields in thunderstorms. **Proceedings Research Society London**, Ser. A, v. 415, p. 303-315, 1988.

MOREL, C.; SENESI, S. A climatology of Mesoscale Convective Systems over Europe using satellite infrared imagery. I: Methodology. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 128, p. 1973-1995, 2002.

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

NACHAMKIN, J. E.; COTTON, W. R. Interaction between a developing Mesoscale Convective System and Its environment. Part II: Numerical simulations. **Monthly Weather Review**, v. 128, n. 5, p. 1225-1244, 2000.

NERY, J. T.; VARGAS, W. M.; MARTINS, M. L. O. F. Variabilidade interanual da precipitação no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 12, n. 1, p. 49-62, 1997.

NICOLINI, M.; TORRES, J. C. A composite of Mesoscale Convective Systems over southern South America and its relationship to low-level jet events. VAMOS/CLIVAR/WCRP Conference on South American low-level jet. Santa Cruz de la Sierra. **Resumos...**, 2002.

NIELSEN, K. E.; MADDOX, R. A.; VASILOFF, S. V. The evolution of cloud-to-ground lightning within a portion of the 10-11 June 1985 squall line. **Monthly Weather Review**, v. 122, n. 8, p. 1809-1817, 1994.

OLIVEIRA, A. **Interações entre sistemas frontais na América do Sul e a convecção da Amazônia**. São José dos Campos, 115p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 1986.

PINTO JR., O.; PINTO, I. R. C. A. **Tempestades e Relâmpagos no Brasil**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 196p., São Paulo, 2000.

REAP, R. M. A Analysis and prediction of lightning strike distributions associated with synoptic map types over Florida. **Monthly Weather Review**, v. 122, n. 8, p. 1698-1715, 1994.

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, 1989.

REIS, R. J.; PINTO JR., O. Verificação da influência dos fenômenos El Niño e La Niña na distribuição espacial das descargas atmosféricas em Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12, Foz do Iguaçu. **Anais...**, 2002.

RUTLEDGE, S. A.; PETERSEN, W. A. Vertical radar reflectivity structure and cloud-to-ground lightning in the stratiform region of MCSs: further evidence for in situ charging in the stratiform region. **Monthly Weather Review**, v. 122, n. 8, p. 1760-1776, 1994.

SANSIGOLO, C. A.; DINIZ, G. B.; SALDANHA, R. L. Influência dos eventos El Niño e La Niña no regime de precipitação de Pelotas-RS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 15, n. 1, p. 69-75, 2000.

SANTOS, A. F.; CORREA, E. B.; CATALDI, M. Análise e simulação numérica de um caso de Jato de Baixos Níveis com a utilização do modelo MM5. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13, Fortaleza. **Anais...**, 2004.

SCAGLIONI, T. P.; SARAIVA, J. M. B. Climatologia dos sistemas precipitantes para o período de fevereiro a dezembro de 2003, no Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13, Fortaleza. **Anais...**, 2004.

SCHIESSER, H. H.; HOUZE JR., R. A.; HUNTRIESER, H. The mesoscale structure of severe precipitation systems in Switzerland. **Monthly Weather Review**, v. 123, p. 2070-2097, 1995.

STEIGER, S. M.; ORVILLE, R. E. Cloud-to-ground lightning characteristics over Houston, Texas: 1989-2000. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. D11, p. ACL 2 -13, 2002.

STOLZENBURG, M. Observations of high ground flash densities of positive lightning in summertime thunderstorms. **Monthly Weather Review**, v. 122, n. 8, p. 1740-1750, 1994.

TORACINTA, E. R.; MOHR, K. I.; ZIPSER, E. J. A comparasion of wsr-88D reflectivities, SSM/I brightness temperatures, and lightning for Mesoscale Convective System in Texas. Part 1: Radar reflectivity and lightning. **Journal Applied Meteorology**, v. 35, n. 6, p. 902-918, 1996.

TRIPOLI, G. J.; COTTON, W. R. A numerical investigation of severe factors contributing to the observed variable intensity of deep convection over South Florida. **Journal of Applied Meteorology**, v. 19, n. 9, p. 1037-1063, 1980.

TRIPOLI, G. J.; COTTON, W. R. Numerical study of an observed orographic Mesoscale Convective System. Part I: Simulated genesis and comparasion with observations. **Monthly Weather Review**, v. 117, n. 2, p. 273-304, 1989.

TUCKER, D. F.; CROOK, N. A. The generation of a Mesoscale Convective System from mountain convection. **Monthly Weather Review**, v. 127, n. 6, p. 1259-1273, 1999.

UCCELLINI, L. W.; JOHNSON, D. R. The coupling of uper and lower tropospheric jet streak and implications for development of severe convective storms. **Monthly Weather Review**, v. 107, p. 682-703, 1979.

VELASCO, I.; FRITSCH, J. M. Mesoscale Convective Complexes in the Americas. **Journal of Geophysical Research**, v. 92, p. 9591-9613, 1987.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia Básica e Aplicações**. Universidade Federal de Viçosa. Imprensa Universitária. Viçosa- Minas Gerais, 449p., 1991.

VOLLAND, H. Quasi electrostatic fields within the atmosphere. In: ____ ed. **Handbook of Atmospheric**. Florida, v. 1, p. 65-110, 1982.

VOLLAND, H. **Atmospheric Electrodynamics**: New York. Springer-Verlag, 1984.

WATSON, A. I.; LÓPEZ, R. E.; HOLLE, R. L. Diurnal cloud-to-ground lightning patterns in Arizona during the southwest monsoon. **Monthly Weather Review**, v. 122, n. 8, p. 1716-1725, 1994.

WILLIAMS, E. R. The electrification of thunderstorms. **Scientific American**, v. 259, n. 5, p. 48-65, 1988.

ZHANG, Q. H.; LAU, K. H.; KUO, Y. H.; CHEN, S. J. A numerical study of a Mesoscale Convective System over the Twain Strait. **Monthly Weather Review**, v. 131, p. 1150-1170, 2003.