

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

**Estimativa de Descargas Elétricas através de Simulações  
Numéricas com o WRF**

**Mayara Oliveira dos Santos**

**Dissertação de Mestrado**

**Orientadora  
Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Rita Yuri Ynoue**

**São Paulo  
2014**



Mayara Oliveira dos Santos  
Bacharel em Meteorologia

## **Estimativa de Descargas Eléctricas através de Simulações Numéricas com o WRF**

Orientadora:  
Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. **RITA YURI YNOUE**

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

**Versão Corrigida. O original encontra-se disponível  
na Unidade.**

**São Paulo  
2014**



*Dedico este trabalho aos meus pais,  
**Kátia Aparecida Oliveira dos Santos e Luiz Octávio Teixeira dos Santos,**  
os quais sempre me apoiaram e incentivaram.*



## AGRADECIMENTOS

- À minha orientadora, Dra. Rita Yuri Ynoue, pela proposta de pesquisa, orientação, e conhecimentos transmitidos. Sua dedicação e objetividade foram fundamentais para a conclusão deste trabalho. Pelas horas extras e a compreensão despendidas. Pelas discussões que embasaram e enriqueceram o trabalho aqui apresentado.

- À CAPES pela concessão da bolsa de Mestrado e apoio financeiro para participação em congressos.

- Aos meus pais, Kátia e Luiz, que sempre me apoiaram e incentivaram incondicionalmente, me motivando a ser perseverante na busca dos meus sonhos. Sem seu trabalho, esforço e dedicação eu não chegaria até aqui. Em especial, pela confiança em mim depositada. À toda minha família pelo apoio, atenção e confiança, especialmente ao meu avô Aduino, às minhas avós Amarílis e Lucila e à minha bisavó Odila.

- Aos professores do Departamento de Ciências Atmosféricas, pelo aprendizado e convivência ao longo da minha formação acadêmica. Em especial, à professora Rosmeri Porfírio da Rocha pelos conhecimentos transmitidos durante a Iniciação Científica, pelas discussões, sugestões e auxílio com os modelos numéricos e pela disponibilização de seus computadores, através dos quais muitos dos resultados aqui apresentados foram gerados, ao professor Ricardo Hallak, pelas críticas e sugestões realizadas durante o Exame de Qualificação, às quais contribuíram para o desenvolvimento de trabalho e ao professor Edmilson Dias de Freitas, pela disponibilização de seus computadores.

- Ao professor Carlos Augusto Morales Rodrigues pelas críticas e sugestões durante o Exame de Qualificação. Pelo conhecimento transmitido através das discussões realizadas ao longo deste trabalho e através das sugestões de leitura, os quais foram de grande importância para o desenvolvimento e conclusão deste projeto.

- Ao Instituto Tecnológico Simepar, pelo fornecimento dos dados de descargas elétricas, amplamente utilizados neste trabalho.

- Ao Dr. José Roberto Rozante pelo fornecimento dos dados de precipitação diária do MERGE.

- À estação meteorológica do IAG, pelo fornecimento dos dados horários de temperatura.
  
- A todos os funcionários do IAG, pela convivência e amizade ao longo dos últimos anos. Especialmente, aos técnicos da seção de informática do departamento, pelo auxílio com as questões computacionais, fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.
  
- Aos meus grandes e queridos amigos, com os quais vivi momentos incríveis e inesquecíveis e que contribuíram profundamente para o desenvolvimento deste trabalho, não somente pelas tantas discussões sobre assuntos diversos, mas também por ter tornado tão prazerosa esta etapa da minha vida: Alessandra, Fabíola, Giulia, Graziella, Leonardo, Márcia, Pamela, Rafael, Renato, Tássio e Thiago. Em especial à Alessandra, pela atenção, paciência, compreensão, incentivo e companheirismo dedicados em todos os momentos ao longo de nossa amizade e à Tathiane pela força, incentivo e companheirismo dedicados ao longo de muitos anos, mesmo nos momentos mais difíceis de sua vida.

*“A educação é a mais poderosa arma  
pela qual se pode mudar o mundo.”*

*Nelson Mandela*



## SUMÁRIO

RESUMO.....	XII
ABSTRACT.....	XIV
LISTA DE FIGURAS .....	XVI
LISTA DE TABELAS.....	XX
1.1 – Introdução .....	1
1.1 – Objetivo.....	4
2.0 – Revisão Bibliográfica.....	5
2.1 – Estrutura Elétrica das Tempestades.....	5
2.2 – Processos Microfísicos e Termodinâmicos.....	6
2.3 – Mecanismos de Eletrificação das Tempestades.....	8
2.4 – Tipos de Descargas Elétricas.....	10
3.0 – Metodologia.....	11
3.1 – Dados.....	11
3.2.0 – O Modelo Weather and Forecasting Research – WRF.....	12
3.2.1 – Parametrização de Convecção.....	16
3.2.2 – Parametrização de Microfísica.....	17
3.3.0 – O Lightning Potential Index – LPI.....	17
4.0 – Resultados.....	19
4.1 – Análise dos Dados de Descargas Elétricas da RINDAT.....	19
4.2 – Estudos de Caso para Avaliação do LPI em Simulações com Altas Resoluções Espaço-Temporais.....	26
4.3 – Avaliação do LPI e dos Hidrometeoros em Simulações de Menores Resoluções Espaço-Temporais.....	38
4.3.1 – Análise Binária Espacial.....	41
4.3.2 – Comparação da evolução temporal das descargas elétricas com o perfil vertical dos hidrometeoros e da velocidade vertical.....	50
4.3.3 – Comparação entre as distribuições espaciais de descargas elétricas, LPI e componentes convectiva e não convectiva da precipitação.....	64
4.3.4 – Análises Quantitativas.....	68
4.3.5 – Avaliação da simulação numérica do mês de janeiro de 2011.....	79
4.4 – Discussão dos Resultados.....	91
5.0 – Conclusões.....	100

6.0 – Sugestões para Trabalhos Futuros.....	103
7.0 – Referências.....	104

## RESUMO

Santos, M. O. **Estimativa de Descargas Eléctricas através de Simulações Numéricas com o WRF**. 2013. 106f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

Este trabalho teve como objetivo avaliar a possibilidade de se utilizar um modelo numérico de simulação atmosférica para a estimativa de ocorrência de descargas eléctricas geradas pelas nuvens de tempestades. Particularmente, pretende-se analisar o impacto da resolução espaço-temporal da simulação na eficiência desta estimativa. Para tal foram realizadas diferentes experimentos numéricos variando a abrangência das resoluções espacial e temporal aplicadas. As simulações foram realizadas com o modelo *Weather and Forecasting Research* (WRF) e comparadas às descargas eléctricas do tipo nuvem-solo detectadas pela Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT). O *Lightning Potential Index* (LPI), proposto por Yair et al. (2010) foi utilizado para estimar o potencial de atividade eléctrica das simulações numéricas realizadas. As simulações numéricas foram classificadas em dois grupos, o primeiro deles, caracterizado por grades de maior resolução espacial-temporal (o menor domínio com 3 km x 3 km de espaçamento horizontal e passo no tempo de 16,7 segundos) onde foram simulados três casos de tempestades ocorridas sobre o norte do Paraná e sudeste do Brasil. O segundo grupo constitui-se de simulações que abrangem os meses de janeiro de 2010 e janeiro de 2011, realizadas em uma grade de menor resolução espacial-temporal (o menor domínio com 5 km x 5 km de espaçamento horizontal e passo no tempo de 20 segundos). Outro fator que distingue estas simulações é a utilização da parametrização de convecção no segundo grupo de simulações, juntamente com a parametrização de microfísica, ao passo que no primeiro grupo foi aplicada somente a parametrização de microfísica. Os resultados obtidos mostraram que, no caso das simulações de maior resolução espacial-temporal, os parâmetros atmosféricos reproduzidos pelo WRF são coerentes com a atividade eléctrica observada, de forma que o LPI apresenta desempenho satisfatório, em termos qualitativos e quantitativos, ao estimar a ocorrência de descargas eléctricas. Ao avaliar os resultados obtidos para as simulações de menor resolução espacial-temporal, às quais foi aplicada a parametrização de convecção, conclui-se que o WRF também foi capaz de reproduzir, em termos qualitativos, padrões atmosféricos coerentes com a atividade eléctrica observada. Entretanto, não foi possível obter uma relação quantitativa entre os valores obtidos para o LPI e para as demais variáveis simuladas com os totais de descargas eléctricas observados. Dentre os motivos propostos para este fato estão (i) a inabilidade do WRF em simular nuvens e seus respectivos hidrometeoros, incluindo chuva; (ii) a utilização de valores horários instantâneos das variáveis simuladas em comparação com acumulados horários de descargas eléctricas e (iii) a utilização de uma base de comparação composta somente pelas descargas do tipo nuvem-solo. Ao final destas análises, conclui-se que a eficiência apresentada pelo WRF em reproduzir os padrões atmosféricos verificados a partir dos dados de descargas eléctricas da RINDAT difere entre os dois grupos de simulações numéricas realizadas, as quais se distinguem não somente pelas resoluções de espaço e tempo aplicadas, mas também pela inclusão ou não da parametrização de convecção no conjunto de parametrizações resolvidas durante seus respectivos processamentos.

**Palavras-chave:** descargas eléctricas, WRF, microfísica de nuvens, LPI.



## ABSTRACT

Santos, M. O. **Estimating Electrical Discharge through Numerical Simulations with WRF**. 2013. 106f. Thesis (Master) - Institute of Astronomy, Geophysics and Atmospheric Sciences, University of São Paulo, São Paulo, 2013.

In this study the possibility of using an atmospheric numerical model to estimate the occurrence of electrical discharges generated by thunderstorms was evaluated. Particularly, we intend to analyze the impact of spatio-temporal resolution of the simulation in the efficiency of this estimate. Different numerical experiments were performed varying the range of spatial and temporal resolutions applied. The simulations were performed using the Weather Research and Forecasting model (WRF) and were compared to the cloud-to-ground lightning detected by the *Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas* (RINDAT). The Lightning Potential Index (LPI) proposed by Yair et al. (2010) was used to estimate the potential of electrical activity from the numerical simulations. The numerical simulations were classified into two groups, the first one characterized by higher spatial and temporal resolution grids (the smallest domain had 3 km horizontal spacing and time step of 16.7 seconds) where three storm cases were simulated over northern Paraná and southeast Brazil. The second group consists of simulations covering the months of January 2010 and January 2011, performed on a grid of smaller spatial and temporal resolutions (the smallest domain with 5 km horizontal spacing and time step of 20 seconds). Another factor that distinguishes these simulations is the use of convection parameterization in the second group of simulations, besides the microphysics parameterization, while for the first group only microphysics parameterization was activated. The results showed that in the case of simulations of higher spatial and temporal resolutions, atmospheric parameters reproduced by WRF are consistent with the observed electrical activity, so that the LPI performed well in estimating the occurrence electrical discharges. For simulations with lower spatial and temporal resolutions, WRF was also able to reproduce, qualitatively, weather patterns consistent with the observed electrical activity. However, it was not possible to obtain a quantitative relationship between the values obtained for the LPI or other variables simulated with lightning observations. Some reasons could be: i) the lack of skill of WRF in simulating clouds and hydrometeors, including rain, ii) use of instantaneous hourly values of WRF variables compared with hourly cumulative lightning; and iii) comparison data was composed only by cloud-to-ground lightning type. It is concluded that WRF efficiency in reproducing atmospheric patterns associated to RINDAT observed electrical discharges differs between the two groups of numerical simulations carried out, which are distinguished not only by resolutions of space and time, but also by the inclusion or not of convection parameterization in the set of parameterizations resolved during their processing.

**Keywords:** lightning, WRF, cloud microphysics, LPI.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação da estrutura elétrica das tempestades de acordo com o modelo tripolar (a) e com o modelo multipolar (b). (Fonte: Zepka (2010); Stolzenburg, Rust e Marshall (1998)).	5
Figura 2.2 – Representação da distribuição dos hidrometeoros ao longo da estrutura vertical da tempestade, indicando sucintamente os tipos de hidrometeoros que constituem cada uma de suas camadas. (Fonte: The COMET Program).	7
Figura 3.1 - Eficiência de detecção da RINDAT calculada através do DEM ( <i>Detection Efficiency Model</i> ) para descargas com pico de corrente entre 5 e 10 kA. (Fonte: NACCARATO; PINTO JR.; PINTO (2006)).	11
Figura 3.2 – Representação da coordenada $\eta$ do núcleo ARW. (Fonte: SKAMAROCK et al., (2008)).	13
Figura 3.3 – Representação da discretização espacial utilizada no ARW, baseada no esquema da grade C de Arakawa. (Fonte: SKAMAROCK et al. (2008)).	14
Figura 3.4 - Representação das áreas compreendidas pelas grades 1 e 2 das simulações do modelo WRF.	15
Figura 4.1- Média mensal (a), acumulado mensal de descargas elétricas (b) detectadas pela RINDAT durante os 29 meses contidos no período entre novembro de 2009 e março de 2012.	19
Figura 4.2 - Total de descargas elétricas detectadas pela RINDAT entre novembro de 2009 e março de 2012 (a). Os dados de descargas elétricas foram alocados em uma grade de 5 km x 5 km de espaçamento horizontal. Topografia (metros) da grade 2 das simulações do modelo WRF (5 km x 5 km de espaçamento horizontal) (b).	21
Figura 4.3 - Ciclo diário (médias horárias) das descargas elétricas ( $10^3 \text{ h}^{-1}$ ) detectadas pela RINDAT em cada um dos 12 meses do ano, para o período entre novembro de 2009 a março de 2012.	22
Figura 4.4 – Distribuição espacial do acumulado de descargas elétricas detectadas pela RINDAT para os meses de janeiro de 2010 (a) e janeiro de 2011 (b). Os dados de descargas elétricas foram alocados em uma grade de 5 km x 5 km de espaçamento horizontal.	24
Figura 4.5 – Ciclo diário (médias horárias) das descargas elétricas ( $10^3 \text{ h}^{-1}$ ) detectadas pela RINDAT para os meses de janeiro de 2010 (a) e janeiro de 2011 (b).	26
Figura 4.6 – Descargas elétricas (a) e LPI (b) ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ) acumulados durante as 18 horas de simulação numérica do caso 1, ocorrido em 19 de janeiro de 2010.	28
Figura 4.7 – Evolução temporal de descargas elétricas (série em vermelho) e de LPI ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ) (série em azul) ao longo das 18 horas avaliadas para o caso 1.	28
Figura 4.8 – Descargas elétricas (a) e LPI ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ) (b) acumulados durante as 18 horas de simulação numérica do caso 2, ocorrido em 25 de fevereiro de 2011.	30

Figura 4.9 – Evolução temporal de descargas elétricas (série em vermelho) e de LPI ( $m^2.s^{-2}$ ) (série em azul) ao longo das 18 horas avaliadas para o caso 2.....	31
Figura 4.10 – Descargas elétricas (a) e LPI ( $m^2.s^{-2}$ ) (b) acumulados durante as 18 horas de simulação numérica do caso 3, ocorrido em 14 de novembro de 2011.....	32
Figura 4.11 - Evolução temporal de descargas elétricas (série em vermelho) e de LPI ( $m^2.s^{-2}$ ) (série em azul) ao longo das 18 horas avaliadas para o caso 3.....	33
Figura 4.12 – Conclusão. Cartas sinóticas de superfície (à esquerda), médios (ao centro) e altos (à direita) níveis para as 18 horas da data de ocorrência dos casos 1, 2 e 3. Nas cartas de superfície são apresentadas as linhas de pressão constante ao nível do mar. As cartas de médios e altos níveis apresentam as linhas de altura geopotencial (dm) e as isotacas aos níveis de 500 hPa e 250 hPa, respectivamente. As cartas de médios níveis contêm também as isotermas e a magnitude do vento em 500 hPa. As cartas de 250 hPa contêm a magnitude do vento e o posicionamento do Jato Subtropical e dos ramos norte e sul do Jato Polar (CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS – CPTEC (2013)).....	37
Figura 4.13 - Evolução temporal da quantidade de pontos de grade que atende aos critérios estabelecidos para ice (curva em verde), snow (curva em azul), graupel (curva em vermelho) e descargas elétricas (curva em preto) para a simulação do mês de janeiro de 2010.....	44
Figura 4.14 - Evolução temporal da quantidade de pontos de grade que atende aos critérios estabelecidos para rainc (curva em azul), rainnc (curva em verde), LPI (curva em vermelho), velocidade vertical (curva em roxo) e descargas elétricas (curva em preto) para a simulação do mês de janeiro de 2010.....	46
Figura 4.15 - Correlação entre as variáveis simuladas e a série de descargas elétricas obtidas para defasagens de 0 a 23 horas para a simulação de janeiro de 2010.....	48
Figura 4.16 – Distribuição vertical dos valores de razão de mistura de ice ( $kg.kg^{-1}$ ) (a) e evolução temporal dos valores de descargas elétricas (b) acumulados na área apresentada nas imagens da figura 4.4 para o período entre 00 UTC do dia 25 de janeiro de 2010 e 23 UTC do dia 28 de janeiro de 2010.....	51
Figura 4.17- Distribuição vertical dos valores de razão de mistura de snow ( $kg.kg^{-1}$ ) (a) e evolução temporal dos valores de descargas elétricas (b) acumulados na área apresentada nas imagens da figura 4.4 para o período entre 00 UTC do dia 25 de janeiro de 2010 e 23 UTC do dia 28 de janeiro de 2010.....	52
Figura 4.18 – Distribuição vertical dos valores de razão de mistura de graupel ( $kg.kg^{-1}$ ) (a) e evolução temporal dos valores de descargas elétricas (b) acumulados na área apresentada nas imagens da figura 4.4 para o período entre 00 UTC do dia 25 de janeiro de 2010 e 23 UTC do dia 28 de janeiro de 2010.....	53

- Figura 4.19 - Distribuição vertical dos máximos da componente vertical do vento ( $m.s^{-1}$ ) verificado sobre a área apresentada nas imagens da figura 4.4 (a) e evolução temporal dos valores de descargas elétricas nesta mesma região para o período entre 00 UTC do dia 25 de janeiro de 2010 e 23 UTC do dia 28 de janeiro de 2010.....54
- Figura 4.20 – Evolução temporal dos valores simulados para as variáveis do modelo WRF, acumulados na área da figura 4.4, para o período entre 00 UTC do dia 25 de janeiro de 2010 e 23 UTC do dia 28 de janeiro de 2010. Os valores referentes à razão de mistura de graupel ( $kg.kg^{-1}$ ), à razão de mistura de ice ( $kg.kg^{-1}$ ) e à razão de mistura de snow ( $kg.kg^{-1}$ ) foram acumulados na coluna vertical do modelo. As séries relativas aos valores de ice (curva em verde), snow (curva em azul claro), graupel (curva em preto), LPI ( $m^2.s^{-2}$ ) (curva em vermelho), precipitação convectiva – rainc (mm) (curva em rosa), precipitação não convectiva – rainnc (mm) (curva em roxo) e descargas elétricas observadas – raios (curva em laranja) correspondem aos acumulados em cada ponto de grade da figura 4.4, a cada hora. O valor horário relativo à componente vertical da velocidade do vento ( $m.s^{-1}$ ) (curva em azul) representa a maior, na região apresentada pela figura 4.4, das médias obtidas entre os níveis de 0 e 10 km de altura em cada ponto de grade do modelo.....56
- Figura 4.21 – Evolução temporal dos valores simulados para as variáveis do modelo WRF, acumulados na área da figura 4.4, para o período entre 00 UTC do dia 9 de janeiro de 2010 e 23 UTC do dia 12 de janeiro de 2010. Os valores referentes à razão de mistura de graupel ( $kg.kg^{-1}$ ), à razão de mistura de ice ( $kg.kg^{-1}$ ) e à razão de mistura de snow ( $kg.kg^{-1}$ ) foram acumulados na coluna vertical do modelo. As séries relativas aos valores de ice (curva em verde), snow (curva em azul claro), graupel (curva em preto), LPI ( $m^2.s^{-2}$ ) (curva em vermelho), precipitação convectiva – rainc (mm) (curva em rosa), precipitação não convectiva – rainnc (mm) (curva em roxo) e descargas elétricas observadas – raios (curva em laranja) correspondem aos acumulados em cada ponto de grade da figura 4.4, a cada hora. O valor horário relativo à componente vertical da velocidade do vento ( $m.s^{-1}$ ) (curva em azul) representa a maior, na região apresentada pela figura 4.4, das médias obtidas entre os níveis de 0 e 10 km de altura em cada ponto de grade do modelo.....58
- Figura 4.22 - Totais acumulados durante as 24 horas do dia 26 de janeiro de 2010 para os valores de LPI ( $m^2.s^{-2}$ ) (a), descargas elétricas detectadas pela RINDAT (b), precipitação convectiva (mm) (c) e precipitação não convectiva (mm) (d).....65
- Figura 4.23 - Totais acumulados durante as 24 horas do dia 09 de janeiro de 2010 para os valores de LPI ( $m^2.s^{-2}$ ) (a), descargas elétricas detectadas pela RINDAT (b), precipitação convectiva (mm) (c) e precipitação não convectiva (mm) (d).....67

Figura 4.24 – Relações de dispersão obtidas entre os acumulados horários de descargas elétricas observadas (eixo das abscissas) e os acumulados horários das séries de precipitação convectiva ( $\text{mm.h}^{-1}$ ) (a), precipitação não convectiva ( $\text{mm.h}^{-1}$ ) (b), razão de mistura de ice ( $\text{kg.kg}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ) (c), razão de mistura de snow ( $\text{kg.kg}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ) (d), razão de mistura de graupel ( $\text{kg.kg}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ) (e), componente vertical da velocidade do vento ( $(\text{m.s}^{-1}).\text{h}^{-1}$ ) (f) e LPI ( $(\text{m}^2.\text{s}^{-2}).\text{h}^{-1}$ ) (g), nos eixos das coordenadas de cada um dos gráficos apresentados. Valores correspondentes ao período entre 14 e 02 UTC de cada dia do mês de janeiro de 2010. Horários com acumulados de descargas menores que 3 aparecem em vermelho, aqueles com acumulados entre 3 e 38 aparecem em amarelo, entre 39 e 272 aparecem em verde e horários com acumulados maiores que 272 aparecem em preto, representando assim, respectivamente, os grupos SR, CAT1, CAT2 e CAT3 classificados de acordo com os percentis da tabela 4.9.....72

Figura 4.25 – Relações de dispersão obtidas entre os acumulados horários de descargas elétricas observadas (eixo das abscissas) e os acumulados horários das séries de precipitação convectiva ( $\text{mm.h}^{-1}$ ) (a), precipitação não convectiva ( $\text{mm.h}^{-1}$ ) (b), razão de mistura de ice ( $\text{kg.kg}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ) (c), razão de mistura de snow ( $\text{kg.kg}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ) (d), razão de mistura de graupel ( $\text{kg.kg}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ) (e), componente vertical da velocidade do vento ( $(\text{m.s}^{-1}).\text{h}^{-1}$ ) (f) e LPI ( $(\text{m}^2.\text{s}^{-2}).\text{h}^{-1}$ ) (g), nos eixos das coordenadas de cada um dos gráficos apresentados. Valores correspondentes ao período entre 14 e 02 UTC de cada dia do mês de janeiro de 2011. Horários com acumulados de descargas menores que 3 aparecem em vermelho, aqueles com acumulados entre 3 e 38 aparecem em amarelo, entre 39 e 272 aparecem em verde e horários com acumulados maiores que 272 aparecem em preto, representando assim, respectivamente, os grupos SR, CAT1, CAT2 e CAT3 classificados de acordo com os percentis da tabela 4.9.....84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Esquemas utilizados na realização das simulações numéricas com o WRF.....	16
Tabela 4.1 - Características espaço-temporais e de interação entre as grades utilizadas na simulação numérica do caso 1, ocorrido em 19 de janeiro de 2010.....	27
Tabela 4.2 - Características espaço-temporais e de interação entre as grades utilizadas na simulação numérica do caso 2, ocorrido em 25 de fevereiro de 2011.....	29
Tabela 4.3 - Características espaço-temporais e de interação entre as grades utilizadas na simulação numérica do caso 3, ocorrido em 14 de novembro de 2011.....	32
Tabela 4.4 – Características espaço-temporais e de interação entre as grades utilizadas nas simulações numéricas dos meses de janeiro de 2010 e janeiro de 2011.....	41
Tabela 4.5 – Síntese dos critérios aplicados aos valores horários de cada variável na construção do campo binário.....	43
Tabela 4.6 - Defasagens temporais consideradas na avaliação das séries temporais das variáveis simuladas pelo modelo para os meses de janeiro de 2010 e 2011.....	49
Tabela 4.7 – Resumo dos resultados obtidos a partir dos critérios estabelecidos para análise dos acumulados de descargas elétricas detectadas pela RINDAT e das distribuições verticais horárias dos valores de razão de mistura de ice, razão de mistura de snow, razão de mistura de graupel e componente vertical da velocidade do vento e para os acumulados horários de precipitação convectiva e não convectiva resultantes da simulação do WRF para o período entre 12 e 00 UTC do mês de janeiro de 2010.....	61
Tabela 4.8 – Resumo dos resultados obtidos a partir dos critérios estabelecidos para análise dos acumulados de descargas elétricas detectadas pela RINDAT e das distribuições verticais horárias dos valores de razão de mistura de ice, razão de mistura de snow, razão de mistura de graupel e componente vertical da velocidade do vento e para os acumulados horários de precipitação convectiva e não convectiva resultantes da simulação do WRF para o período entre 00 e 12 UTC do mês de janeiro de 2010.....	62
Tabela 4.9 – Percentis representativos dos acumulados horários descargas elétricas detectadas pela RINDAT durante as 24 horas de cada um dos 31 dias dos meses de janeiro de 2010, 2011 e 2012. Os percentis foram obtidos considerando somente os horários para os quais foram observadas ao menos três descargas elétricas.....	70
Tabela 4.10 – Quantidade de horários pertencentes a cada um dos quatro grupos classificados de acordo com os acumulados horários de descargas elétricas observadas e baseados nos percentis da tabela 4.9. Valores referentes ao período entre 14 e 02 UTC do mês de janeiro de 2010.....	70
Tabela 4.11 – Limiares estabelecidos para avaliação dos grupos informados na tabela 4.10 a partir dos resultados obtidos para cada uma das variáveis simuladas para o mês de janeiro de 2010. Os limiares foram obtidos considerando somente os horários para os quais os acumulados de descargas elétricas detectadas pela RINDAT foram maiores ou iguais a três.....	76

Tabela 4.12 – Percentual de erro induzido pela aplicação dos limiares estabelecidos com base na simulação de janeiro de 2010 aos grupos classificados de acordo com os acumulados horários de descargas elétricas detectadas pela RINDAT para o mês de janeiro de 2010.....	77
Tabela 4.13 - Resumo dos resultados obtidos a partir dos critérios estabelecidos para análise dos acumulados de descargas elétricas detectadas pela RINDAT e das distribuições verticais horárias dos valores de razão de mistura de ice, razão de mistura de snow, razão de mistura de graupel e componente vertical da velocidade do vento e para os acumulados horários de precipitação convectiva e não convectiva resultantes da simulação do WRF para o período entre 12 e 00 UTC do mês de janeiro de 2011.....	80
Tabela 4.14 – Resumo dos resultados obtidos a partir dos critérios estabelecidos para análise dos acumulados de descargas elétricas detectadas pela RINDAT e das distribuições verticais horárias dos valores de razão de mistura de ice, razão de mistura de snow, razão de mistura de graupel e componente vertical da velocidade do vento e para os acumulados horários de precipitação convectiva e não convectiva resultantes da simulação do WRF para o período entre 00 e 12 UTC do mês de janeiro de 2011.....	81
Tabela 4.15 – Quantidade de horários pertencentes a cada um dos quatro grupos classificados de acordo com os acumulados horários de descargas elétricas observadas e baseados nos percentis da tabela 4.9. Valores referentes ao período entre 14 e 02 UTC do mês de janeiro de 2011.....	82
Tabela 4.16 – Percentual de erro induzido pela aplicação dos limiares estabelecidos com base na simulação de janeiro de 2010 aos grupos classificados de acordo com os acumulados horários de descargas elétricas detectadas pela RINDAT para o mês de janeiro de 2011.....	87
Tabela 4.17 – Limiares estabelecidos para avaliação dos grupos informados na tabela 4.15 a partir dos resultados obtidos para cada uma das variáveis simuladas para o mês de janeiro de 2011. Os limiares foram obtidos considerando somente os horários para os quais os acumulados de descargas elétricas detectadas pela RINDAT foram maiores ou iguais a três.....	89
Tabela 4.18 – Percentual de erro induzido pela aplicação dos limiares estabelecidos com base na simulação de janeiro de 2011 aos grupos classificados de acordo com os acumulados horários de descargas elétricas detectadas pela RINDAT para o mês de janeiro de 2011.....	89

## 1.0 - Introdução

Com o lançamento do satélite de pesquisas *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), que carrega a bordo entre outros instrumentos o *Lightning Imaging Sensor* (LIS), informações sobre a ocorrência de descargas elétricas em toda a região tropical e subtropical ao redor do globo terrestre tornaram-se disponíveis (Petersen e Rutledge, 2001). Com isso, foi possível obter um mapa da distribuição espacial das descargas elétricas detectadas por este instrumento, o qual aponta para a existência de duas características relevantes. A primeira é a grande concentração de descargas elétricas sobre as regiões continentais, com uma contrastante escassez das mesmas sobre os oceanos. A segunda característica refere-se ao fato de que, dentre as regiões continentais, há três áreas que se destacam por registrarem os maiores números de descargas elétricas observados ao redor do globo, sendo estas regiões classificadas, de acordo com William (2005), como chaminés de descargas elétricas, constituídas pela região central do continente Africano, o Continente Marítimo e a região centro sul da América do Sul.

O Brasil se configura como um dos países com maior número de ocorrências de descargas elétricas atmosféricas, fator este que merece especial atenção, uma vez que o potencial destrutivo associado a este fenômeno é significativo. A taxa de mortes atribuídas a descargas elétricas entre os anos de 2000 e 2009 é de aproximadamente 132 por ano, de acordo com um levantamento realizado por Pinto et al. (2010). Além da perda de vidas humanas e também de animais, prejuízos de ordem econômica são também atribuídos às descargas elétricas. Dentre eles citam-se queima de equipamentos eletrônicos, danos a automóveis e construções civis devido à queda de árvores, avarias tanto estruturais quanto eletrônicas a aeronaves, falhas no sistema de telecomunicação e interrupção no sistema de transmissão e distribuição de energia elétrica (ELAT-INPE, 2012).

Além disso, a ocorrência de descargas elétricas está associada à ocorrência de outros fenômenos meteorológicos de alto impacto sobre as sociedades: precipitação intensa em curto espaço de tempo e fortes rajadas de vento. A associação entre tais fenômenos reside no fato de se originarem em grandes nuvens de tempestades. Portanto, a presença de descargas elétricas pode ser um bom indicativo da possibilidade de elevados volumes de chuva e rajadas de vento, e vice e versa. Desta forma, a utilização de indicadores de tempo severo com base nas descargas elétricas pode se tornar um meio promissor na previsão de eventos destes fenômenos. Schultz et al. (2011) verificou que aumentos consideráveis no total de descargas elétricas geradas pelas tempestades antecedem, em aproximadamente 20 minutos, a ocorrência de eventos severos, como rajadas de vento e tornados. Os estudos de Yair et al.

(2010) mostraram que, em determinados casos por eles avaliados, o pico de descargas elétricas antecedia o pico de precipitação em quase 60 minutos, ao passo que em outros, o pico de descargas elétricas foi observado somente após a ocorrência dos maiores volumes de precipitação.

Desta forma, muitos são os motivos pelos quais pesquisas relacionadas às descargas elétricas são de grande importância e têm recebido maior atenção nos últimos tempos. Tais pesquisas almejam tanto a compreensão dos processos de carregamento das nuvens, quanto a utilização deste fenômeno como ferramenta auxiliar na previsão de curto prazo de eventos severos de tempo e na construção de metodologias de estimativa de descargas elétricas através da utilização de simulações modelos meteorológicos.

Instrumentos a bordo do TRMM, como o LIS e o *Precipitation Radar* (PR) permitiram a pesquisadores extrair informações valiosas a respeito da relação entre as propriedades microfísicas dos hidrometeoros e a ocorrência de descargas elétricas. De acordo com Cecil et al. (2005) há uma forte correlação entre a taxa de relâmpagos e a refletividade do radar nas regiões com presença de gelo nas células de tempestade. Utilizando parâmetros microfísicos das nuvens, obtidos diretamente das tempestades por instrumentos a bordo de aeronaves, e medidas de campo elétrico, Dye et al. (1986) notaram uma intensificação no campo elétrico da nuvem em regiões contendo água líquida e partículas de gelo.

Com o desenvolvimento de modelos meteorológicos de alta resolução, tornou-se possível a realização de análises detalhadas da estrutura das nuvens, uma vez que tais modelos aplicam parametrizações refinadas capazes de resolver os processos microfísicos envolvidos na formação e no desenvolvimento das nuvens de tempestade de maneira satisfatória.

Muitos estudos têm sido conduzidos com o propósito de estabelecer parâmetros que forneçam o potencial de nuvens de tempestade para a ocorrência de descargas elétricas. A metodologia para a elaboração de tais parâmetros baseia-se nos conhecimentos que se tem atualmente dos processos microfísicos e dinâmicos que levam à formação de campos elétricos intensos, como os verificados em nuvens nas quais a ocorrência de descargas elétricas foi observada. Um destes estudos é o realizado por McCaul et al. (2008), no qual foram propostos dois índices baseados em estruturas microfísicas e dinâmicas das nuvens, obtidas de simulações do modelo WRF. O primeiro índice baseia-se no fluxo ascendente de *graupel* na região da isoterma de  $-15^{\circ}\text{C}$  e o segundo na quantidade total de gelo integrada em cada coluna do modelo. A avaliação dos resultados mostrou que os índices possuíam desempenhos diferentes na determinação da densidade de descargas elétricas das nuvens. O primeiro reproduziu bem a variabilidade temporal das descargas elétricas enquanto que o segundo

obteve maior sucesso em determinar a extensão espacial na qual havia potencial para ocorrência de descargas. Com base nestes resultados os autores propuseram um novo índice, baseado na média ponderada dos dois primeiros, e os resultados obtidos foram satisfatórios. Segundo suas conclusões, o índice proposto mostrou ser uma ferramenta capaz de reproduzir, satisfatoriamente, a atividade elétrica verificada nas tempestades analisadas.

Outro estudo relacionado à parametrização das descargas elétricas através de estruturas microfísicas e dinâmicas das nuvens é o de Yair et al. (2010). Neste estudo, os autores verificaram a eficiência do *Lightning Potential Index* (LPI) em determinar a densidade de descargas elétricas através de simulações numéricas com o modelo WRF em algumas tempestades no Mediterrâneo. Este índice calcula o potencial de ocorrência de descargas elétricas com base no produto entre a componente vertical do vento e a fração entre as quantidades de cristais de gelo, neve e *graupel* relativamente à quantidade de água superresfriada. De acordo com as conclusões dos autores, o LPI mostrou desempenho superior ao índice K e ao *Cloud Physics Thunder Parameter* (CPTP) na tarefa de fornecer estimativas da atividade elétrica dos casos estudados.

Zepka (2010) utilizou uma abordagem diferente dos dois estudos citados acima na parametrização de descargas elétricas de tempestades ocorridas no Brasil. Em seu trabalho, Zepka desenvolveu dois métodos baseados somente em variáveis termodinâmicas simuladas pelo modelo WRF. Suas parametrizações levaram em consideração uma combinação linear e outra ponderada dos valores de CAPE (*Convective Available Potential Energy*), índice K, índice de levantamento, velocidade vertical e quantidade de gelo integrada na coluna do modelo. Estes parâmetros representam a probabilidade, em porcentagem, de ocorrência de raios, obtida de simulações numéricas. O método obtido a partir da combinação ponderada das variáveis citadas acima apresentou maior sucesso em determinar quais regiões eram propícias à ocorrência de descargas elétricas quando comparado ao método linear.

Desta forma, alguns autores têm se dedicado a obtenção de métodos de estimativa de descargas elétricas através dos resultados de simulações numéricas realizadas com resoluções espaço-temporais relativamente altas e que contemplam curtos períodos de tempo. Porém, considerando que uma das questões que tem sido ampla e exaustivamente discutida nos âmbitos científico, político e econômico é o impacto que a emissão de gases causadores do efeito estufa, nos níveis observados nos últimos tempos, causaria à intensidade, severidade e frequência dos fenômenos atmosféricos e ao clima das próximas décadas, avaliar os impactos de tais mudanças sobre as características deste fenômeno atmosférico de tamanho potencial destrutivo torna-se essencial para responder de forma mais completa às questões atualmente levantadas.

Da busca por estas respostas surge a necessidade de se obter métodos de estimativa de descargas elétricas que possam ser aplicados aos resultados de simulações de tempo mais longas e de resoluções espaciais não tão elevadas, que visem reproduzir os padrões atmosféricos projetados para os próximos anos, para então, avaliar o impacto de tais projeções nas características das tempestades e, conseqüentemente, na atividade elétrica das mesmas. Porém, a realização de simulações numéricas para longos períodos temporais com as altas resoluções espaciais utilizadas nos trabalhos citados anteriormente geraria grandes custos computacionais, em termos de processamento e armazenamento de dados. Portanto, para obter uma resposta à questão anteriormente colocada, faz-se necessário realizar simulações numéricas cujas relações entre a resolução espaço-temporal e seu custo computacional viabilizem a realização das análises pretendidas.

### **1.1 - Objetivo**

Este trabalho tem por objetivo estudar a relação entre os resultados obtidos a partir de simulações numéricas e os dados de descargas elétricas com o intuito de avaliar a possibilidade de se utilizar um modelo numérico de simulação atmosférica para prever a ocorrência de descargas elétricas. De forma mais específica, pretende-se analisar os impactos que simulações numéricas de diferentes resoluções espaço-temporais causariam na eficiência de estimativa de descargas elétricas. Para cumprir com tal objetivo o desempenho do *Lightning Potential Index* (LPI) em estimar o potencial das tempestades para a ocorrência de descargas elétricas será também avaliado.

Portanto, de forma sucinta, os objetivos deste trabalho são:

- 1- Avaliar a possibilidade de se utilizar um modelo numérico de simulação atmosférica para prever a ocorrência de descargas elétricas;
- 2- Avaliar o impacto da resolução espaço-temporal utilizada na simulação numérica na eficiência de estimativa de descargas elétricas;
- 3- Determinar um método de estimativa de descargas elétricas a partir de simulações numéricas que possa ser utilizado em simulações numéricas de caráter climatológico.

## 2.0 - Revisão Bibliográfica

### 2.1 - Estrutura Elétrica das Tempestades

Nos anos 1940, observações com balões trouxeram evidências de que a estrutura elétrica das tempestades seria tripolar, com dois centros de cargas positivas, um situado na base e outro no topo da nuvem, e um centro de cargas negativas situados nas posições mais centrais da nuvem, conforme mostra a figura 2.1 (a). Desde então teorias têm sido propostas e aperfeiçoadas ao longo dos anos com o propósito de explicar esta estrutura, considerada até hoje como um modelo simplificado da estrutura elétrica das nuvens. Entretanto, medidas recentes de sondagens mostraram que a estrutura elétrica encontrada nas nuvens de tempestades é mais complexa do que a estrutura tripolar (figura 2.1 (b)), diferenciando o padrão de distribuição de cargas entre as regiões de movimentos ascendentes e descendentes (Zepka, 2010).

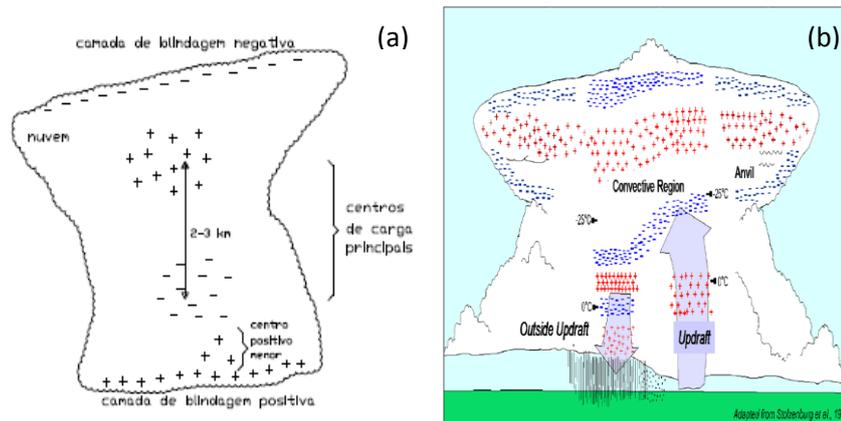


Figura 2.1 – Representação da estrutura elétrica das tempestades de acordo com o modelo tripolar (a) e com o modelo multipolar (b). Imagens extraídas de Zepka (2010) e de Stolzenburg, Rust e Marshall (1998), respectivamente.

Ao longo dos anos, grande esforço tem sido dedicado ao intuito de entender como ocorre a eletrificação das tempestades. Atualmente sabe-se que as cargas elétricas são carregadas pelos hidrometeoros constituintes da nuvem, e que o processo de carregamento destes hidrometeoros se dá através do processo de formação e crescimento dos mesmos. Sendo assim, a compreensão dos processos microfísicos e termodinâmicos responsáveis pela formação e crescimento das tempestades faz-se necessária para o entendimento dos mecanismos que geram a estrutura elétrica responsável pela formação de descargas elétricas a partir destas nuvens.

## 2.2 - Processos Microfísicos e Termodinâmicos

Conforme descrito por Rogers e Yau (1996) e Wallace e Hobbs (2006), parcelas de ar em ascensão adiabática na atmosfera eventualmente atingem o seu Nível de Condensação por Levantamento (NCL), onde o vapor se torna saturado com relação à água. Neste nível a presença de determinadas partículas na atmosfera, conhecidas como núcleos de condensação, possibilita a formação de gotículas em condições de baixa supersaturação, num processo denominado nucleação heterogênea. A partir de sua formação, as gotículas passam a crescer pelo processo de condensação, consumindo vapor d'água do ambiente, que por sua vez é suprido pelo fluxo ascendente de parcelas até o NCL. Entretanto, com o surgimento de novas gotículas e seu crescimento por condensação, em um dado instante, a quantidade consumida de vapor d'água supera a quantidade fornecida pelo processo de levantamento e a supersaturação do ambiente diminui. Desta forma, gotículas menores evaporam e conseqüentemente fornecem vapor para o crescimento das gotículas maiores. Ao atingir um determinado tamanho, estas gotículas começam a colidir com outras menores que sobreviveram ao processo de evaporação. Após a colisão as gotículas podem permanecer juntas e coalescer, ou tornam a se separar, processo esse conhecido por rebatimento. Assim, inicialmente, o crescimento das gotículas se dá por condensação e a partir de determinado tamanho, os processos de colisão e coalescência tornam-se mais eficientes.

Concomitantemente ao processo de crescimento de gotículas, as parcelas da nuvem continuam seu processo de ascensão e dependendo da intensidade da corrente ascendente podem ultrapassar a isoterma de zero grau Celsius, dando início à fase fria da nuvem. Neste instante estão presentes gotículas de tamanhos variados, que apesar de estarem abaixo de 0°C ainda encontram-se em estado líquido, sendo, portanto, chamadas de gotículas superresfriadas. Assim como no processo de nucleação de gotas, que ocorre em condições de supersaturação não tão elevadas, nessa fase a presença de núcleos de gelo é fundamental para a formação de hidrometeoros sólidos a temperaturas maiores que -40°C. Desta forma, entre as isotermas de 0°C e -40°C é possível encontrar hidrometeoros nas fases líquida e sólida, razão pela qual esta camada da nuvem é denominada de fase mista (*mixed-phase*). A figura 2.2 contém uma representação da distribuição dos hidrometeoros ao longo da estrutura vertical de uma tempestade. Nas camadas formadas abaixo da isoterma de 0°C somente gotículas de água podem ser encontradas. Acima da isoterma de 0°C a grande maioria dos hidrometeoros permanece no estado líquido, porém em uma condição termodinamicamente instável, sendo denominados gotículas de água superresfriada. Apesar disso, esta camada pode ser constituída por uma pequena parcela de hidrometeoros na fase sólida. A partir de

-10°C a formação de hidrometeoros sólidos devido à presença de núcleos de gelo torna-se mais eficiente de forma que a quantidade de gotículas de água superresfriada diminui consideravelmente com a altura. Finalmente, acima da isoterma de -40°C somente partículas sólidas estão presentes.

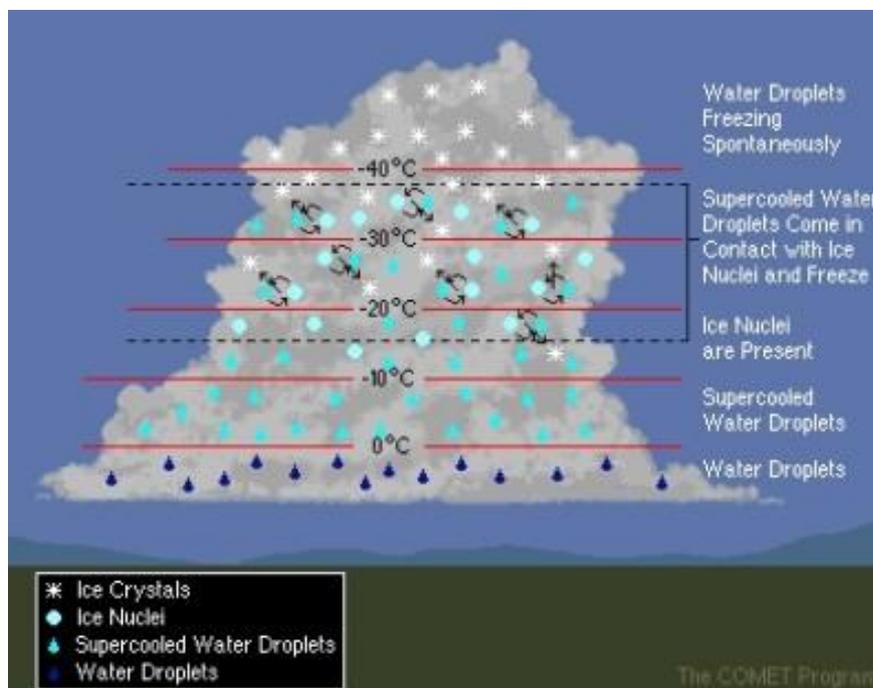


Figura 2.2 – Representação da distribuição dos hidrometeoros ao longo da estrutura vertical da tempestade, indicando sucintamente os tipos de hidrometeoros que constituem cada uma de suas camadas (The COMET Program).

Desta forma, as camadas localizadas acima da isoterma de -40°C são constituídas somente por hidrometeoros na fase sólida. Estes podem se formar tanto a partir do congelamento das gotículas quanto pela deposição direta de vapor sobre os núcleos de gelo. Uma vez formada, uma pequena partícula de gelo pode crescer de diversas formas, a partir da interação com todas as três fases da água presentes na nuvem. A deposição do vapor sobre os pequenos núcleos de gelo é o processo responsável pelo crescimento dos cristais de gelo. Flocos de neve formam-se a partir da colisão entre os cristais de gelo, em um processo denominado de agregação. Tanto o *graupel* quanto o granizo se formam através da interação entre as partículas de gelo e as gotículas de água superresfriada, através do processo de acreção. Se a gotícula congela imediatamente quando entra em contato com o gelo, forma-se o *graupel*. Se o congelamento não ocorre imediatamente, então estruturas mais densas se formarão, como por exemplo, o granizo.

### 2.3 - Mecanismos de Eletrificação das Tempestades

A interação entre os hidrometeoros dentro de uma nuvem promove não somente o crescimento dos mesmos e a formação de precipitação, como também a geração e separação de cargas elétricas dentro das mesmas. Sabe-se que, dentro das tempestades, as cargas elétricas são transportadas pelos hidrometeoros presentes nas fases líquida e sólida (Wallace e Hobbs, 2006). Contudo, o entendimento completo sobre como estas cargas são geradas nos hidrometeoros e como e por quais meios as mesmas são distribuídas dentro da nuvem ainda é um objetivo a ser alcançado. Diversos mecanismos através dos quais a eletrificação das tempestades poderia ocorrer foram propostos ao longo das últimas décadas. Entretanto, a grande maioria destes processos gera campos elétricos pouco intensos, muito abaixo daqueles observados em tempestades nas quais a ocorrência de descargas elétricas foi registrada. Saunders (2008) aponta dois mecanismos como sendo responsáveis por produzir campos elétricos tão intensos quanto os observados em tempestades elétricas. De acordo com este estudo, o mecanismo indutivo (no qual a pré-existência do campo elétrico de bom tempo é determinante) envolvendo colisões entre cristais de gelo ou entre cristal e água superresfriada, é capaz de produzir campos elétricos de intensidades consideráveis. Neste mecanismo, o campo elétrico pré-existente no ambiente induz cargas sobre uma partícula de gelo que, devido à força da gravidade, sofre queda dentro da nuvem. Esta partícula de gelo colide com outras partículas menores ou gotículas de água superresfriada em ascensão e transfere carga positiva às mesmas, tornando-se conseqüentemente, negativamente carregada. Entretanto, este processo possui uma limitação importante: a condutividade do gelo precisa ser alta o bastante para que a carga possa ser transferida no breve instante de tempo no qual ocorre a colisão. Testes laboratoriais mostraram que o tempo necessário para esta transferência de cargas é maior do que a duração da colisão. Porém, alterando a constituição química do gelo de maneira a aumentar sua condutividade, o tempo de transferência de cargas diminui, tornando este mecanismo um processo eficiente de separação de cargas dentro da nuvem.

O segundo mecanismo sugerido por Saunders como sendo o responsável pela eletrificação das grandes tempestades é o mecanismo não-indutivo (a existência de um campo elétrico ambiente não influencia o processo) envolvendo *graupel* e cristais de gelo. Neste processo, o *graupel* cai através da nuvem e durante a queda colide com pequenos cristais de gelo. Durante a colisão massa são transferidas entre as partículas de gelo, que se tornam então, eletricamente carregadas. De acordo com estudos como os de Jayaratne, Saunders e Hallett (1983), o *graupel* pode carregar-se negativa ou positivamente, dependendo da temperatura e do conteúdo de água líquida ambientes e dos constituintes químicos presentes

nos hidrometeoros participantes deste processo. Desta forma, na parte superior da nuvem, onde temperaturas relativamente baixas são observadas, o *graupel* carrega-se negativamente e é levado pela força gravitacional para baixo, contribuindo para a formação de uma região de cargas negativas nas porções intermediárias da nuvem, enquanto que os cristais de gelo, carregados positivamente, são levados para cima pelas correntes ascendentes, formando uma região de cargas positivas no topo da nuvem. Na parte inferior da nuvem, há uma inversão no sinal das cargas transferidas devido à maior temperatura ambiente, e o *graupel* adquire carga positiva, sendo levado para a base da nuvem pela força da gravidade e os cristais de gelo, conseqüentemente, carregam-se negativamente, e são levados pelas correntes ascendentes para cima, reforçando a região de cargas negativas na parte central da nuvem. De acordo com Baker et al. (1987) e Dash e Wettlaufer (2001) a explicação sobre por que há uma mudança no sinal da carga transferida para o *graupel* é dada pela Teoria da Taxa de Crescimento Relativo por Difusão (*Relative Diffusional Growth Rate Theory*). Segundo esta teoria, a partícula que cresce mais rapidamente por difusão do vapor d'água carrega-se positivamente. Isso ocorre porque durante o processo de crescimento por deposição, cargas negativas acumulam-se na superfície da partícula, de forma que quanto maior seja a velocidade de deposição e, portanto, de crescimento da partícula, maior será a quantidade de carga negativa acumulada em sua superfície. Durante a colisão, a quantidade de cargas nas superfícies das partículas que estão em contato se iguala e, conseqüentemente a partícula que cresce mais rápido perde cargas negativas, tornando-se positivamente carregada. Desta forma, o mecanismo de carregamento não indutivo descrito por Saunders é capaz de explicar a distribuição de cargas dentro da nuvem de maneira simplificada, de acordo com o modelo tripolar aceito atualmente.

À medida que as cargas são geradas e separadas dentro da nuvem, um campo elétrico interno à mesma forma-se, podendo atingir valores intensos. Entretanto, estudos como o de Gurevich e Zybin (2005) relatam que mesmo os campos elétricos mais intensos já medidos são consideravelmente mais fracos do que aqueles necessários para romper a resistência dielétrica do ar. Hipóteses sobre como ocorre o processo de iniciação das descargas elétricas foram propostas, mas ainda não foram comprovadas.

## 2.4 - Tipos de Descarga Elétrica

As descargas elétricas atmosféricas são classificadas em função da polaridade das cargas transferidas e da localização dos pontos que a corrente elétrica conecta. Se a descarga ocorre entre dois pontos distintos de uma mesma nuvem é classificada como intranuvem (IN), por outro lado, se os pontos encontram-se em nuvens diferentes a descarga é classificada como nuvem-nuvem (NN). Quando a descarga ocorre entre a nuvem e a atmosfera livre ao seu redor é chamada de descarga no ar (DA). Se a corrente elétrica conecta a nuvem ao solo, dois tipos de descargas são considerados, o que tem origem na nuvem e termina no solo, denominado nuvem-solo (NS) e o que se origina no solo e termina na nuvem, classificado como solo-nuvem (SN). As descargas que ocorrem entre nuvem e solo são, em sua grande maioria, originadas na nuvem. Destas, aproximadamente 90% possuem polaridade negativa e os demais 10% são de polaridade positiva. As descargas do tipo solo-nuvem são mais incomuns e normalmente têm origem em objetos altos ou localizados em regiões elevadas (Rakov e Uman, 2003).

De uma forma geral, do total de descargas elétricas geradas na atmosfera terrestre, 75% pertencem aos tipos intranuvem, nuvem-nuvem ou descarga no ar. Ou seja, apenas 25% delas atingem o solo. Porém este percentual varia de acordo com a latitude do local, sendo que em latitudes médias o total de descargas do tipo nuvem-solo ou solo-nuvem pode alcançar os 50%.

### 3.0 - Metodologia

#### 3.1 - Dados

A base de dados de descargas elétricas utilizada neste trabalho, não somente como referência para a verificação dos resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia que será, a seguir, descrita, mas também para a determinação dos períodos aos quais a referida metodologia seria aplicada, foi obtida através da Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT). Tais dados foram fornecidos pelo Instituto Simepar, que em conjunto com outras três instituições, constituem o convênio de cooperação responsável pela administração da rede de detecção acima mencionada. Esta rede é capaz de detectar as descargas do tipo nuvem-solo de polaridades positivas e negativas observadas em praticamente toda a extensão da região sudeste e em parte do sul e centro-oeste do Brasil (RINDAT, 2012).

De acordo com Naccarato, Pinto Jr. e Pinto (2006), a eficiência de detecção da RINDAT para descargas atmosféricas com pico de corrente entre 5 e 10 kA ultrapassa os 90% em praticamente todo o estado de SP e sobre o norte do Paraná e Sul de Minas Gerais, como pode ser visto na figura 3.1.

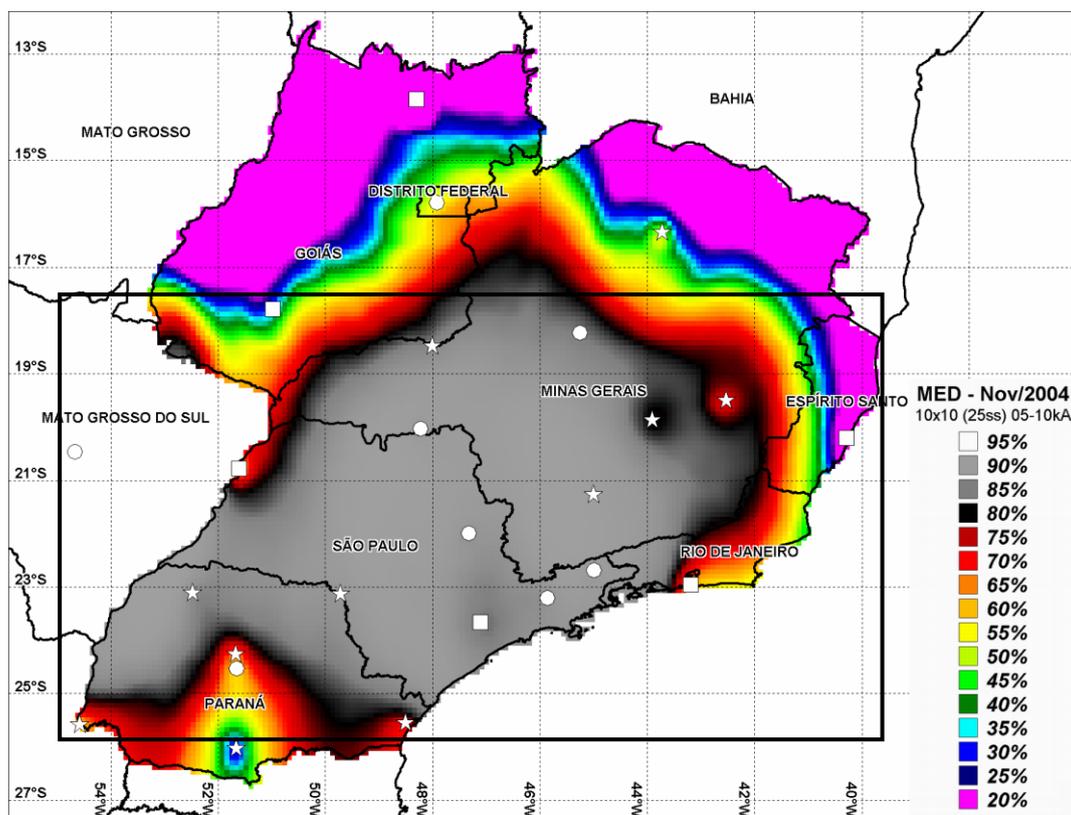


Figura 3.1 - Eficiência de detecção da RINDAT calculada através do DEM (*Detection Efficiency Model*) para descargas com pico de corrente entre 5 e 10 kA (Naccarato; Pinto Jr.; Pinto, 2006).

Conforme descrito por Pinto Jr. et al. (2006), a RINDAT vem sendo atualizada desde o início de sua operação, com apenas 4 sensores de detecção instalados em Minas Gerais no ano de 1998, e até o momento de elaboração do artigo citado, continha em sua malha de detecção algumas dezenas de sensores instalados nas regiões sul, sudeste, centro-oeste, norte e nordeste do Brasil. Devido a isto, a imagem apresentada na figura 3.1 contém informações a respeito da eficiência de detecção desta rede somente para os dados que estavam disponíveis no momento da elaboração do artigo do qual a mesma foi obtida. Por isso, regiões como o leste do Mato Grosso do Sul apresentam eficiência de detecção nula na figura 3.1, pois ainda não eram cobertas pelos sensores que compunham a RINDAT àquela época. Entretanto, com a evolução do número de sensores que integram esta rede, houve expansão de sua área de cobertura, a qual abrange atualmente toda a extensão territorial das regiões sudeste, sul e centro-oeste, e algumas áreas das regiões norte e nordeste.

Desta forma, tendo em vista o alto grau de eficiência de detecção apresentado por esta rede na região sudeste do Brasil, os estudos daqui em diante analisados foram limitados à região que abrange o estado de SP, norte do Paraná, sul de MG e oeste do MS, mais precisamente entre os paralelos de 25°S e 15°S e entre os meridianos de 55°W e 40°W. O conjunto de dados utilizados contém somente as descargas detectadas por, no mínimo, 4 sensores do total que constitui a rede, e que registraram pico de corrente maiores ou iguais a 10 kA. A precisão temporal de detecção das descargas é da ordem de milissegundos e o erro espacial é de, no máximo, 5 km. Os dados foram fornecidos pelo Simepar para todo período entre novembro de 2009 e março de 2012.

### **3.2.0 - O Modelo Weather and Forecasting Research – WRF**

O *Weather and Research Forecasting* (WRF) é um modelo numérico construído para realização de simulações atmosféricas de finalidades tanto científicas quanto operacionais. Seu código foi projetado desde o momento de sua idealização para ser utilizado tanto em ambiente acadêmico quanto operacional com o objetivo de acelerar o processo de aplicação dos conhecimentos científicos adquiridos pela comunidade acadêmica em melhorias para a previsão do tempo operacional. Este modelo é apropriado para simulações atmosféricas de fenômenos que abrangem algumas centenas de metros de extensão até aqueles de escala sinótica. O *National Center for Atmospheric Research's (NCAR) Mesoscale and Microscale Meteorology (MMM) Division*, o *National Oceanic and Atmospheric Administration's (NOAA) National Centers for Environmental Prediction (NCEP) and Earth System Research Laboratory (ESRL)*, o *Department of Defense's Air Force Weather Agency (AFWA) and Naval Research Laboratory (NRL)*, the *Center for Analysis and Prediction of Storms (CAPS)*, *Federal Aviation*

*Administration*(FAA) estão entre as organizações e agências responsáveis pela criação e constante aperfeiçoamento deste modelo, com a participação e contribuição de cientistas da comunidade acadêmica (SKAMAROCK et al., 2008).

O código do modelo WRF possui dois núcleos dinâmicos, o chamado *Advanced Research WRF* (ARW) desenvolvido no NCAR e o *Nonhydrostatic Mesoscale Model* (NMM) desenvolvido pelo NCEP. Para a realização das simulações numéricas apresentadas neste trabalho foi utilizado o núcleo dinâmico ARW, em sua versão 3.3.1. O conjunto de equações resolvidas por este núcleo é constituído pelas equações integralmente compressíveis e não hidrostáticas de Euler. A seguir são apresentados alguns dos aspectos do sistema de equações que compõem este núcleo:

- **Coordenada Vertical:** a coordenada vertical utilizada  $\eta$  é do tipo que acompanha as oscilações do terreno, mais conhecida como coordenada  $\sigma$  (sigma). A seguir são apresentadas a formulação desta coordenada no sistema de equações que constituem o núcleo ARW do modelo WRF (equação 3.1) e sua esquematização gráfica (figura 3.2).

$$\eta = \frac{p_h - p_{ht}}{p_{hs} - p_{ht}} \quad (3.1)$$

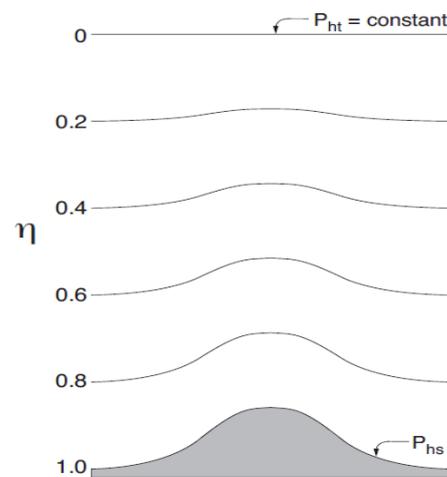


Figura 3.2 – Representação da coordenada  $\eta$  do núcleo ARW (Skamarock et al., 2008).

A variável  $p_h$  representa a componente hidrostática da pressão atmosférica, sendo que  $p_{hs}$  e  $p_{ht}$  se referem aos valores da mesma na superfície e no topo da atmosfera, respectivamente.

- **Discretização temporal:** O esquema de integração temporal utilizado é o de 3ª ordem de Runge-Kutta que integra todas as ondas de baixa e alta freqüências de oscilação que possuem importância do ponto de vista meteorológico. Ondas acústicas, as quais possuem maior freqüência temporal, são integradas considerando menores intervalos de tempo com o intuito de manter a estabilidade numérica das simulações. Considerando as variáveis prognósticas do modelo como  $\Phi_t=R(\Phi)$ , este esquema de integração requer três etapas algébricas para progredir de uma solução em  $\Phi(t)$  para a subsequente em  $\Phi(t+\Delta t)$ , sendo elas as seguintes:

$$\phi^* = \phi^t + \frac{\Delta t}{3} R(\phi^t) \quad (3.2)$$

$$\phi^{**} = \phi^t + \frac{\Delta t}{2} R(\phi^*) \quad (3.3)$$

$$\phi^{t+\Delta t} = \phi^t + \Delta t R(\phi^{**}) \quad (3.4)$$

Nas equações expostas acima,  $\Delta t$  é o passo de tempo do modelo, correspondente ao passo de tempo aplicado na resolução das ondas de menor freqüência.

- **Discretização Espacial:** O escalonamento espacial utilizado para a resolução das equações que constituem o ARW nos pontos que compõem a grade simulada é o esquema de escalonamento da grade C de Arakawa. A principal característica deste esquema é que as variáveis não são todas calculadas nos mesmos pontos de grade, como mostram as grades apresentadas na figura 3.3, a qual exemplifica a discretização para as três componentes do vento ( $u,v,w$ ) e para a temperatura potencia ( $\theta$ ).

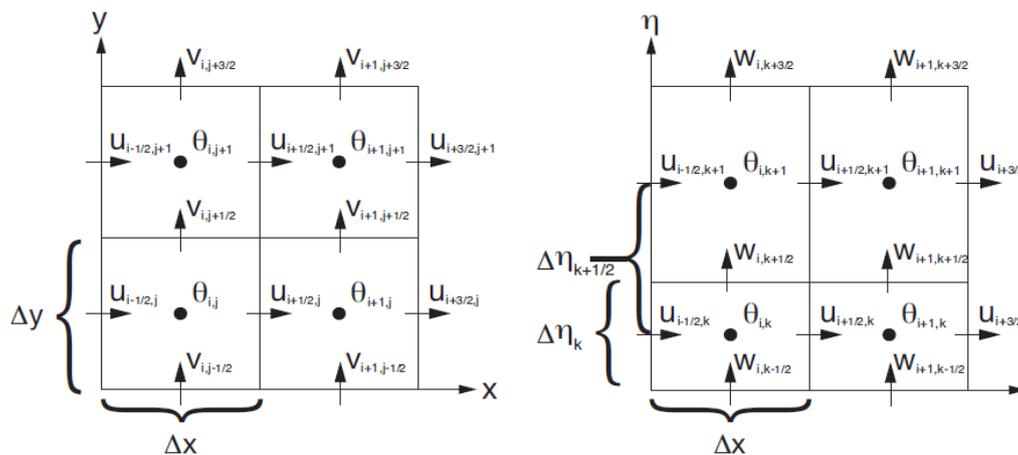


Figura 3.3 – Representação da discretização espacial utilizada no ARW, baseada no esquema da grade C de Arakawa (Skamarock et al., 2008).

O espaçamento horizontal entre os pontos de grade, representado pelas variáveis  $\Delta x$  e  $\Delta y$  é constante, característica esta oposta à estabelecida para o espaçamento vertical, representado pela variável  $\Delta \eta$ .

- **Condições iniciais e de fronteira:** Dados de análise do NCEP *Final Analyses* (FNL) obtidos através de simulações do *Global Forecast System* (GFS), com resolução espacial de  $1^\circ \times 1^\circ$  de latitude e longitude, 26 níveis verticais e espaçamento temporal de 6 horas foram utilizados como fonte de condições iniciais e de fronteira necessárias para inicialização e manutenção das simulações do modelo WRF.

- **Aninhamento de Grades:** O ARW possui um recurso que possibilita a aplicação de diferentes resoluções espaciais e temporais à extensão territorial da simulação numérica. Este recurso permite concentrar maiores resoluções espaciais em áreas específicas de maior interesse de estudo sem que seja necessária a realização de diversas simulações numéricas de distintos espaçamentos de grade para a execução do *downgrade*. Estas regiões de maior resolução espacial constituem-se de áreas retangulares de dimensões espaciais menores do que a grade de menor resolução. A estas regiões de diferentes resoluções espaciais dá-se o nome de grade. O ARW possibilita uma série de configurações diferentes com relação à quantidade, alocação e interação entre as grades. As principais simulações apresentadas nas seções seguintes foram realizadas utilizando-se apenas duas grades aninhadas, alocadas da maneira como mostra a figura 3.4.

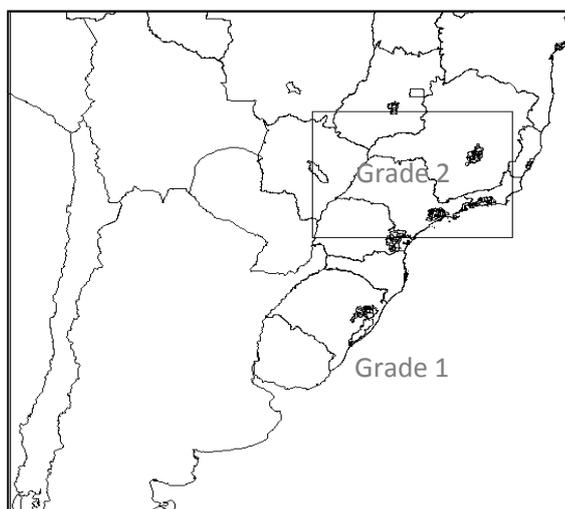


Figura 3.4 - Representação das áreas compreendidas pelas grades 1 e 2 das simulações do modelo WRF.

A grade de menor resolução espacial abrange toda a região central da América do Sul e a que contém maior resolução espacial foi alocada de maneira a compreender grande parte da região sudeste do Brasil, envolvendo todo o estado de São Paulo, norte do Paraná, sul de

Minas Gerais e Goiás, leste do Mato Grosso do Sul e oeste do Rio de Janeiro. A grade dois foi intencionalmente demarcada para coincidir com a região de maior eficiência de detecção da RINDAT, conforme mostra a figura 3.1. A tabela 3.1 apresenta as opções de parametrização utilizadas nas simulações numéricas avaliadas neste trabalho. As configurações relativas ao espaçamento de grade e passo no tempo serão oportunamente apresentadas.

Tabela 3.1 – Esquemas utilizados na realização das simulações numéricas com o WRF.

Parametrização	Esquema
Convecção	Kain-Fritsch
Microfísica	Thompson et al.
Camada Superficial	Eta <sup>1</sup>
Cobertura de Solo	Noah LSM
Camada Limite Planetária	Yonsei University
Radiação de Onda Curta	RRTM <sup>2</sup>
Radiação de Onda Longa	Dudhia

<sup>1</sup> Esquema baseado na Teoria da Similaridade de Monin e Obukhov, 1954.

<sup>2</sup> *Rapid Radiative Transfer Model* (RRTM)

Tendo em vista o foco deste trabalho, as parametrizações de convecção e de microfísica são fundamentais para a interpretação dos resultados, sendo descritas em maiores detalhes a seguir. Maiores informações a respeito das demais parametrizações e esquemas citados na tabela 3.1 podem ser encontrados em Skamarock et al. (2008).

### 3.2.1 - Parametrização de Convecção

A parametrização de convecção, ou parametrização de *cumulus*, tem por objetivo representar os fluxos verticais resultantes de correntes ascendentes e descendentes não resolvidas pelo modelo por ocorrerem em escalas menores do que o espaçamento de grade aplicado à simulação. Esta parametrização corresponde ao conjunto de equações responsáveis pela formação da componente convectiva da precipitação. O esquema de Kain e Fritsch (2004) inclui os efeitos de entranhamento, desentranhamento e processos microfísicos relativamente simples. Este esquema realiza a distribuição de massa na coluna vertical, através das correntes ascendentes e descendentes e do fluxo de massa do ambiente, de forma a remover 90% do total de *Convective Available Potential Energy* (CAPE) calculado para um determinado instante de tempo, para os pontos de grade nos quais esta parametrização foi ativada.

### 3.2.2 - Parametrização de Microfísica

A parametrização de Microfísica é a responsável por resolver, explicitamente, os processos de formação e crescimento dos hidrometeoros da fase líquida e sólida formados a partir da saturação das parcelas de ar ascendentes. Em outras palavras, esta parametrização é capaz de reproduzir de maneira mais adequada os processos de interação entre os diversos tipos de hidrometeoros possíveis para cada esquema de parametrização de microfísica disponíveis. Os processos microfísicos são executados ao final de cada passo de tempo, para garantir que os produtos provenientes deste processo estejam em acordo com os valores de temperatura e umidade atualizados após a execução dos demais processos físicos reproduzidos pelo modelo, inclusive aqueles relativos à parametrização de *cumulus*. O saldo de calor latente resultante dos processos microfísicos é armazenado para posterior utilização nas etapas dinâmicas do passo de tempo subsequente (Skamarock et al, 2008). A opção de parametrização de microfísica utilizada neste trabalho, ou seja, descrita em Thompson e Manning (2004), resolve os processos da fase mista da nuvem (*mixed-phase*), ou seja, aqueles relativos à interação das partículas de gelo e água, dos quais resultam, por exemplo, as partículas de *graupel* e granizo. Desta forma, dentre os produtos gerados por este esquema de parametrização de microfísica encontram-se as razões de mistura de água de nuvem, água de chuva, ice, snow, graupel e a componente não convectiva da precipitação.

### 3.3.0 - O Lighting Potential Index - LPI

O método de estimativa de descargas elétricas utilizado neste trabalho foi proposto por Lynn e Yair (2008 *apud* Yair et al., 2010, p. 2) e posteriormente avaliado por Yair et al. (2010) através da análise de um conjunto de tempestades ocorridas na região do Mediterrâneo. Os autores deste último trabalho concluíram que o método avaliado constituiu uma boa ferramenta na tarefa de estimar a atividade elétrica das tempestades então simuladas.

Este método de estimativa assume que a separação de cargas dentro das tempestades ocorre na região entre as isoterms de zero grau Celsius e -20 °C, através da colisão, seguida de separação, entre o *graupel* e os cristais de gelo, na presença de água super-resfriada, processo esse conhecido como Mecanismo Não-Indutivo de carregamento de tempestades. Segundo esta metodologia, estes processos de separação e carregamento são equacionados da seguinte forma:

$$LPI = \frac{1}{V} \iiint \varepsilon w^2 dx dy dz \quad (3.5)$$

Onde  $V$  é o volume de ar ocupado pela nuvem entre as isotermas de  $0^{\circ}\text{C}$  e  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $w$  é a componente vertical da velocidade e  $\varepsilon$  é um fator adimensional que varia entre 0 e 1 e relaciona as quantidades de água e gelo dentro da tempestade da seguinte maneira:

$$\varepsilon = 2 \frac{(Q_i Q_l)^{0,5}}{(Q_i + Q_l)} \quad (3.6)$$

Onde  $Q_l$  é a razão de mistura da água líquida, que neste trabalho foi considerada como sendo a soma entre as razões de mistura de água de nuvem e água de chuva.  $Q_i$  é a razão de mistura dos espécimes de gelo, calculada pela equação a seguir:

$$Q_i = q_g \left[ \left( \frac{(q_s q_g)^{0,5}}{(q_s + q_g)} \right) + \left( \frac{(q_i q_g)^{0,5}}{(q_i + q_g)} \right) \right] \quad (3.7)$$

Onde  $q_g$  é a razão de mistura do *graupel*,  $q_s$  é a razão de mistura de flocos de neve (*snow*) e  $q_i$  é a razão de mistura de cristais de gelo (*ice*).

Em sua formulação, o LPI considera dois fatores importantes para o carregamento de tempestades de acordo com o Mecanismo Não-Indutivo. O primeiro é a relação entre as quantidades de água superresfriada e dos espécimes de gelo na região de carregamento. O fator adimensional  $\varepsilon$  assume valor máximo quando estas quantidades,  $Q_i$  e  $Q_l$ , são iguais, o que significa que a separação de carga requer a presença de todos estes ingredientes atuando de maneira coordenada dentro da região de carregamento (YAIR et al., 2010). O segundo fator é a componente vertical da velocidade do vento, que é equacionada de maneira a considerar tanto as correntes ascendentes, quanto as correntes descendentes dentro da região de carregamento. Desta forma, quanto maior for o módulo da velocidade vertical, maior será a probabilidade de ocorrência de colisão entre as partículas presentes na região considerada e, portanto, maior o potencial de carregamento da tempestade.

Sendo assim, o LPI é avaliado de maneira que, quanto maior o seu valor, maior será o potencial da tempestade para a ocorrência de descargas elétricas. De acordo com a equação (3.5), este índice tem unidade de  $\text{m}^2\text{s}^{-2}$ .

## 4.0 – Resultados

### 4.1 – Análise dos Dados de Descargas Elétricas da RINDAT

O gráfico da figura 4.1 (a) apresenta a média mensal de descargas elétricas observadas para cada um dos 12 meses do ano para o período entre novembro de 2009 e março de 2012. O gráfico da figura 4.1 (b) apresenta o acumulado mensal para cada um dos 29 meses que constituem o período estudado. Os dados apresentados em ambos os gráficos correspondem ao acumulado de descargas elétricas observadas na área retangular que compõe a grade 2, apresentada na figura 3.4.

De acordo com a evolução mensal do acumulado de descargas elétricas apresentado na figura 4.1 (a), a atividade elétrica verificada na região da grade 2 da figura 3.4 possui um caráter bastante sazonal, no qual o verão é o período de maior incidência de descargas, ao passo que os meses entre maio e agosto registram os menores acumulados mensais. Dentre os meses que compõem o trimestre do verão, o mês de janeiro caracteriza-se, em média, como aquele com maior número de descargas observadas, seguido dos meses de fevereiro e dezembro. Os meses de março, outubro e novembro caracterizam-se como meses de transição entre os diferentes regimes de atividade elétrica na região sudeste do país, com volumes registrados consideravelmente elevados. Nos meses de abril e setembro os registros de descargas elétricas reduzem bastante, de forma que as características em termos de acumulados elétricos se aproximam mais daquelas observadas nos meses de inverno. Os meses de maio, junho, julho e agosto registram os menores acumulados de descargas elétricas, os quais não ultrapassam o limite das 30.000 descargas verificadas ao longo de cada um destes meses.

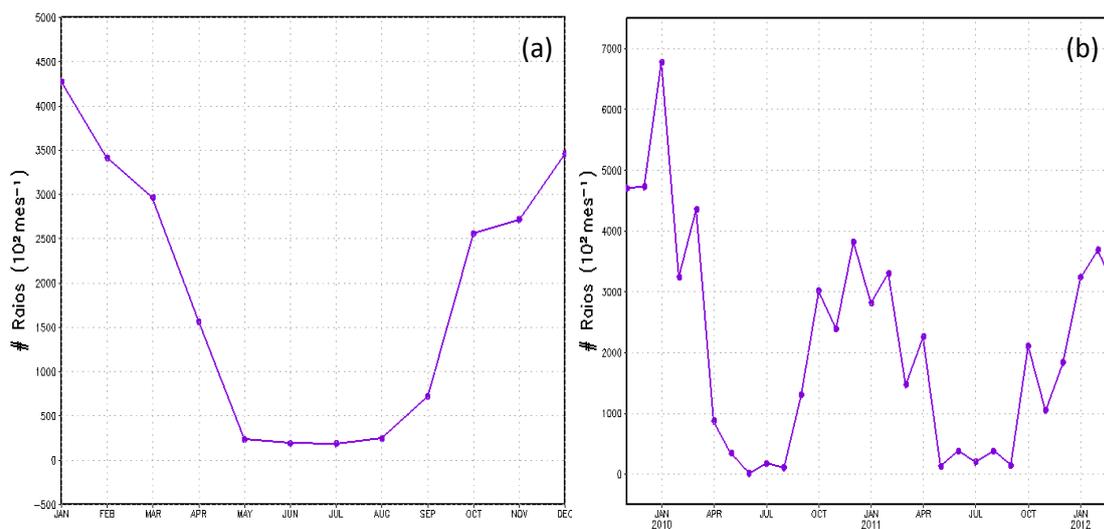


Figura 4.1- Média mensal (a), acumulado mensal de descargas elétricas (b) detectadas pela RINDAT durante os 29 meses contidos no período entre novembro de 2009 e março de 2012.

Apesar da análise descrita acima, o mês de janeiro não necessariamente se caracteriza como o mês com maior atividade elétrica registrada a cada ano ao se comparar os valores observados para as três estações de verão para as quais os dados da RINDAT estão disponíveis. No caso do verão de 2009-2010 esta afirmação faz-se verdadeira, entretanto, para os verões de 2010-2011 e 2011-2012, os meses que registraram maiores acumulados elétricos foram, respectivamente, os meses de dezembro e fevereiro, conforme mostra o gráfico da figura 4.1 (b). Outra característica a ser observada é que o mês de janeiro de 2010 é, notadamente, o mês que apresentou maior acumulado de descargas elétricas detectadas, com um total de 677.394 ocorrências. Este valor é 43% maior do que o acumulado verificado para o mês de dezembro de 2009, segundo mês eletricamente mais intenso dentre os 29 avaliados. Os meses de janeiro de 2011 e de 2012 obtiveram acumulados de 281.482 e 323.127 descargas elétricas verificadas na região avaliada, de forma que janeiro de 2011 caracteriza-se como aquele que registrou o menor acumulado de descargas elétricas dentre os três janeiros existentes entre o período de novembro de 2009 e março de 2012. Mais uma vez destaca-se o fato de que o mês de janeiro de 2010 apresentou acumulados destacadamente maiores que os demais meses, com um volume 58% maior que a média para os meses de janeiro, e que ultrapassa o dobro do que foi observado em janeiro de 2012.

A figura 4.2 (a) apresenta a distribuição espacial do total de descargas elétricas observadas pela RINDAT, na região de maior eficiência de detecção desta rede, no período entre novembro de 2009 e março de 2012. A análise desta figura mostra uma distribuição heterogênea das descargas elétricas em termos espaciais, na qual praticamente não houve registro de descargas elétricas ao norte do paralelo de 19°S. Além disso, há uma região circular próxima à fronteira entre os estados de MG e SP, centrada em 21,5°S e 45,5°W na qual também não houve registro de descargas elétricas ao longo de todo período apresentado. A topografia desta região é apresentada na figura 4.2 (b). Nota-se que esta região central situada ao sul de MG, na qual não houve registro de volumes consideráveis de descargas elétricas ao longo do período analisado, é uma região bastante elevada, situada a sotavento de uma região montanhosa que ultrapassa os 1.200 metros de altitude.

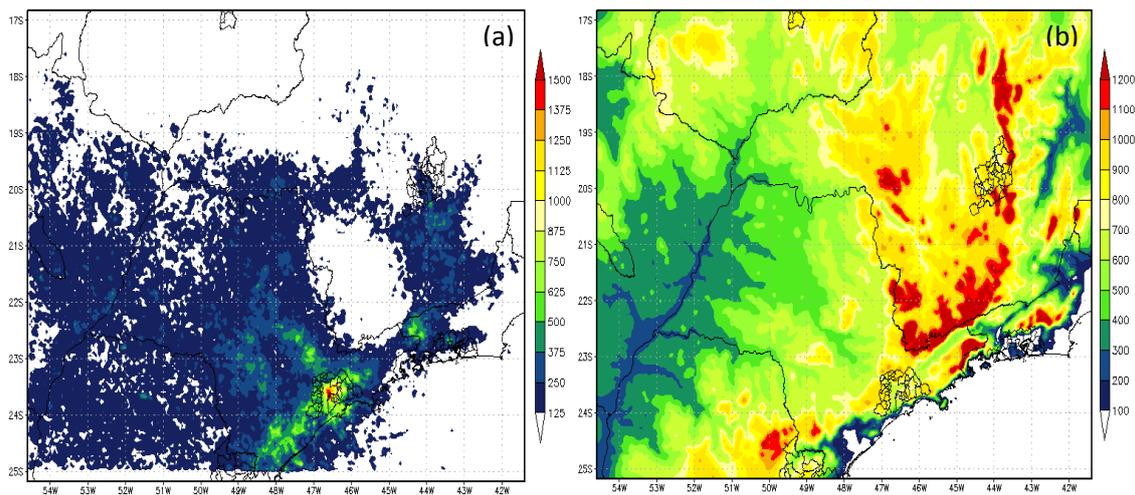


Figura 4.2 - Total de descargas elétricas detectadas pela RINDAT entre novembro de 2009 e março de 2012 (a). Os dados de descargas elétricas foram alocados em uma grade de 5 km x 5 km de espaçamento horizontal. Topografia (metros) da grade 2 das simulações do modelo WRF (5 km x 5 km de espaçamento horizontal) (b).

Nota-se que as regiões próximas à linha da costa da região sudeste caracterizam-se como aquelas nas quais o total de descargas elétricas observadas é mais acentuado. Observa-se que há uma faixa estreita paralela à linha da costa do estado de SP na qual o acumulado de descargas elétricas ultrapassa o valor de 625 ocorrências por ponto de grade ao longo dos 29 meses avaliados. Mais especificamente a Região Metropolitana do estado de São Paulo (RMSP) se destaca como aquela com maiores registros de descargas elétricas, com valores próximos a 1.500 ocorrências verificadas para cada ponto de grade durante o período de dados disponibilizado.

A figura 4.3 mostra a evolução diária da ocorrência de descargas elétricas ao longo dos 12 meses do ano para a região apresentada na figura 4.2. Os resultados representam as médias horárias de cada dia e para cada mês do período entre novembro de 2009 e março de 2012. A partir da análise da figura 4.3 observa-se que as evoluções diárias apresentadas para os meses da estação do verão, ou seja, para os meses de dezembro, janeiro e fevereiro, são idênticas entre si. As primeiras descargas elétricas do dia começam a ser observadas por volta das 14 UTC, se intensificam até atingir máximos por volta das 18 UTC e somente nos horários próximos às 05 UTC voltam a alcançar valores próximos de zero. Com isso, tem-se que o ciclo evolutivo da atividade elétrica ao longo dos dias pertencentes aos meses de verão possui características bem definidas com relação aos instantes de início, auge e fim da atividade elétrica. A evolução diária apresentada para o mês de março é bastante similar à verificada para os meses de verão, inclusive com acumulados horários próximos aos observados no mês de dezembro.

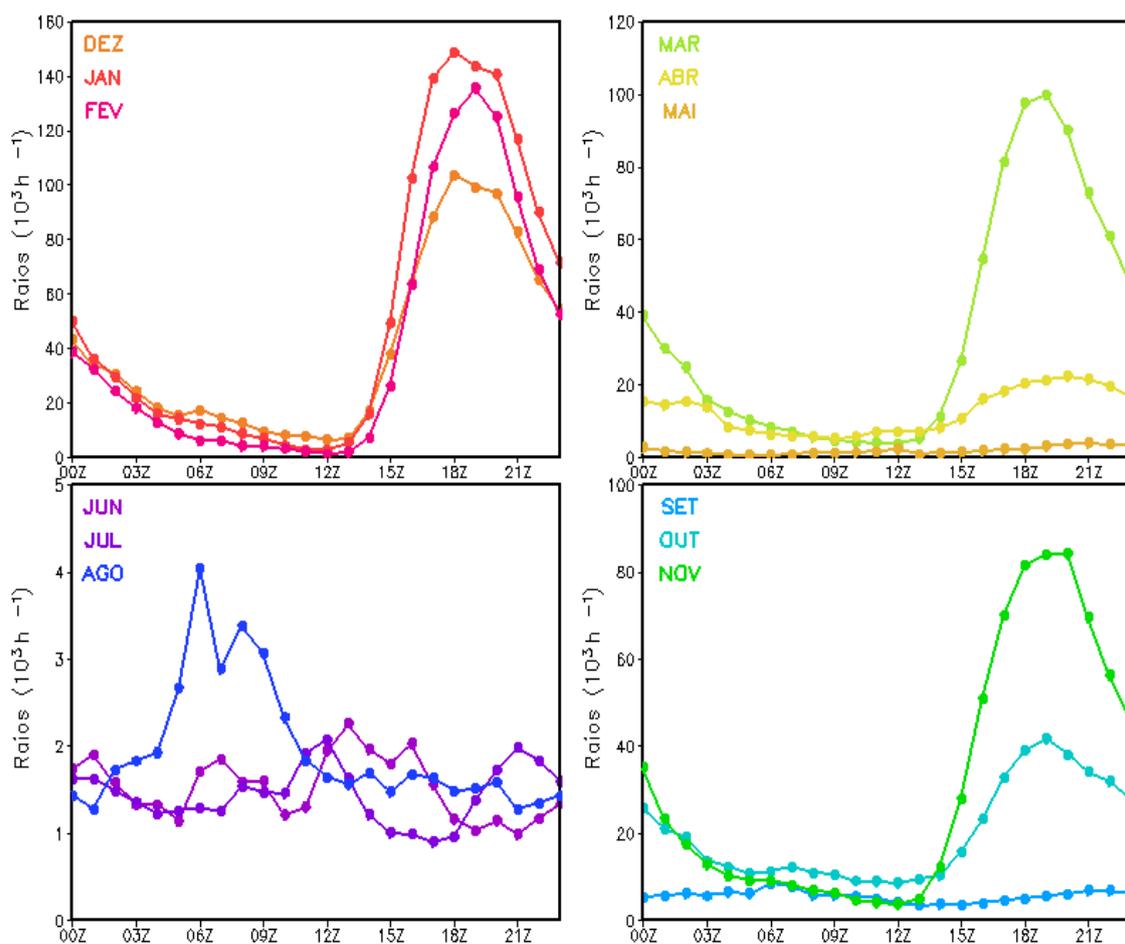


Figura 4.3 - Ciclo diário (médias horárias) das descargas elétricas ( $10^3 \text{ h}^{-1}$ ) detectadas pela RINDAT em cada um dos 12 meses do ano, para o período entre novembro de 2009 a março de 2012.

Os meses de abril, outubro e novembro também apresentam um ciclo evolutivo da atividade elétrica bem definido, similar ao descrito para os meses de verão, com a diferença de que os volumes de descargas elétricas observados são relativamente inferiores, principalmente no mês de abril. Por outro lado, nos meses de maio e setembro o ciclo evolutivo bem definido das descargas elétricas observado para os meses de verão não mais se caracteriza. Os acumulados horários de descargas elétricas, consideravelmente inferiores aos verificados para os meses entre outubro e março, se distribuem de maneira mais homogênea ao longo do dia, não havendo um período do dia preferencial para ocorrência de descargas elétricas. Nas evoluções diárias dos meses de junho, julho e agosto, constituintes da estação de inverno no Hemisfério Sul, apesar da escala de variação bastante reduzida, não se verifica a existência de um ciclo bem definido para a ocorrência de descargas elétricas, de forma que os acumulados horários se distribuem de maneira praticamente homogênea ao longo do dia.

Com base no descrito, é possível estabelecer dois padrões diferentes para a ocorrência de descargas elétricas ao longo do dia para cada mês do ano. O primeiro deles, típico dos meses de verão, mas constatado também nos meses de março, outubro, novembro e em amplitude consideravelmente menor no mês de abril, é caracterizado por um ciclo evolutivo bem definido, com horário preferencial para a ocorrência de descargas elétricas verificado entre os períodos da tarde e da noite, mais especificamente entre 14 e 05 UTC. O segundo padrão é típico dos meses de inverno, apesar de observado também nos meses de maio e setembro, e caracteriza-se por uma distribuição homogênea das descargas elétricas ao longo do dia. Estes padrões de distribuição da atividade elétrica ao longo do dia estão relacionados às características dos sistemas meteorológicos responsáveis pela produção das descargas elétricas.

Nos meses de verão, estes sistemas constituem-se basicamente de nuvens de tempestade de elevada extensão vertical que se desenvolvem a partir da convecção local, causada pelo elevado aquecimento da superfície e em um ambiente com bastante umidade disponível. Desta forma, devido à maior incidência de radiação solar durante os meses de verão, o aquecimento da superfície ocorre de maneira mais intensa, principalmente no período da tarde, fator este que, associado ao aumento da umidade causado pela entrada da brisa marítima (Borges e Pereira Filho, 2000) fornece os ingredientes necessários à formação e desenvolvimento das grandes nuvens de tempestade a partir das quais as descargas elétricas se originam. Portanto, estes fatores são os responsáveis pelo ciclo evolutivo apresentado pela atividade elétrica nos meses de outubro, novembro, dezembro, janeiro, fevereiro, março e abril, ciclo este que caracteriza os períodos da tarde e da noite como aqueles de maior atividade dos sistemas.

Nos meses de inverno a quantidade de radiação que incide no sudeste do Brasil é menor, de forma que a atmosfera se torna mais estável devido à menor quantidade de energia disponível. Com isso, o desenvolvimento de grandes nuvens de tempestade a partir, exclusivamente, da convecção local se torna menos comum. Além disso, com o deslocamento do Jato Polar para latitudes mais baixas, a entrada de frentes frias na região sudeste do país torna-se mais freqüente, fenômeno este caracterizado por nuvens de tempestades responsáveis por acumulados consideráveis de precipitação e por atividade elétrica de intensidade menor do que as observadas nas nuvens originadas da convecção local. Mais do que isso, o deslocamento de uma frente fria ocorre lentamente, de forma que este fenômeno pode atuar por muitas horas sobre uma mesma região, diferentemente do que ocorre com tempestades originadas da convecção local, que se desenvolvem rapidamente, atuando sobre

uma mesma região por um intervalo curto de horas. Desta forma, a atividade elétrica observada durante os meses de inverno é proveniente de sistemas meteorológicos de características diversas, mas principalmente das frentes frias. Portanto, uma vez que não há horário preferencial associado à entrada deste fenômeno na área avaliada, tem-se que a distribuição diária da atividade elétrica ocorre de maneira aleatória ao longo do dia, conforme observado para os meses de maio, junho, julho, agosto e setembro.

Conforme mencionado anteriormente, as áreas próximas à RMSP e ao litoral paulista correspondem aquelas com maiores acumulados de descargas elétricas detectadas pela RINDAT ao longo dos 29 meses de dados analisados. Desta forma, as imagens da figura 4.4 apresentam os acumulados de descargas elétricas observados para a região situada entre os paralelos de 25,2°S e 20°S e entre os meridianos de 48°W e 45°W, para os meses de janeiro de 2010 e 2011, que constituem respectivamente, dentre os três meses de janeiro avaliados, aqueles que obtiveram maior e menor número de raios detectados.

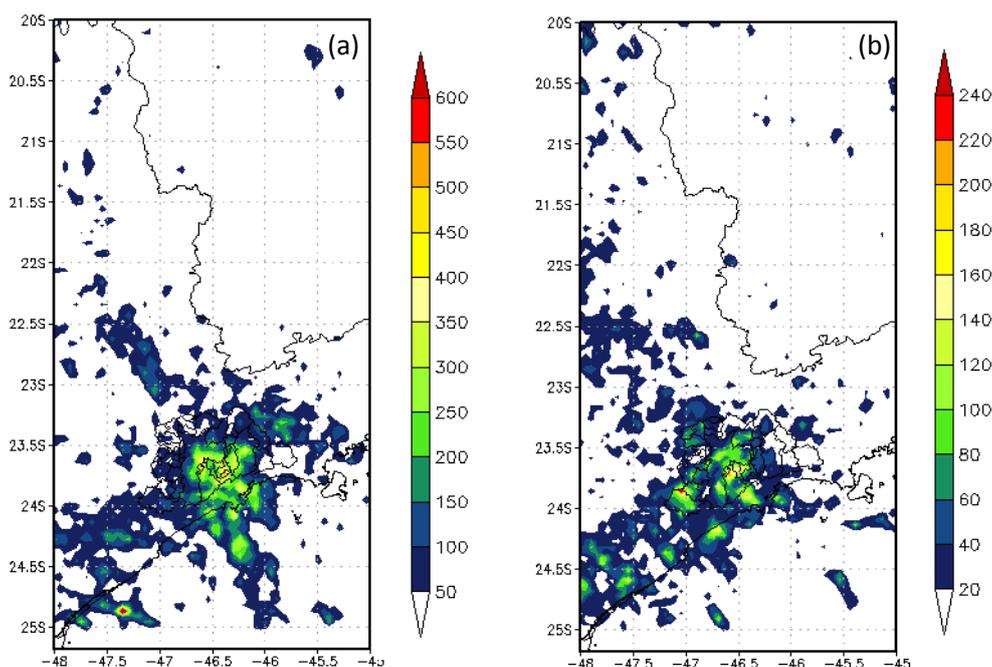


Figura 4.4 – Distribuição espacial do acumulado de descargas elétricas detectadas pela RINDAT para os meses de janeiro de 2010 (a) e janeiro de 2011 (b). Os dados de descargas elétricas foram alocados em uma grade de 5 km x 5 km de espaçamento horizontal.

A distribuição espacial das descargas elétricas observada para o mês de janeiro de 2010 na porção leste do estado de SP mostra que os maiores acumulados ocorreram próximo à RMSP, com valores próximos a 400 descargas elétricas observadas por ponto de grade. Ao norte do paralelo de 23°S praticamente não houve registro de números significativos de descargas. Além disso, parte da atividade elétrica verificada neste mês ocorreu sobre o

oceano, em uma região consideravelmente extensa, localizada a sudeste da RMSP. No oceano Atlântico, próximo à costa do litoral sul do estado paulista, os acumulados foram mais elevados, alcançando valores de 600 descargas observadas, porém abrangendo uma área bastante inferior à primeira.

No caso da distribuição espacial verificada para o mês de janeiro de 2011 tem-se que a ocorrência de descargas elétricas ocorreu predominantemente nas proximidades da RMSP, assim como observado para o mesmo mês do ano de 2010. Dois pontos de maior atividade elétrica podem ser notados, o primeiro a leste da RMSP, próximo ao ABC paulista, com valores próximos a 200 descargas elétricas em cada ponto de grade. O segundo localiza-se a sudoeste da RMSP, com acumulados que alcançam o valor de 240 descargas elétricas observadas ao longo do mês. O volume de descargas elétricas observadas ao norte do paralelo de 23°S também é insignificante neste mês. Distintamente do verificado em 2010, em janeiro de 2011 não houve registro de volumes representativos de descargas elétricas observadas sobre o oceano adjacente ao litoral paulista.

Com isso tem-se que, apesar das diferenças observadas em termos de intensidade de atividade elétrica entre estes dois meses, o padrão de distribuição das descargas elétricas é similar ao verificado na figura 4.2, de forma que a RMSP segue sendo a região na qual os maiores acumulados de descargas elétricas foram verificados.

Os gráficos da figura 4.5 apresentam o ciclo diário das descargas elétricas observadas na área mostrada na figura 4.4 para os 31 dias do mês de janeiro de 2010 e para os 29 dias do mês de janeiro de 2011. Cada uma das 31 linhas azuis que compõem o gráfico da figura 4.5 representa a evolução horária do acumulado de descargas elétricas para cada um dos dias do mês de janeiro de 2010 (a) e janeiro de 2011 (b). Há claramente um período preferencial para ocorrência de descargas elétricas na região leste do estado paulista para ambos os meses apresentados, período este que se inicia por volta das 12 UTC e se estende até algumas horas além da 00 UTC. Com exceção do ocorrido em alguns poucos dias dos meses de janeiro de 2010 e 2011, praticamente não se observa incidência de volumes consideráveis de descargas elétricas durante os horários entre às 02 UTC e às 13 UTC.

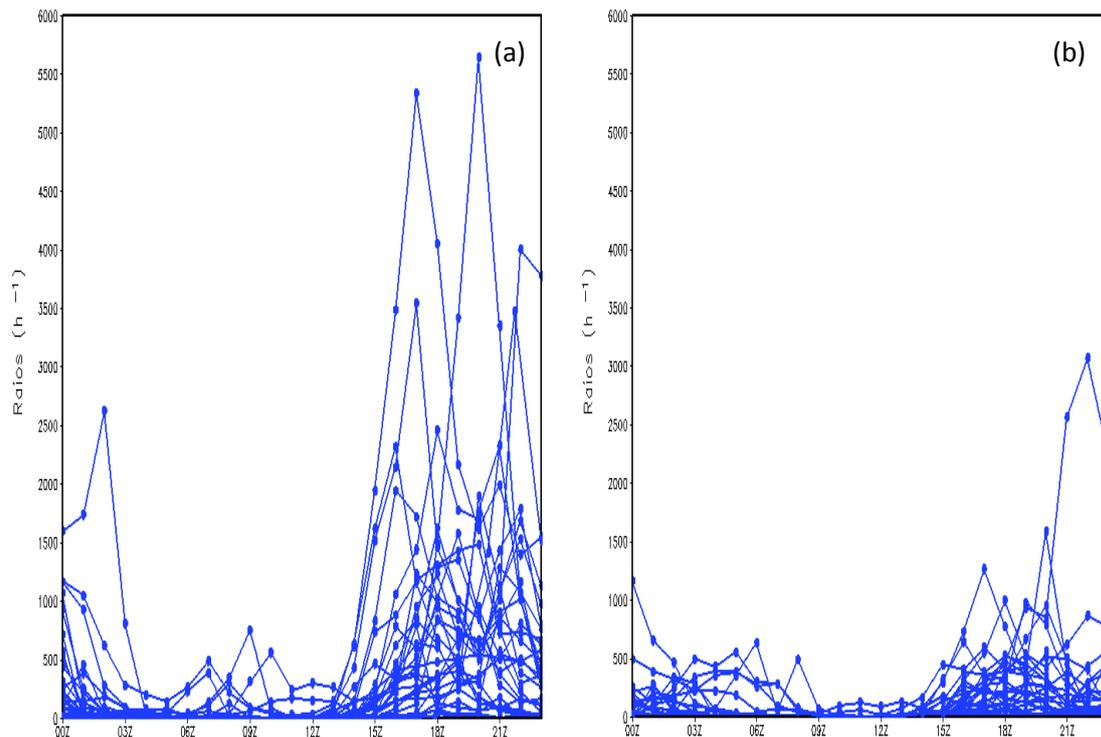


Figura 4.5 – Ciclo diário (médias horárias) das descargas elétricas ( $10^3 \text{ h}^{-1}$ ) detectadas pela RINDAT para os meses de janeiro de 2010 (a) e janeiro de 2011 (b).

Estes gráficos mostram a evidente diferença entre os meses de janeiro de 2010 e 2011 ao se tratar dos volumes de descargas elétricas detectadas pela RINDAT. O maior acumulado horário observado em janeiro de 2011 foi de aproximadamente 3.000 descargas elétricas, ao passo que no mês de janeiro do ano anterior, o máximo horário é quase duas vezes maior, ultrapassando o valor de 5.500 descargas registradas em uma hora. Além disso, com exceção deste único dia no qual o máximo horário alcançou o valor de 3.000 descargas, todos os demais dias do mês de janeiro de 2011 registraram acumulados horários de, no máximo, 1.500 descargas elétricas detectadas. Em contrapartida, no mês de janeiro de 2010, há um número considerável de dias nos quais este valor foi ultrapassado.

#### 4.2 – Estudos de Caso para Avaliação do LPI em Simulações com Altas Resoluções espaço-temporais

Para avaliar a eficiência de estimativa do LPI, proposto por Yair et al. (2010), quando aplicado aos resultados de simulações numéricas caracterizadas por altas resoluções espaço-temporais foram avaliados três estudos de caso, os quais são apresentados em detalhes a seguir. Estes casos foram escolhidos aleatoriamente através da análise visual da composição das imagens de satélite com os dados de descargas elétricas da *Sferics Timing and Ranging*

*Network* (STARNET). Na etapa de seleção destes casos os dados da RINDAT ainda não estavam disponíveis para análise.

As simulações realizadas para avaliação do desempenho do LPI em grade de alta resolução espaço-temporal, cujos resultados são apresentados nas figuras a seguir, não utilizaram nenhum tipo de parametrização de convecção para a resolução dos processos relativos à grade 3 do modelo para os três casos avaliados. Por outro lado, a parametrização de microfísica é utilizada somente na simulação da grade 3, não sendo aplicada nas grades 1 e 2. As demais parametrizações são as mesmas apresentadas na tabela 3.1. As simulações realizadas para os três casos se iniciaram às 12 UTC do dia do caso e se encerraram às 06 UTC do dia seguinte à ocorrência dos mesmos. A tabela 4.1 a seguir apresenta as características das grades simuladas para o caso 1.

Tabela 4.1 - Características espaço-temporais e de interação entre as grades utilizadas na simulação numérica do caso 1, ocorrido em 19 de janeiro de 2010.

Características	Grade 1	Grade 2	Grade 3
Espaçamento horizontal - $\Delta x$ e $\Delta y$ - (km)	27	9	3
Nº de pontos na direção X (Oeste-Leste)	149	149	149
Nº de pontos na direção Y (Norte-Sul)	108	98	119
Nº de níveis verticais	34	34	34
Passo no tempo (segundos)	150	50	16,67
Intervalo entre as saídas de dados (min)	180	60	20
Interação entre grades	two way		

As imagens da figura 4.6 apresentam, respectivamente, o acumulado de descargas elétricas e de LPI obtidos para as 18 horas de simulação numérica do caso 1. A figura 4.6 (a) mostra duas regiões principais nas quais foram registradas incidência de elevado número de descargas elétricas (aproximadamente 60 ocorrências por ponto de grade). A primeira delas, situada sobre a região central do estado de SP, em torno de 22,5°S e 49,0°W, teve seu potencial para ocorrência de descargas elétricas corretamente estimado em termos de intensidade e localização, apesar do índice apontar a ocorrência das descargas elétricas 0,5° ao sul da região onde as mesmas foram observadas (figura 4.6 (b)). A segunda região, situada a sudeste da RMSP, apresentou intensidade de descargas elétricas semelhante à registrada na região situada sobre o centro do estado, citada anteriormente. Entretanto, apesar de identificar a existência de potencial para ocorrência de descargas elétricas nesta região, o LPI não consegue estimar corretamente sua intensidade, resultando em valores de aproximadamente 80 m<sup>2</sup>s<sup>-2</sup>, valores estes abaixo daqueles observados sobre o centro do estado de SP, onde se estimaram potenciais próximos de 180 m<sup>2</sup>s<sup>-2</sup>.

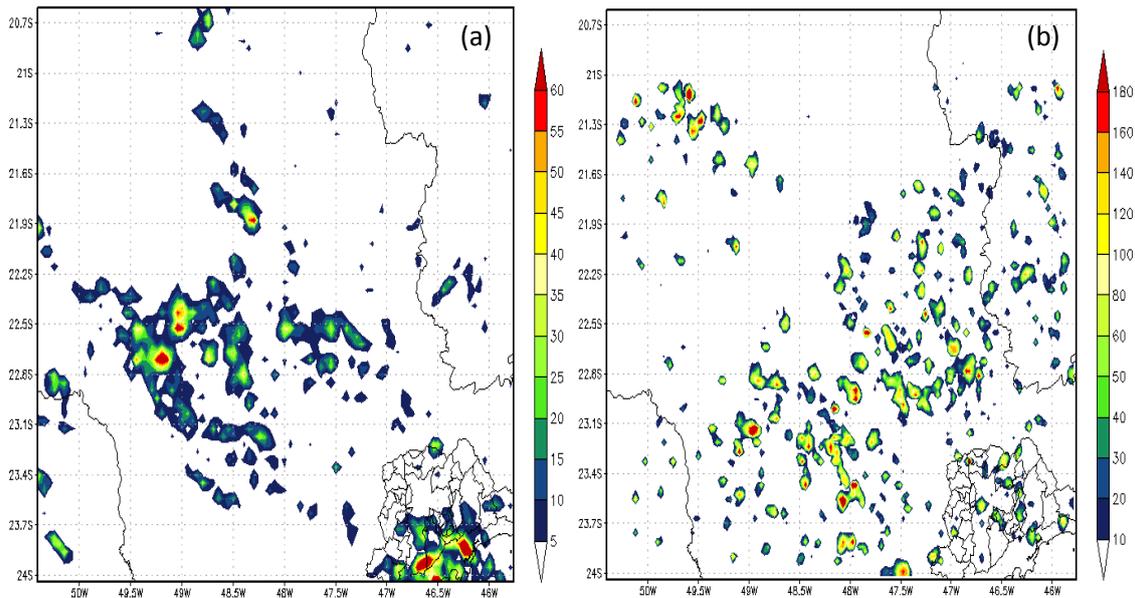


Figura 4.6 – Descargas elétricas (a) e LPI (b) ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ) acumulados durante as 18 horas de simulação numérica do caso 1, ocorrido em 19 de janeiro de 2010.

A figura 4.7 apresenta a evolução temporal do acumulado espacial de descargas elétricas e de LPI verificados durante as 18 horas de análise. Ou seja, para cada horário, somou-se o valor de cada uma das variáveis em cada ponto de grade da região exposta nas imagens da figura 4.6.

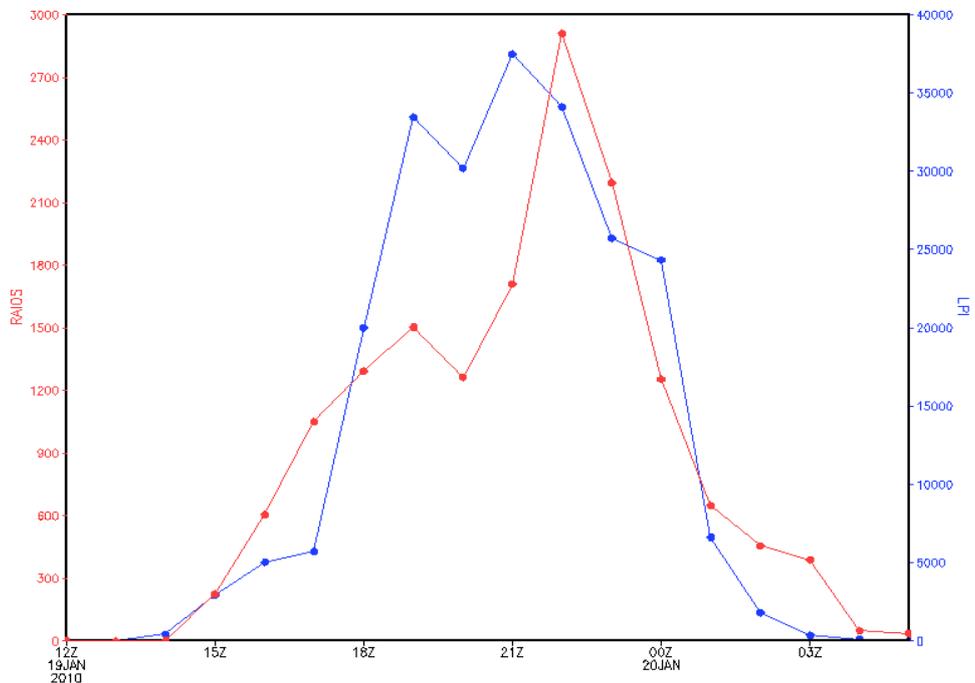


Figura 4.7 – Evolução temporal de descargas elétricas (série em vermelho) e de LPI ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ) (série em azul) ao longo das 18 horas avaliadas para o caso 1.

Ao avaliar a evolução das séries temporais apresentadas na figura 4.7, nota-se que o índice foi bastante preciso em descrever a evolução da atividade elétrica dos sistemas

meteorológicos que ocorreram durante as 18 horas analisadas. O LPI estimou o instante exato de início da incidência de descargas elétricas, observado às 15 UTC e apontou os horários de máxima atividade elétrica (21 UTC) e de decaimento do sistema (03 UTC) com apenas uma hora de antecedência. Observa-se também, na curva vermelha do gráfico da figura 4.7, que às 20 UTC há uma leve redução do total de descargas elétricas observadas, seguida de nova elevação nos valores desta série, culminando em seu máximo, de aproximadamente 3.000 descargas elétricas, às 22 UTC. Um comportamento semelhante pode ser observado na curva azul deste gráfico, que exhibe um decaimento de seus valores às 20 UTC e, posteriormente volta a crescer, atingindo seu máximo, de aproximadamente 40.000  $m^2s^{-2}$ , às 21 UTC, uma hora antes do que foi verificado na evolução temporal do acumulado de descargas elétricas.

As figuras a seguir mostram os resultados obtidos para o segundo caso analisado, a partir daqui denominado caso 2, ocorrido em 25 de fevereiro de 2011. Informações a respeito das características das grades simuladas para este caso podem ser obtidas na tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Características espaço-temporais e de interação entre as grades utilizadas na simulação numérica do caso 2, ocorrido em 25 de fevereiro de 2011.

Características	Grade 1	Grade 2	Grade 3
Espaçamento horizontal - $\Delta x$ e $\Delta y$ - (km)	27	9	3
N° de pontos na direção X (Oeste-Leste)	149	149	161
N° de pontos na direção Y (Norte-Sul)	108	98	125
N° de níveis verticais	34	34	34
Passo no tempo (segundos)	150	50	16,67
Intervalo entre as saídas de dados (min)	180	60	20
Interação entre grades	two way		

As imagens da figura 4.8 contêm o acumulado de descargas elétricas e de LPI obtidos para as 18 horas de simulação. O caso 2 constituiu-se de um conjunto de tempestades isoladas em toda a extensão oeste do estado de SP (figura 4.8 (a)). Dentre este conjunto de tempestades, destacam-se três de maior intensidade, nos quais se registraram os maiores acumulados de descargas elétricas por ponto de grade durante as 18 horas avaliadas. O primeiro deles localizou-se ao norte do estado, em torno de 20,5°S e 49,0° W, o segundo foi observado próximo de 21,5°S e 50,0°W, e o terceiro ocorreu a sudeste do primeiro, em 22,2°S e 49,0°W. Os três grupos apontados registraram incidência mediana de descargas elétricas, aproximadamente 35 ocorrências por ponto de grade, quando comparados às tempestades analisadas no caso 1.

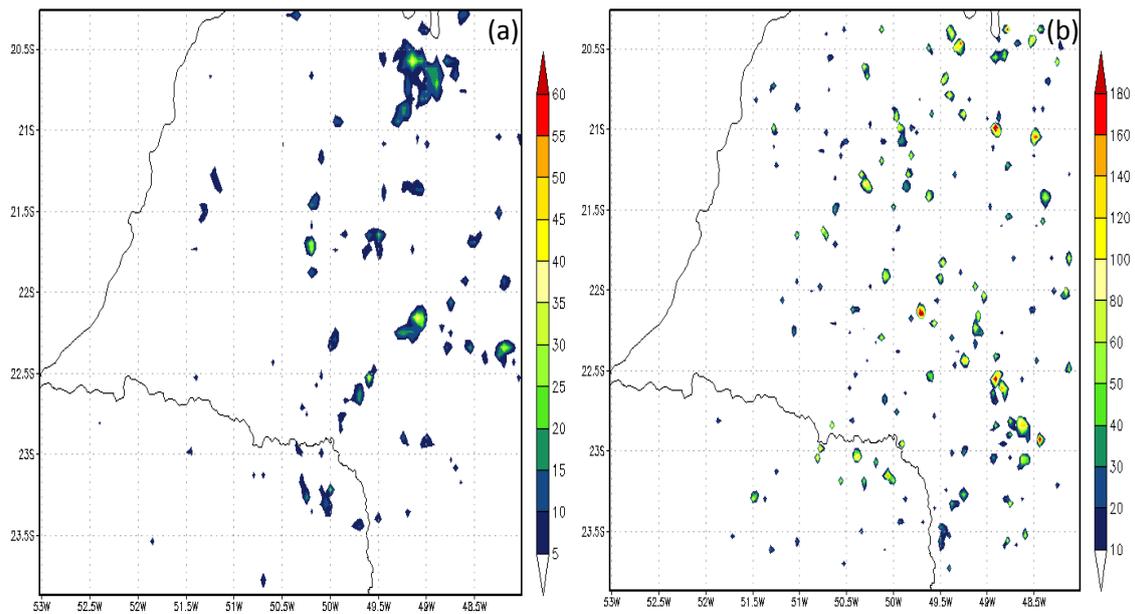


Figura 4.8 – Descargas elétricas (a) e LPI ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ) (b) acumulados durante as 18 horas de simulação numérica do caso 2, ocorrido em 25 de fevereiro de 2011.

Na figura 4.8 (b) nota-se que o LPI também apontou a existência de potencial para a ocorrência de descargas elétricas em regiões isoladas de SP, havendo, porém, algumas regiões de destaque. De acordo com os resultados obtidos para este índice, as regiões próximas aos pontos de  $21,0^\circ\text{S}$  e  $49^\circ\text{W}$ ,  $22,2^\circ\text{S}$  e  $49,8^\circ\text{W}$  e  $22,5^\circ\text{S}$  e  $49,0^\circ\text{W}$ , verificaram maior potencial para ocorrência de descargas elétricas (em torno de  $180 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ), regiões estas bem próximas daquelas destacadas na figura 4.8 (a).

O LPI apresentou desempenho semelhante ao observado no caso 1 para a evolução temporal das séries avaliadas, como mostra a figura 4.9. Assim como no caso 1, o índice estimou corretamente o momento exato de início da atividade elétrica observada na região avaliada, o que aconteceu às 15 UTC do dia 25. Às 20 UTC as curvas relativas às descargas elétricas e ao LPI registram seus valores máximos, de aproximadamente 1.200 ocorrências e  $10.000 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ . Em outras palavras, o ápice dos sistemas também foi estimado pelo índice com exatidão. O fim da atividade elétrica ocorreu às 04 UTC, o que pode ser visto pelo valor zero apontado pela curva vermelha neste horário. Entretanto, a curva azul, relativa ao LPI, somente retornou a valores nulos às 05 UTC, assinalando um atraso de uma hora na estimativa do instante de decaimento do sistema. Após atingir seu máximo às 20 UTC, observa-se redução dos valores de descargas elétricas até à 00 UTC, horário após o qual esta série volta a se elevar, atingindo um máximo secundário de aproximadamente 300 ocorrências às 02 UTC. Tal comportamento se repete na evolução temporal da série de LPI, que após o ápice ocorrido às

20 UTC, registrou decréscimo de seus valores até 01 UTC, voltando a crescer até alcançar um máximo secundário, de aproximadamente  $5000 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ , às 02 UTC.

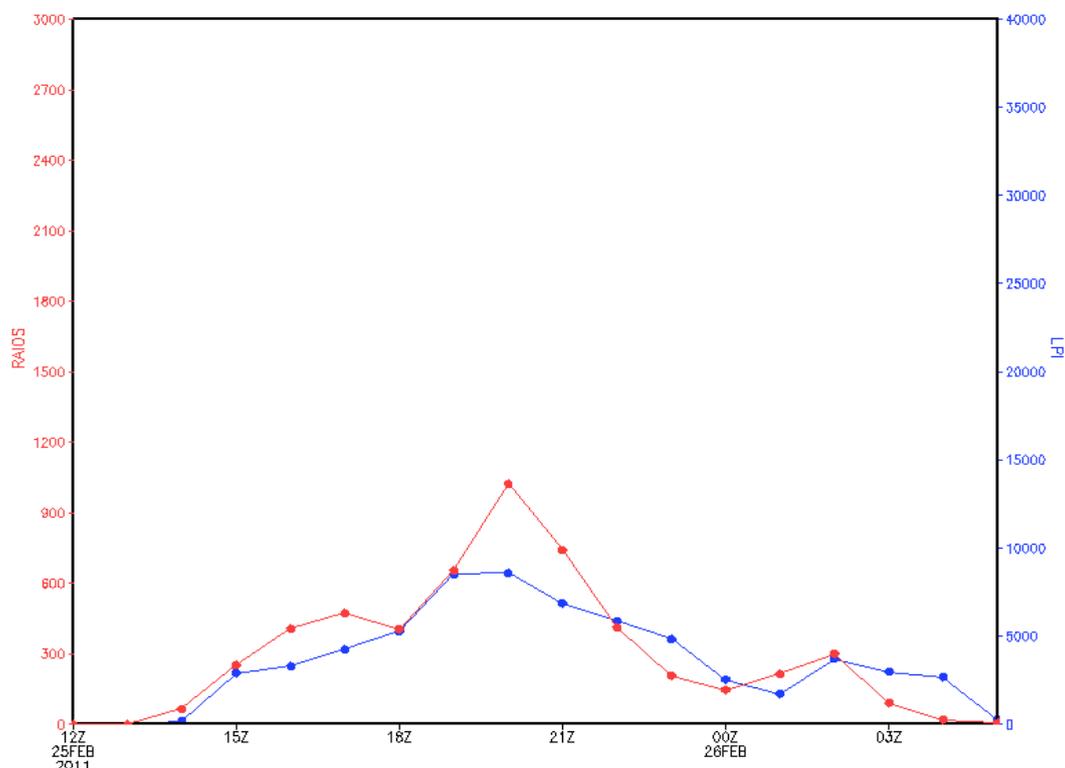


Figura 4.9 – Evolução temporal de descargas elétricas (série em vermelho) e de LPI ( $\text{m}^2\text{s}^{-2}$ ) (série em azul) ao longo das 18 horas avaliadas para o caso 2.

O caso 2 apresentou um total de descargas elétricas consideravelmente menor do que o caso 1, o que pode ser constatado através dos totais de descargas elétricas verificados no horário de máxima atividade de cada um dos casos, 3.000 e 1.200 ocorrências, respectivamente. As figuras 4.7 e 4.9 mostram que o LPI conseguiu distinguir a intensidade elétrica das tempestades ocorridas em cada um dos casos de maneira consistente. No caso 1, mais intenso, o LPI estimou um total de aproximadamente  $40.000 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$  para o horário de máxima intensidade de seus sistemas, e no caso 2, que registrou um número consideravelmente menor de ocorrências de descargas elétricas, no instante mais intenso, um total de  $10.000 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$  foi estimado por este índice.

Tabela 4.3 - Características espaço-temporais e de interação entre as grades utilizadas na simulação numérica do caso 3, ocorrido em 14 de novembro de 2011.

Características	Grade 1	Grade 2	Grade 3
Espaçamento horizontal - $\Delta x$ e $\Delta y$ - (km)	27	9	3
N° de pontos na direção X (Oeste-Leste)	149	149	149
N° de pontos na direção Y (Norte-Sul)	108	98	98
N° de níveis verticais	34	34	34
Passo no tempo (segundos)	150	50	16,67
Intervalo entre as saídas de dados (min)	180	60	20
Interação entre grades	two way		

As imagens da figura 4.10 apresentam os resultados obtidos para o caso 3 e os detalhes a respeito das características das grades simuladas são apresentados na tabela 4.3. Este caso ocorreu em 14 de novembro de 2011, data na qual a estação de verão ainda não havia se iniciado na região avaliada, ao contrário dos dois anteriormente descritos. Além da diferença relacionada à estação do ano na qual ocorreu, este caso difere dos demais também devido a pouca atividade elétrica registrada (figura 4.10 (a)).

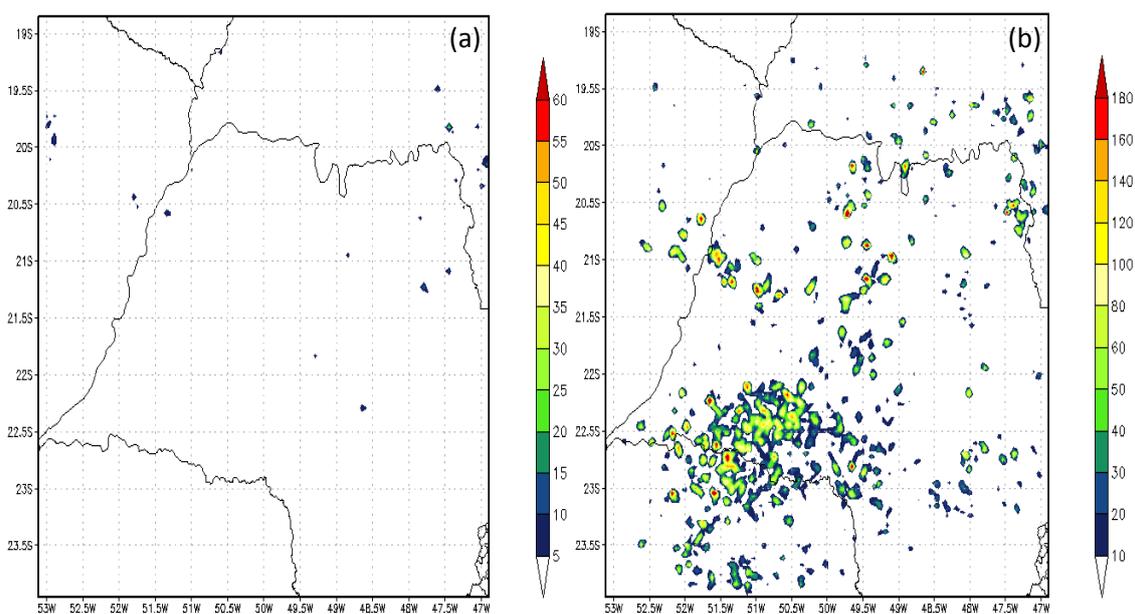


Figura 4.10 – Descargas elétricas (a) e LPI ( $m^2 \cdot s^{-2}$ ) (b) acumulados durante as 18 horas de simulação numérica do caso 3, ocorrido em 14 de novembro de 2011.

Como pode ser visto na imagem que apresenta o acumulado de descargas elétricas verificado ao longo das 18 horas de avaliação deste caso, atividade elétrica foi registrada somente em alguns pontos isolados ao norte do estado paulista e sobre algumas regiões nos estados de Minas Gerais e Mato Grosso do Sul. A intensidade da atividade elétrica observada nestes pontos foi baixa, em torno de aproximadamente 10 ocorrências por ponto de grade.

Todavia, a análise da figura 4.10 (b), apresenta uma grande região com alto potencial para ocorrência de descargas elétricas ( $180 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ ) na fronteira entre os estados de São Paulo e Paraná, próximo à latitude e longitude de  $22,5^\circ\text{S}$  e  $51,5^\circ\text{W}$ , respectivamente, região na qual não houve registro de incidência de descargas elétricas nos horários avaliados. Por outro lado, o índice aponta corretamente a existência de potencial para ocorrência de descargas elétricas nos pontos ao norte do estado de São Paulo e em Minas Gerais, apesar de estimar intensidade similar àquelas verificadas nos dois casos anteriormente avaliados, nos quais as observações mostraram que tais estimativas foram coerentes com as intensidades elétricas então registradas, situações estas contrárias à verificada no caso que aqui se discute. Portanto, neste caso, a localização dos sistemas meteorológicos situados sobre o norte de SP e em MG seria estimada de forma relativamente satisfatória, embora o mesmo não seja verificado com relação à intensidade da atividade elétrica destes sistemas, que seria superestimada pelo índice em questão.

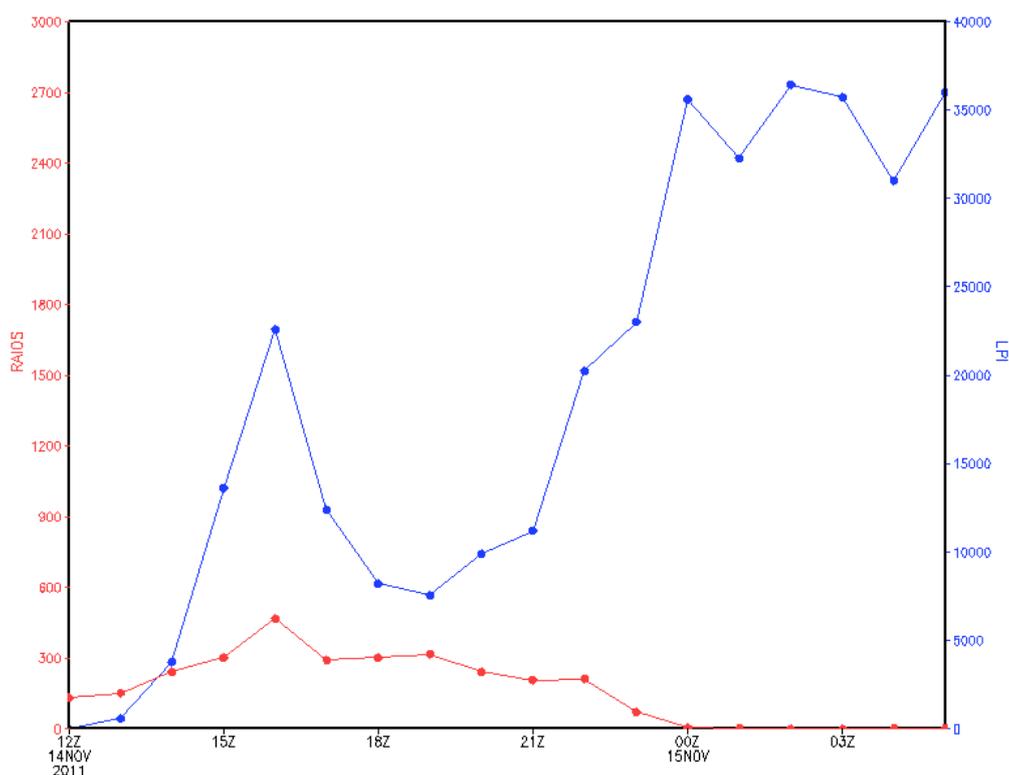


Figura 4.11 - Evolução temporal de descargas elétricas (série em vermelho) e de LPI ( $\text{m}^2\text{s}^{-2}$ ) (série em azul) ao longo das 18 horas avaliadas para o caso 3.

Diferentemente do verificado nos casos anteriormente descritos, as séries temporais de acumulados horários de descargas elétricas e de LPI não evoluem de maneira similar para o caso 3, como mostram as curvas apresentadas na figura 4.11. A curva vermelha mostra já haver ocorrência de atividade elétrica no primeiro horário de análise deste caso. Nota-se

também a não existência de um ciclo de vida bem demarcado, que possa ser separado em estágios de início, auge e fim da atividade elétrica. Outro ponto a ser destacado, além da distribuição homogênea das descargas elétricas ao longo das primeiras 12 horas observadas, é o baixo número de registros de descargas, mesmo para às 16 UTC, horário que verificou a maior atividade elétrica na região avaliada, em torno de 500 ocorrências aproximadamente.

Apesar de estimar potencial nulo para ocorrência de descargas elétricas no primeiro horário de análise, os valores de LPI obtidos para os horários imediatamente subsequentes se elevam rapidamente até atingir um máximo de aproximadamente  $24.000 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$  às 16 UTC, horário este no qual a série de descargas elétricas também atingiu seu máximo. Porém, os valores de LPI voltam a cair abruptamente nos horários seguintes, indicando haver grande variação no potencial para ocorrência de descargas elétricas entre às 14 UTC e às 18 UTC, variação esta que não foi observada na evolução temporal das descargas elétricas, conforme mencionado anteriormente. Além disso, após às 19 UTC, nota-se nova elevação nos valores de LPI, alcançando valores próximos a  $35.000 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$  à 00 UTC, oscilando em torno deste número até o final do período analisado, às 06 UTC do dia 15. Entretanto, esta segunda elevação verificada na evolução temporal do LPI não foi observada na curva vermelha, que de maneira oposta, apresenta os menores acumulados de descargas elétricas observados justamente para o período entre 00 UTC e 06 UTC, no qual o LPI atinge seus maiores valores ao longo das 18 horas analisadas. Portanto, o caso 3 se configura como um exemplo de baixa eficácia do LPI em estimar a atividade elétrica das tempestades avaliadas, tanto em termos de localização espacial das regiões com potencial para ocorrência de descargas, quanto do ponto de vista do desenvolvimento temporal das mesmas na região e período avaliados.

Outro aspecto a ser observado no conjunto dos três casos discutidos, é a intensidade da atividade elétrica de cada um deles. Do primeiro ao terceiro caso, o número de descargas elétricas observadas nos horários mais intensos de cada um dos casos é decrescente. Comparativamente, os valores de LPI obtidos nos instantes de máxima atividade elétrica destes casos também decrescem do primeiro para o segundo caso, comportamento este coerente com a atividade elétrica observada em cada um deles conforme mencionado acima. Porém, no caso 3, aquele no qual foi verificado menor número de descargas elétricas, o LPI ultrapassa o valor de  $35.000 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ , em 4 das 18 horas analisadas, sendo que no caso 1, o mais intenso dos três, o LPI ultrapassa o valor citado somente em uma das 18 horas apresentadas. Ou seja, este é mais um aspecto sob o qual o índice avaliado mostrou ser uma ferramenta confiável na tarefa de estimar a atividade elétrica dos casos 1 e 2, mas apresentou desempenho consideravelmente reduzido quando aplicado ao caso 3.

Através da análise das condições sinóticas dos casos acima descritos nota-se que os padrões de circulação atmosférica que se configuravam nos instantes de ocorrência dos casos 1 e 2 eram bastante similares (figura 4.12). Em ambos os casos a carta sinótica de superfície das 18 UTC mostra haver um sistema frontal localizado sobre o Rio Grande do Sul. A existência deste sistema sinótico localizado ao sul da região sudeste do Brasil, na qual os casos foram observados, aponta para o prevalectimento de características pré-frontais na atmosfera desta região. Portanto, de um modo geral, nos períodos de ocorrência dos casos 1 e 2, os padrões de circulação atmosférica em superfície não indicavam a existência de fenômenos de escala sinótica que inibissem o desenvolvimento de sistema convectivos intensos.

Em médios (500 hPa) e altos (250 hPa) níveis observa-se um padrão de circulação anticiclônica sobre os estados da região sudeste e centro-oeste do país. Este padrão de circulação é decorrente do sistema sinótico denominado Alta da Bolívia (AB), que se estabelece nas camadas altas da troposfera durante a estação de verão. Quando intensificado, este sistema influencia também os padrões de circulação na média troposfera, o que foi verificado nos casos 1 e 2, principalmente no primeiro. Uma das características deste sistema é ocorrência de difluência de ar nos níveis nos quais a circulação anticiclônica é verificada. Com base nesta última afirmação, conclui-se que os padrões de circulação presentes nas camadas médias e altas no período de ocorrência do caso 1 indicam a presença de difluência de ar nestas camadas. Já no caso 2, a conseqüente existência de difluência de ar devido aos padrões de circulação anticiclônica presentes no período de ocorrência deste caso somente pode ser constatada com maior clareza nas camadas mais altas da troposfera. Difluência de ar em camadas médias e altas é um fator que pode ser associado à ocorrência de movimentos ascendentes na coluna atmosférica, o que, conseqüentemente, favorece o desenvolvimento de convecção profunda na região sobre a qual este fenômeno é verificado. Desta forma, conclui-se que os casos 1 e 2 ocorreram sob condições atmosféricas que favoreciam o desenvolvimento de sistemas convectivos intensos, devido aos padrões de circulação presentes em médios e altos níveis, para o caso 1, e em altos níveis para o caso 2. Além disso, durante as 18 horas de análise de ambos os casos, a temperatura máxima registrada na estação meteorológica do IAG-USP foi de 31,4 °C e 29,7°C, respectivamente para os casos 1 e 2.

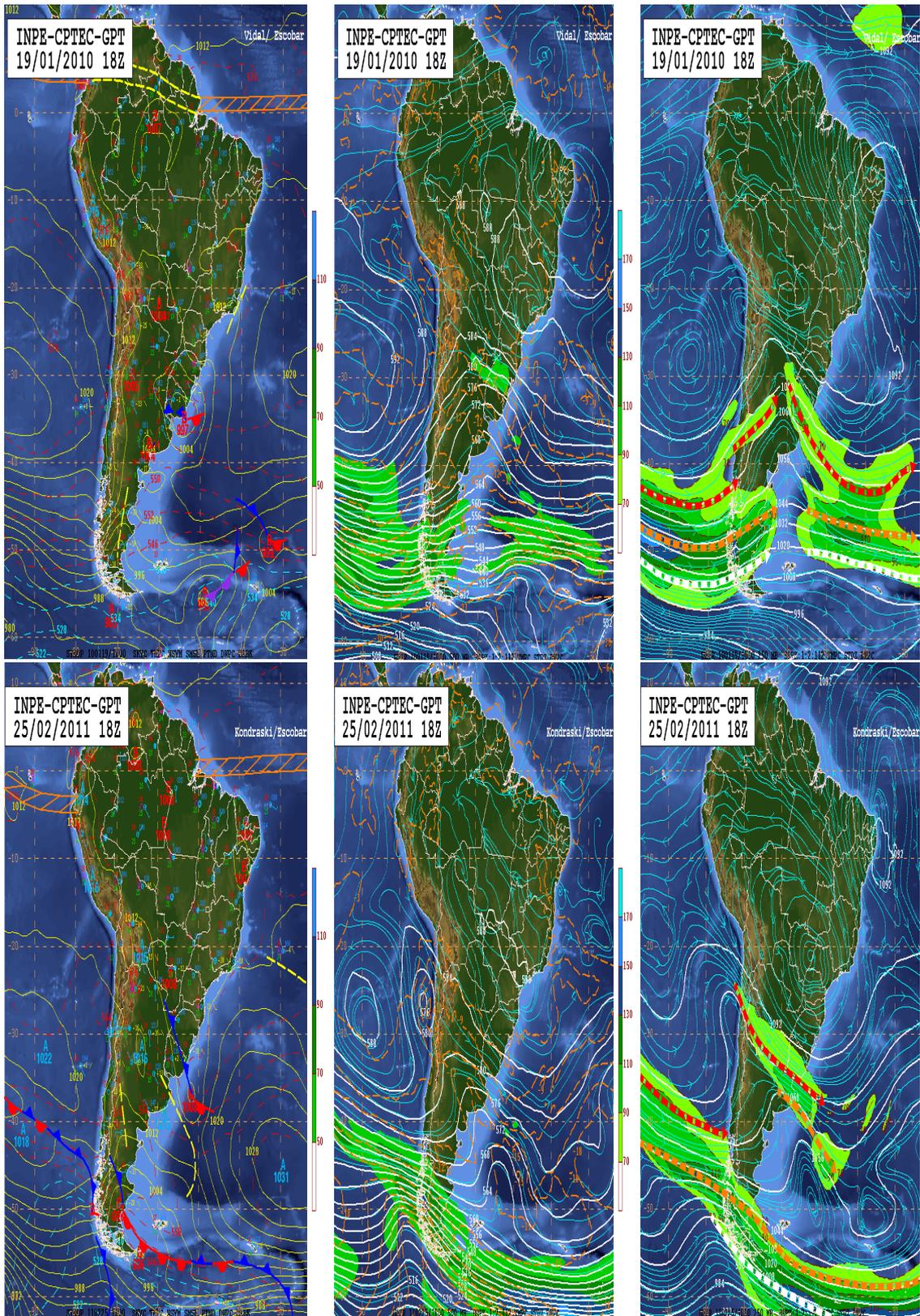


Figura 4.12 – Continua.

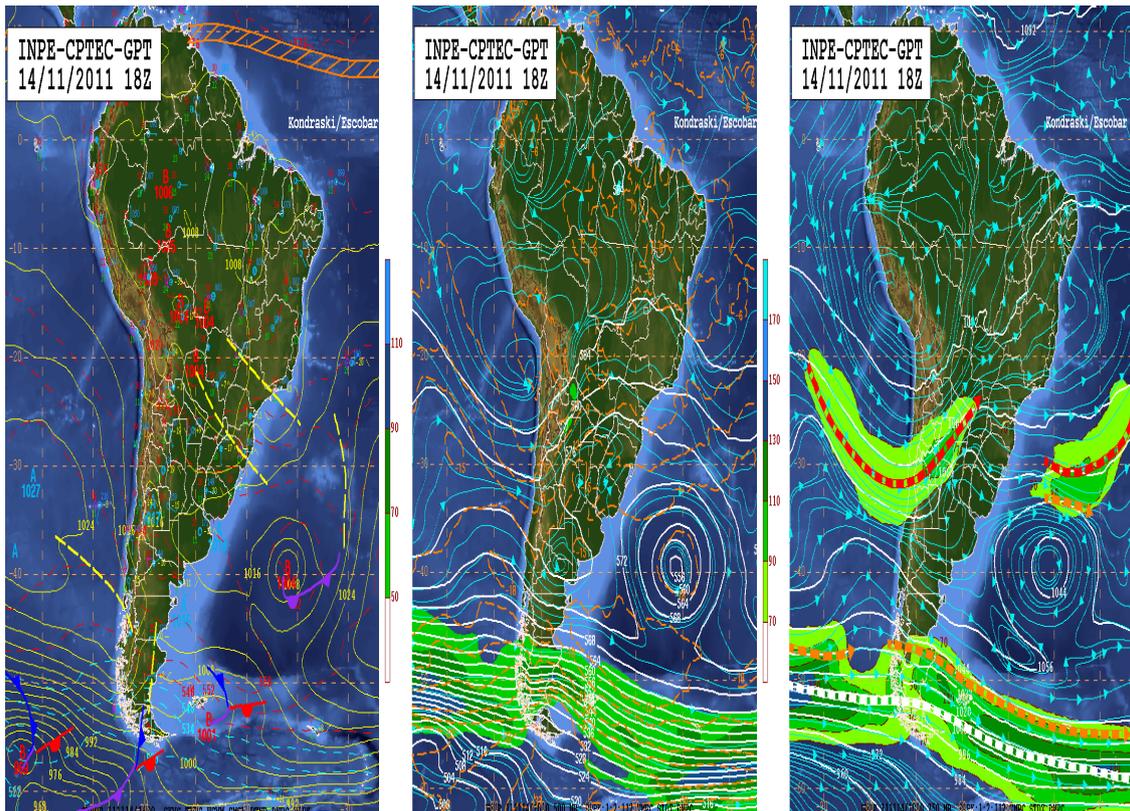


Figura 4.12 – Conclusão. Cartas sinóticas de superfície (à esquerda), médios (ao centro) e altos (à direita) níveis para as 18 horas da data de ocorrência dos casos 1, 2 e 3. Nas cartas de superfície são apresentadas as linhas de pressão constante ao nível do mar. As cartas de médios e altos níveis apresentam as linhas de altura geopotencial (dm) e as isotacas aos níveis de 500 hPa e 250 hPa, respectivamente. As cartas de médios níveis contêm também as isotermas e a magnitude do vento em 500 hPa. As cartas de 250 hPa contêm a magnitude do vento e o posicionamento do Jato Subtropical e dos ramos norte e sul do Jato Polar (CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS – CPTEC , 2013).

As características sinóticas verificadas nos casos 1 e 2 não foram observadas nas cartas isobáricas de baixos, médios e altos níveis das 18 UTC do dia 14 de novembro de 2011, horário no qual o caso 3 se desenvolvia sobre o sudeste do Brasil. A carta de superfície deste horário revela a existência de dois cavados sobre as regiões sul e sudeste do país. O primeiro deles situado ao norte do estado de SP, estendendo-se desde o nordeste do MS até o litoral norte paulista, e o segundo posicionado sobre o norte do RS, estendendo-se desde a região norte do Paraguai até o litoral norte do RS, ambos paralelos à direção noroeste-sudeste. A presença de cavados indica a existência de regiões de baixa pressão em superfície, característica esta que favorece a ascensão de massas de ar, devido à convergência de ar gerada pela referida condição de pressão atmosférica. Esta carta sinótica mostra também presença de um sistema ciclônico, centrado nas proximidades do encontro do paralelo de 40°S e com o meridiano de 40°W. Associado a este sistema ciclônico há uma frente fria, já em fase de oclusão, a partir da qual se estende um cavado em direção à costa norte do estado do Espírito Santo, indicando a

recente passagem do referido sistema frontal sobre o sudeste brasileiro. Ou seja, apesar da presença de cavados atuando sobre a região na qual o caso 3 foi observado, a recente passagem de um sistema frontal revela que as condições atmosféricas atuantes durante as 18 horas de análise deste caso eram desfavoráveis ao desenvolvimento de convecção profunda. Isto porque a passagem de um frente fria é sucedida pela passagem de uma massa de ar relativamente fria e seca, e conseqüentemente mais estável, o que dificulta o desenvolvimento de sistemas convectivos intensos.

A análise das cartas de níveis médios e altos da troposfera mostra um padrão de circulação constituído por um fluxo de oeste atuando sobre SP e o norte da região sul do Brasil, de forma que o padrão de circulação atmosférica à data de ocorrência do caso 3 ainda era bastante zonal, característica distinta da circulação predominante em médios e altos níveis durante o verão. O paralelismo observado nas linhas de corrente sobre a região em questão aponta para a não ocorrência de difluência nestas camadas, fato este não favorável à ocorrência de movimentos ascendentes na coluna atmosférica. Desta forma, ao contrário do constatado para os casos 1 e 2, o caso 3 ocorreu em uma atmosfera na qual os padrões de circulação, eram em sua maioria, desfavoráveis ao desenvolvimento de convecção profunda. Além do mais, no caso 3, a temperatura máxima registrada pela estação meteorológica do IAG-USP foi de 22,2°C, valor este consideravelmente menor do que aqueles registrados nos casos 1 e 2.

#### **4.3 – Avaliação do LPI e dos Hidrometeoros em Simulações de Menores Resoluções Espaço-Temporais**

De acordo com exposto na seção anterior, o LPI constituiu uma ferramenta útil na tarefa de diagnosticar o potencial para ocorrência de descargas elétricas em dois dos três casos avaliados. Este índice apresentou bom desempenho ao descrever as características da atividade elétrica dos casos 1 e 2, tanto em termos espaciais quanto temporais. Com base exclusivamente nestas análises, seria possível afirmar que o LPI é uma ferramenta confiável a ser aplicada para a obtenção de estimativas da atividade elétrica de sistemas convectivos com base em simulações numéricas obtidas de modelos meteorológicos.

Entretanto, faz-se necessário destacar algumas características importantes relativas às simulações numéricas que originaram os resultados obtidos para os casos em questão. A primeira delas refere-se à resolução espacial e temporal utilizada pelo modelo WRF para a realização destas simulações. Em cada um dos três casos o modelo foi simulado,

simultaneamente, em três grades aninhadas, de 27 km x 27 km, 9 km x 9 km e 3 km x 3 km de espaçamento horizontal, respectivamente. O espaçamento temporal aplicado a cada uma destas grades foi de 150, 50 e 16,67 segundos, com saída de dados para armazenamento a cada 180, 60 e 20 minutos, respectivamente. Conforme informado anteriormente, os resultados mostrados acima foram obtidos através da aplicação do LPI à simulação da grade de maior resolução espaço-temporal, ou seja, para a grade de 3 km x 3 km, com saída de dados a cada 20 minutos em cada um dos casos discutidos. Em outras palavras, o bom desempenho apresentado pelo LPI em diagnosticar o potencial para ocorrência de descargas elétricas dos casos ora avaliados foi obtido a partir de conjuntos de dados distribuídos em uma grade finamente espaçada, com frequência temporal de uma saída a cada 20 minutos. Com isso, pretende-se verificar se o bom desempenho apresentado pelo LPI somente será reproduzido se aplicado a simulações que apresentem resoluções espaço-temporais similares às aquelas então utilizadas, dispostas nas tabelas enumeradas de 3 a 5.

Outra característica relevante destas simulações é que, devido ao refinamento da grade mais interna, foi possível a utilização exclusiva, nesta grade, da parametrização de microfísica para reproduzir os processos que produzem precipitação. A utilização única e exclusiva deste tipo de parametrização só é possível em simulações realizadas com grades que possuam pequeno espaçamento horizontal, e conseqüentemente temporal, pois somente nestas condições ela é suficiente para reproduzir satisfatoriamente os processos de crescimento de nuvem dentro do modelo numérico. A parametrização de microfísica que foi aqui utilizada gera como produto final da simulação, entre outras variáveis, a razão de mistura de alguns hidrometeoros que são fundamentais nos procedimentos para o cálculo do LPI, como cristais de gelo (*ice*), flocos de neve (*snow*) e, principalmente, *graupel*. Desta forma, a utilização de outros tipos de parametrização de microfísica, que não tenham como produto todos hidrometeoros acima citados, por si só, impossibilita a utilização deste índice na obtenção de estimativas dos potenciais elétricos dos sistemas simulados.

Além disso, a utilização única e exclusiva deste tipo de parametrização é condicionada a simulações de alta resolução espacial, de forma que, simulações realizadas em grades que não possuam espaçamento horizontal refinado implicam obrigatoriamente na utilização de algum tipo de parametrização de *cumulus*. Neste ponto, faz-se necessário mencionar uma das principais motivações que levou à elaboração e execução deste projeto, ou seja, o desejo de se obter um método estimador que possa ser aplicado a simulações numéricas de caráter climatológico, para posterior avaliação do impacto que o aumento da concentração de gases do efeito estufa na atmosfera pode causar à atividade elétrica das tempestades. A realização

de tais simulações numéricas somente torna-se computacionalmente possível se aplicadas a grades que possuam menor frequência temporal e menor resolução espacial para o cálculo de cada uma das equações que constituem o modelo.

Portanto, tendo em vista o exposto, para cumprir com o objetivo inicialmente estabelecido, faz-se necessária a realização de simulações numéricas com menor resolução espaço-temporal e da utilização de algum tipo de parametrização de *cumulus* na execução das mesmas. Sendo assim, retornando novamente à avaliação do desempenho do LPI quando aplicado às simulações dos casos descritos na seção anterior, ressalta-se o fato de que em tais simulações não se utilizou nenhum tipo de parametrização de *cumulus*. Portanto, a utilização de algum tipo de parametrização de convecção, em conjunto com a parametrização de microfísica, pode e deve impactar a eficiência desta em produzir os hidrometeoros supracitados e, por conseguinte, nos resultados obtidos para o LPI, aperfeiçoando ou prejudicando o desempenho do mesmo. Finalmente, as simulações realizadas para o mês de janeiro de 2010 têm por objetivo encontrar métodos capazes de estimar a atividade elétrica de sistemas atmosféricos simulados através de modelos numéricos de resolução espacial reduzida. Portanto, sob estas novas condições de parametrização, o desempenho do LPI deve ser novamente avaliado.

Sendo assim, de acordo com as análises apresentadas na seção 4.2, o mês de janeiro de 2010 apresentou o maior acumulado de descargas elétricas observadas para o período de novembro de 2009 a março de 2012. Além disso, este mês pertence à estação do verão, a qual é caracterizada pela predominância de sistemas meteorológicos provenientes da convecção local, ou seja, sistemas de características convectivas. Com base nestas características o mês de janeiro de 2010 foi escolhido para ser simulado e analisado neste projeto. Entretanto, optou-se por realizar também uma segunda simulação numérica para outro período para que fosse possível realizar uma comparação entre os resultados obtidos. Para isso, o mês de janeiro de 2011 foi escolhido, por ser dentre os meses de janeiro disponíveis, aquele que registrou o menor acumulado de descargas elétricas. A tabela 4.4 contém informações a respeito das características das grades simuladas. As parametrizações e esquemas utilizados são apresentados na tabela 3.1.

Tabela 4.4 – Características espaço-temporais e de interação entre as grades utilizadas nas simulações numéricas dos meses de janeiro de 2010 e janeiro de 2011.

Características	Grade 1	Grade 2
Espaçamento horizontal - $\Delta x$ e $\Delta y$ - (km)	25	5
Nº de pontos na direção X (Oeste-Leste)	150	265
Nº de pontos na direção Y (Norte-Sul)	150	180
Nº de níveis verticais	34	34
Passo no tempo (segundos)	100	20
Intervalo entre as saídas de dados (horas)	3	1
Interação entre grades	one way	

Entretanto, uma vez que a região mostrada na figura 4.2 apresenta características tão distintas em termos de atividade elétrica, decidiu-se por reduzir a área de estudo, assumindo que a área redefinida possa ser representada por um mesmo conjunto de características meteorológicas. Além disso, os modelos meteorológicos, e não diferentemente se comporta o WRF, possuem limitações relacionadas à localização espacial, e até temporal, dos sistemas simulados. Em outras palavras, eventualmente as simulações numéricas não são capazes de representar os sistemas meteorológicos na região e instante corretos, nos quais estes verdadeiramente foram observados. Sendo assim, a escolha de uma área menor a ser estudada permite-nos representar toda a sua extensão espacial por um único ponto virtual, que seria constituído pela média ou soma dos valores das variáveis em cada ponto desta grade.

Portanto, a área de estudo foi limitada, após a realização das simulações numéricas, às regiões próximas a RMSP, na qual se verificam os maiores acumulados de descargas elétricas, conforme observado na seção anterior. A distribuição espacial da atividade elétrica observada nesta área para os meses de janeiro de 2010 e 2011 é apresentada nas imagens da figura 4.4.

#### 4.3.1 – Análise Binária Espacial

Uma vez realizadas as simulações numéricas, com o intuito de verificar quais variáveis meteorológicas estariam relacionadas à ocorrência de descargas elétricas, optou-se por transformar os resultados obtidos do modelo em campos binários constituídos por valores iguais a zero ou um. Clarificando o exposto, depois de obtidas as simulações numéricas, o propósito inicial foi o de verificar, dado um determinado ponto de grade e certo instante para os quais houvesse o registro de ao menos uma descarga elétrica, como se comportariam as demais variáveis em termos qualitativos. Sendo assim, para cada uma das 739 (696) horas do

mês de janeiro de 2010 (2011) e para cada ponto de grade, assumiu-se valor igual a um para aqueles que contabilizassem ao menos uma descarga elétrica, e zero para os demais.

Para os campos obtidos a partir das simulações o critério foi variável. No caso dos hidrometeoros considerou-se a somatória de suas respectivas razões de mistura em toda a coluna atmosférica, e então se atribuiu valores iguais a um para os pontos de grade cujos acumulados fossem maiores que zero, e valores nulos para os demais pontos de grade. O critério adotado para qualificar a velocidade vertical foi um pouco mais complexo. Um ponto de grade somente adquiriria valor igual a um se a componente vertical da velocidade do vento assumisse valor maior que  $1 \text{ m.s}^{-1}$  em ao menos uma das camadas médias e baixas da coluna atmosférica representada por aquele ponto. Ou seja, dentre os níveis de superfície e 9,5 km, caso fosse verificado ao menos um valor que alcançasse o limiar citado acima, atribuíam-se valor um para aquele determinado ponto de grade, e valor zero para aqueles que não atingissem tal critério. De acordo com Pertersen and Rutledge (1998), nuvens cumuliformes possuem uma escala de movimento vertical que varia entre 1 e  $10 \text{ m.s}^{-1}$ , citação esta que influenciou a escolha do limiar atribuído à componente vertical da velocidade do vento.

A chuva convectiva e o LPI foram categorizados sob a mesma perspectiva que os hidrometeoros, com exceção do fato de não ser necessário acumular seus valores em toda a coluna atmosférica, uma vez que o valor obtido a partir das simulações numéricas é aquele estimado para o nível de superfície e o valor final apresentado de LPI já foi verticalmente integrado de acordo com sua própria definição. Portanto, aos pontos de grade nos quais o modelo simulou valores maiores que  $1 \text{ mm.h}^{-1}$  atribuiu-se o valor um, e nos demais pontos o valor atribuído foi zero. Entretanto, de acordo com análises dos montantes simulados de chuva convectiva e chuva não convectiva, esta última apresenta valores da ordem de um terço daqueles obtidos para a primeira. Desta forma, o critério aplicado para a chuva não convectiva foi o de assumir valores iguais a um para pontos de grade nos quais a simulação numérica tivesse estimado volumes de precipitação maiores do que 0,3 mm em uma hora. A tabela 4.5 sintetiza os critérios descritos para a avaliação destas variáveis.

Tabela 4.5 – Síntese dos critérios aplicados aos valores horários de cada variável na construção do campo binário.

Variável	Limiar	Observações
Razão de mistura de ice (ICE)	$ICE > 0,0 \text{ kg.kg}^{-1}$	valores integrados na coluna atmosférica
Razão de mistura de snow (SNW)	$SNW > 0,0 \text{ kg.kg}^{-1}$	valores integrados na coluna atmosférica
Razão de mistura de graupel (GRP)	$GRP > 0,0 \text{ kg.kg}^{-1}$	valores integrados na coluna atmosférica
Velocidade vertical (W)	$W > 1,0 \text{ m.s}^{-1}$	valores entre superfície e 9,5 km
Precipitação convectiva (RAINNC)	$RAINNC > 1,0 \text{ mm}$	-
Precipitação não convectiva (RAINNC)	$RAINNC > 0,3 \text{ mm}$	-
<i>Lightning Potential Index</i> (LPI)	$LPI > 0 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$	-
Descargas elétricas (DE)	$DE > 0$	-

De posse destes valores, o próximo passo foi somá-los em todos os pontos de grade para cada hora e para cada variável. Desta forma, as séries temporais obtidas representam a quantidade de pontos de grade que obedecem aos critérios estabelecidos em cada hora analisada. A figura 4.13 apresenta os resultados obtidos para ice, snow, graupel e descargas elétricas a partir das simulações do mês de janeiro de 2010.

As curvas em verde, azul, vermelho e preto representam a série temporal do número de pontos de grade que atenderam aos critérios pré-estabelecidos para ice, snow, graupel e raio, respectivamente. Um dos primeiros aspectos a se observar nestes gráficos é o padrão oscilatório bem definido que apresenta a série relativa às descargas elétricas. Nota-se que tal oscilação é bastante similar à verificada no ciclo diurno de temperatura do ar, com elevações acentuadas registradas no início da tarde, entre às 14 UTC e 19 UTC, horário após o qual, de uma maneira geral, observa-se grande redução da quantidade de pontos de grade nos quais descargas elétricas foram registradas. Os valores permanecem bastante próximos de zero durante os períodos da madrugada e início da manhã, entre 00 UTC e 12 UTC. Além disso, a ocorrência de raios foi observada em todos os dias apresentados, com picos alcançando valores próximos a 300 pontos de grade não nulos na grande maioria dos dias, com atenção especial para o dia 26, no qual um total de aproximadamente 800 pontos de grade registrou a ocorrência de ao menos uma descarga elétrica às 18 UTC. Dentre todo o mês de janeiro de 2010, este horário constitui aquele no qual se verificou a maior extensão espacial, em termos de atividade elétrica, dos sistemas meteorológicos ocorridos durante este período na região analisada, isto porque este é o horário no qual o maior número de pontos de grade foi classificado como não-nulo em termos de descargas elétricas.

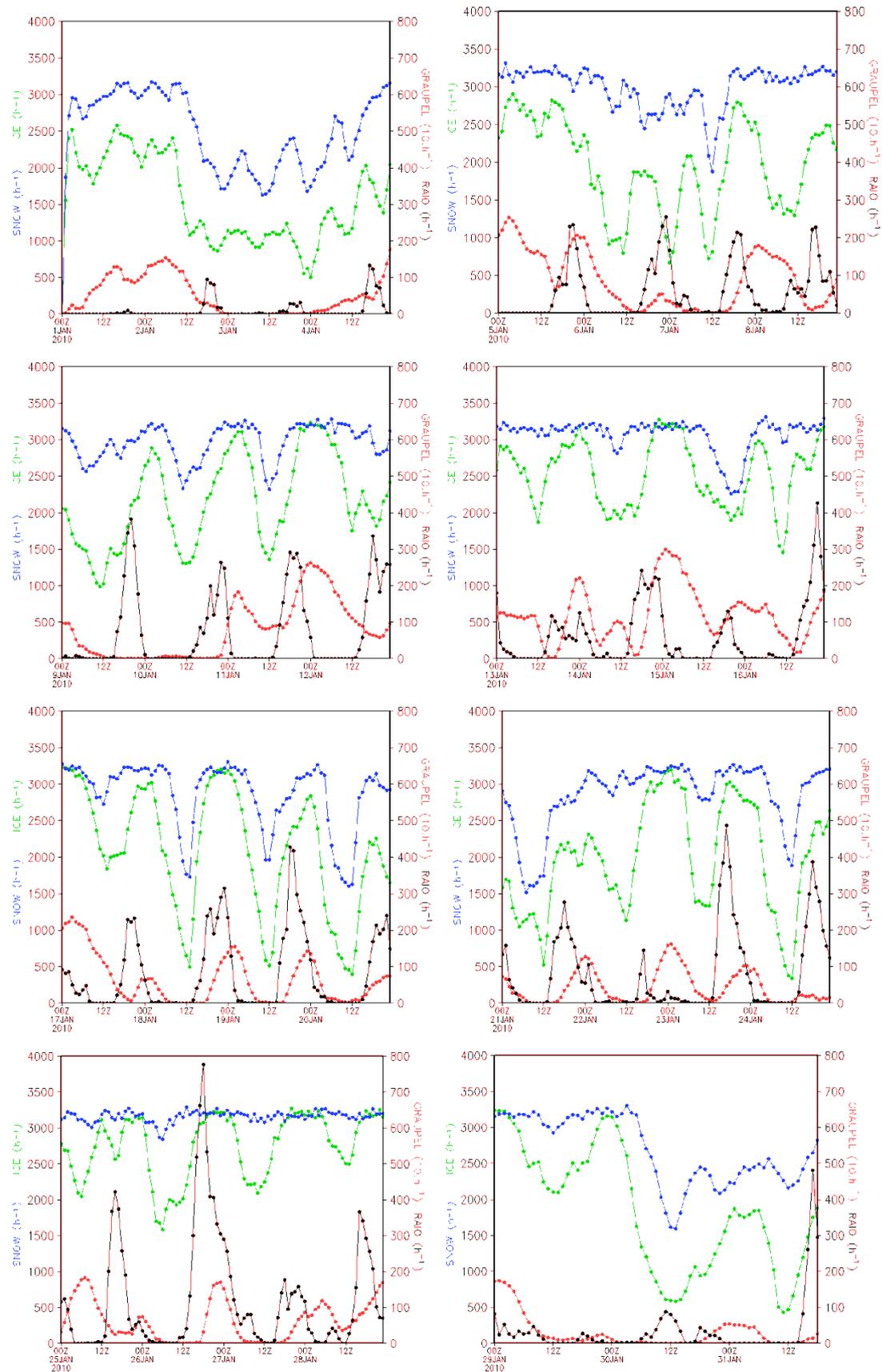


Figura 4.13 - Evolução temporal da quantidade de pontos de grade que atende aos critérios estabelecidos para ice (curva em verde), snow (curva em azul), graupel (curva em vermelho) e descargas elétricas (curva em preto) para a simulação do mês de janeiro de 2010.

A série temporal correspondente ao *ice* também apresenta um comportamento bastante oscilatório, de acordo com o que a curva verde dos gráficos da figura 4.13 apresenta. Em grande parte dos dias, os mínimos desta série são observados por volta das 12 UTC e os máximos próximos a 00 UTC, demonstrando assim, que os períodos da tarde e início da noite são aqueles onde há maior quantidade de pontos de grade nos quais o acumulado vertical de *ice* é não nulo. No caso dos resultados obtidos para a variável *snow*, não é possível distinguir um padrão oscilatório bem definido. Nota-se que, assim como na série relativa ao *ice*, mínimos são observados próximos às 12 UTC em parte dos 31 dias do mês de janeiro. Entretanto, não é possível estabelecer um horário no qual os máximos são observados, pois os maiores valores apresentados ocorrem durante períodos que se estendem por várias horas, como é o caso, por exemplo, do período entre os dias 25 e 30.

Um comportamento similar ao da evolução temporal de *ice* foi observado para a série de *graupel*, curva em vermelho nos gráficos apresentados na figura 4.13. A presença deste hidrometeoro nos pontos de grade da simulação realizada para o mês de janeiro de 2010 também obedece a um padrão oscilatório bem definido, composto de máximos que são verificados normalmente nos horários próximos a 00 UTC. Os mínimos ocorrem por períodos mais longos, os quais se estendem por até 10 horas em determinados momentos, como nos dias 18 e 20. Além disso, a quantidade de pontos de grade nos quais é verificada a presença deste tipo de hidrometeoro é consideravelmente menor do que as quantidades observadas para *ice* e *snow*. Ou seja, dentre os três hidrometeoros analisados, o *graupel* é o espécime mais raro obtido da simulação numérica, tanto em termos espaciais quanto temporais, pois ocupa uma extensão espacial consideravelmente menor e ocorre por um período de tempo bem mais limitado quando comparado aos demais espécimes de gelo.

Para efeito de comparação, a figura 4.14 apresenta novamente os resultados relativos aos raios, juntamente com aqueles obtidos para chuva convectiva (*rainc*), chuva não convectiva (*rainnc*), velocidade vertical (*vel*) e LPI. Nota-se que a série correspondente à chuva convectiva pertence ao grupo daquelas que apresentam padrão oscilatório bem definido, composto por máximos ocorridos entre 12 e 00 UTC de todos os dias constituintes do mês em questão, conforme demonstra a evolução da curva em azul nos gráficos da figura 4.14. A chuva não convectiva, por sua vez, não apresenta um padrão de oscilação bem definido, demarcado por ciclos de máximos e mínimos verificados a cada dia analisado, como observado para a parte convectiva da precipitação, conforme exposto acima.

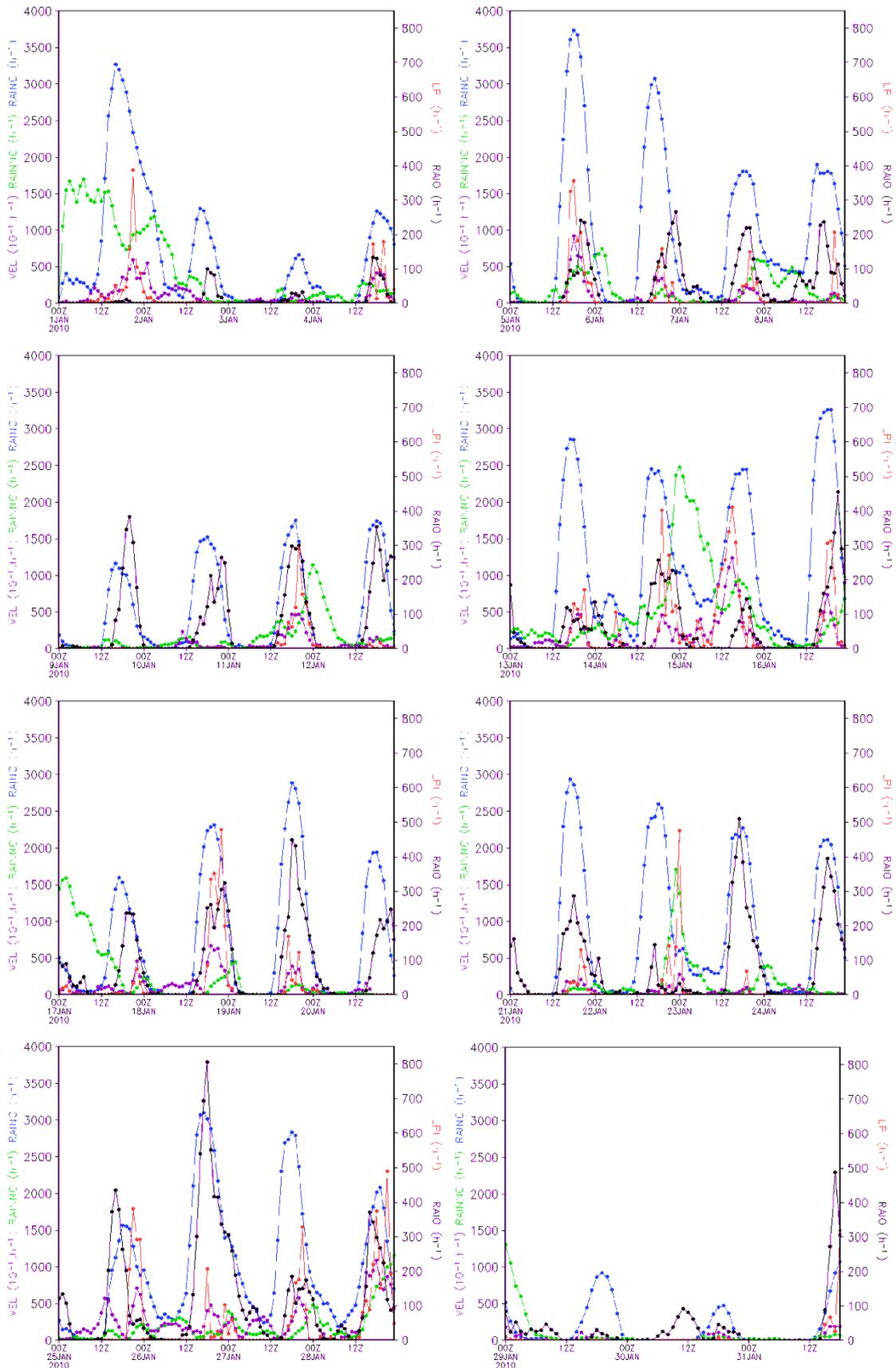


Figura 4.14 - Evolução temporal da quantidade de pontos de grade que atende aos critérios estabelecidos para rainc (curva em verde), rain (curva em azul), LPI (curva em vermelho), velocidade vertical (curva em roxo) e descargas elétricas (curva em preto) para a simulação do mês de janeiro de 2010.

Outro aspecto a ser observado é que, com exceção de 5 dos 31 dias avaliados, a extensão territorial na qual o critério estabelecido para esta variável é atingido é bastante inferior àquela obtida para a chuva convectiva. No caso da velocidade vertical, poucos são os pontos que obedecem aos critérios estabelecidos. Apesar disso, esta variável apresenta um padrão de oscilação parecido com o padrão de oscilação da chuva convectiva, com máximos verificados normalmente entre às 12 e 00 UTC.

Desta forma, avaliando estes resultados, de uma maneira geral, a variável que melhor se relaciona, em termos de abrangência espacial, com a ocorrência de descargas elétricas é a chuva convectiva. Ou seja, em praticamente todos os momentos nos quais se observou um aumento da área na qual descargas elétricas foram registradas, observa-se também um aumento do número de pontos de grade nos quais a chuva convectiva atende ao critério estabelecido para esta variável. Outro ponto a ser destacado relaciona-se à defasagem de oscilação das séries. Mesmo entre aquelas que possuem padrão oscilatório bem definido é possível notar a diferença entre os horários nos quais os máximos são observados. Desta forma, para minimizar possíveis delimitações do modelo em simular corretamente a evolução temporal das variáveis, calculou-se a correlação de cada uma delas com a série temporal relativa às descargas elétricas, considerando-se defasagens temporais de zero hora até 23 horas.

Na análise das curvas de correlação apresentadas no gráfico da figura 4.15 é possível distinguir dois grupos de variáveis com base no comportamento das correlações apresentadas. O primeiro deles é composto pelas variáveis que representam o aspecto microfísico das simulações numéricas realizadas, ou seja, tal grupo é formado pelas curvas relativas ao ice, snow, graupel e chuva não convectiva. Para este grupo observa-se que, à medida que a defasagem no tempo aumenta, a evolução temporal destas variáveis se correlaciona melhor com a série relativa às descargas elétricas, até atingir seu máximo, que ocorre após 4 horas de defasagem para o ice e o snow, e após 6 horas para graupel e chuva não convectiva. A chuva não convectiva é um produto gerado pela parametrização de microfísica utilizada na simulação numérica, que por sua vez também é a responsável pela produção dos hidrometeoros aqui avaliados.

O segundo grupo é aquele formado pelas variáveis que estão mais relacionadas ao aspecto convectivo da simulação numérica. Neste grupo encontram-se as correlações obtidas para a componente vertical da velocidade do vento e para a chuva convectiva. O comportamento de ambas as curvas é tal que, à medida que a defasagem no tempo se eleva,

as correlações obtidas diminuem, até alcançar os valores mínimos de cada uma delas por volta de 11 horas de defasagem. A terceira variável que se enquadra neste grupo é o LPI, que apesar de ter sua formulação composta majoritariamente por variáveis pertencentes ao primeiro grupo, ou seja, variáveis relacionadas à microfísica da simulação, considera também, e com peso especial, a velocidade vertical, que aparece elevada ao quadrado na equação que descreve este índice (equação 3.5). Ou seja, as correlações obtidas para o LPI para cada defasagem temporal considerada entre esta série à relativa às descargas elétricas respondem da mesma maneira que aquelas obtidas para a velocidade vertical devido ao forte peso que tal variável possui na formulação deste índice.

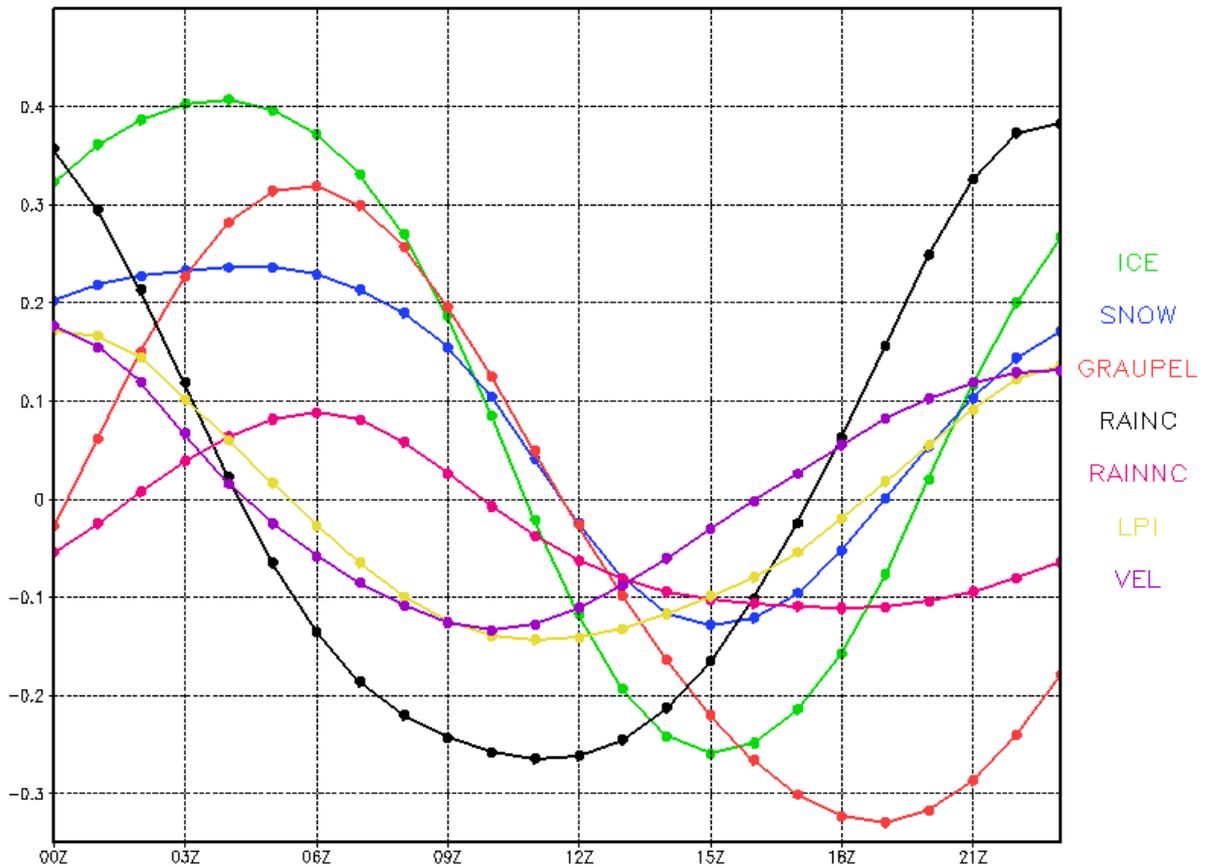


Figura 4.15 - Correlação entre as variáveis simuladas e a série de descargas elétricas obtidas para defasagens de 0 a 23 horas para a simulação de janeiro de 2010.

Sendo assim tem-se que a parametrização convectiva utilizada nas simulações representa bem as características temporais do ciclo diário da atividade elétrica, de forma que a melhor correlação obtida entre as variáveis que são produzidas por tal parametrização e as descargas elétricas ocorre ao se considerar nenhuma defasagem temporal entre estas séries. Por outro lado, a parametrização de microfísica somente responde às condições atmosféricas que levaram à ocorrência de descargas elétricas com certo atraso, de forma que a melhor

correlação entre as variáveis produzidas por esta parametrização e as descargas elétricas somente é verificada ao considerar-se uma defasagem temporal de 4 a 6 horas entre as séries. Tal fato pode ser explicado pela maneira como ambas as parametrizações interagem durante as simulações numéricas. Uma das funções da parametrização de *cumulus* em um modelo atmosférico é distribuir entre suas diversas camadas verticais a instabilidade atmosférica originada na superfície do mesmo, para assim, evitar possíveis instabilidades numéricas que possam surgir devido ao acúmulo de energia nas camadas mais baixas da grade simulada. Outra característica desta parametrização é que todo o excesso de vapor proveniente da supersaturação é diretamente transformado em água de nuvem ou água de chuva. Desta forma, estas duas características da parametrização de *cumulus* influenciam diretamente na eficiência da parametrização de microfísica em produzir hidrometeoros na simulação realizada. A primeira porque reduz a instabilidade da coluna atmosférica, o que, por sua vez, reduz a velocidade vertical das parcelas de ar que ascendem a partir das camadas mais baixas levando vapor d'água para a formação de hidrometeoros, principalmente aqueles da fase sólida. Isto porque os hidrometeoros da fase de gelo só se formam quando a parcela de ar ultrapassa a isoterma de 0°C, que se localiza acima do NCL. A segunda porque diminui a quantidade de vapor d'água proveniente da supersaturação que está disponível para a formação de gelo, uma vez que parte dele é utilizado diretamente para a formação de gotas de nuvem e de chuva pela parametrização de *cumulus*. Desta forma, a parametrização de microfísica, além de ter sua eficiência reduzida, ainda leva mais tempo para reproduzir as condições atmosféricas que levaram ao desenvolvimento de atividade elétrica dentro das nuvens e à incidência de raios. Sendo assim, com base no exposto, diferentes defasagens temporais foram adotadas para as séries temporais das variáveis avaliadas, conforme mostra a tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Defasagens temporais consideradas na avaliação das séries temporais das variáveis simuladas pelo modelo para os meses de janeiro de 2010 e 2011.

Variável	Defasagem Aplicada
Velocidade Vertical	0
Razão de Mistura de <i>Ice</i>	4
Razão de Mistura de <i>Snow</i>	4
Razão de Mistura de <i>Graupel</i>	6
Chuva Convectiva - Rainc	0
Chuva Não Convectiva - Rainnc	6
<i>Ligthning Potential Index</i> - LPI	0

Uma vez que a relação temporal entre as séries foi otimizada, a próxima etapa de análise consistiu em avaliar a relação entre estas séries sob um ponto de vista mais

quantitativo. Ou seja, os próximos resultados apresentados foram obtidos a partir da utilização dos valores reais das variáveis em cada ponto de grade do modelo, não mais ao se utilizar índices dados a partir dos critérios estabelecidos anteriormente para cada uma delas.

#### **4.3.2 – Comparação da evolução temporal das descargas elétricas com o perfil vertical dos hidrometeoros e da velocidade vertical**

A figura 4.16 mostra a evolução temporal da série de descargas elétricas juntamente com a evolução temporal da distribuição vertical da razão de mistura de ice simulada pelo modelo para o período entre 25 e 28 de janeiro de 2010. Dos 31 dias analisados, o dia 26 de janeiro foi o dia que registrou maior acumulado de descargas elétricas, com as primeiras ocorrências verificadas já por volta das 13 UTC, passando por um pico às 17 UTC e estendendo-se até 9 UTC do dia seguinte. Nos dias 25, 27 e 28 a atividade elétrica registrada foi consideravelmente menor, com valores de 2.400, 700 e 2.000 descargas acumuladas nos horários de maior atividade dos sistemas ocorridos em cada um destes dias, respectivamente. Nestes quatro dias nota-se que o período mais ativo dos sistemas meteorológicos dos quais provêm as descargas elétricas ocorre entre as 12 e as 00 UTC. Entretanto, um período secundário de registro de atividade elétrica é também verificado entre às 00 e 12 UTC nos dias 25, 27 e 28.

Os volumes simulados de razão de mistura de ice para os horários entre 12 e 00 UTC para os quatro dias apresentados são consideráveis. Estes volumes concentram-se principalmente entre os níveis de 12 a 15 km de altura. Uma característica importante a ser observada na figura 4.16 é a relação entre a quantidade de hidrometeoro simulado e o total de descargas elétricas observadas. Dos quatro dias apresentados, o dia 26 foi o que registrou maior acumulado horário de descargas elétricas ao passo que o dia 27 obteve o menor valor horário de descargas.

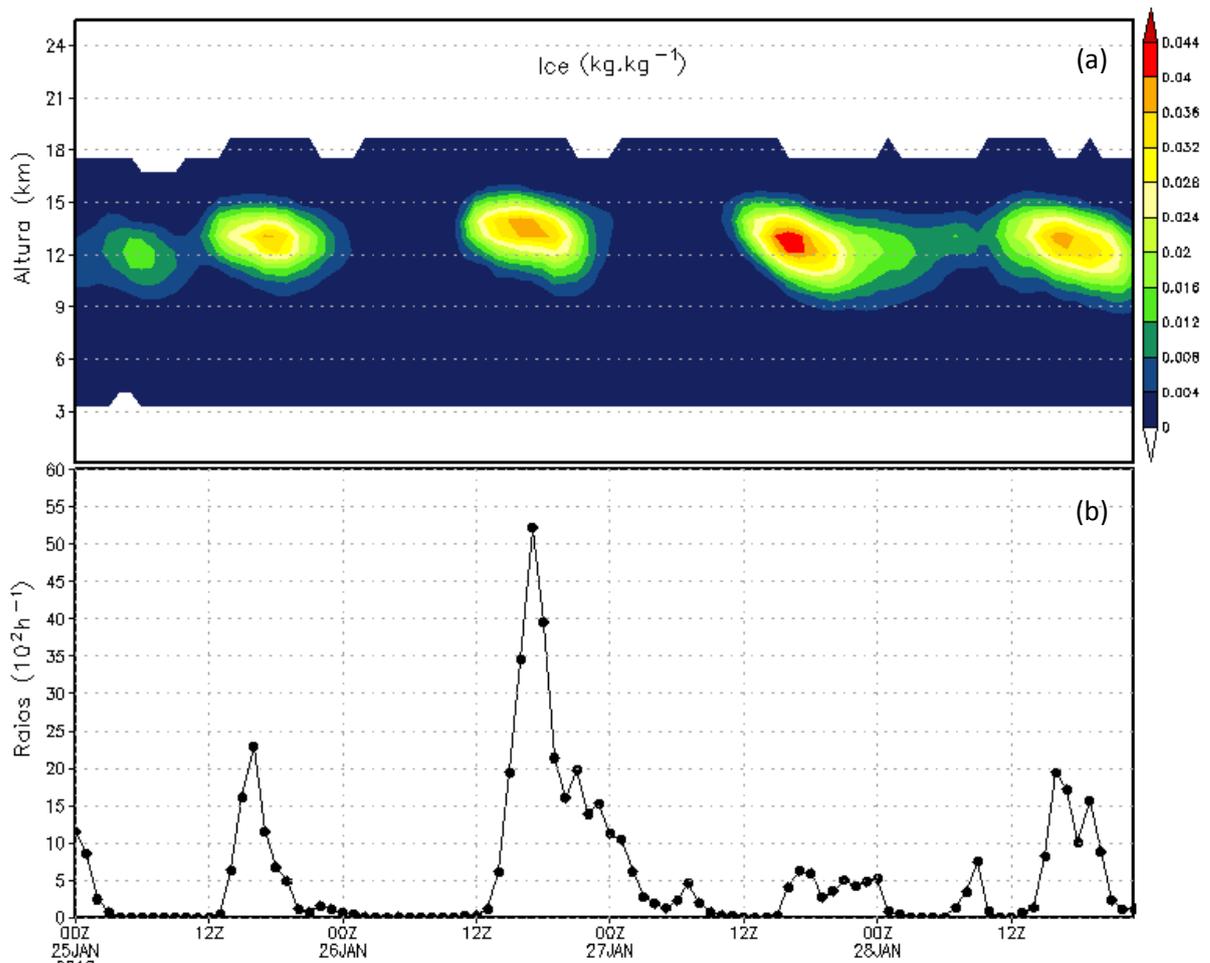


Figura 4.16 – Distribuição vertical dos valores de razão de mistura de ice ( $\text{kg.kg}^{-1}$ ) (a) e evolução temporal dos valores de descargas elétricas (b) acumulados na área apresentada nas imagens da figura 4.4 para o período entre 00 UTC do dia 25 de janeiro de 2010 e 23 UTC do dia 28 de janeiro de 2010.

Opostamente a isto, a razão de mistura de ice simulada para o dia 27 alcançou o valor de  $0,044 \text{ kg.kg}^{-1}$  logo acima do nível de 12 km de altura, enquanto que aquela simulada para o dia 26 não ultrapassou o valor de  $0,04 \text{ kg.kg}^{-1}$ . Ao comparar os dias 26 e 28 nota-se que a razão obtida entre os acumulados de descargas elétricas observados nos horários mais intensos em cada um destes dias aponta para registros quase três vezes maiores para o dia 26, sendo que as razões de mistura simuladas para estes dias possuem volumes iguais.

A figura 4.17 equivale à 4.16, porém a distribuição vertical e temporal apresentada em sua parte superior corresponde aos valores simulados de razão de mistura de snow. Observa-se que somente são verificados valores significativos de razão de mistura para os 2 últimos dias do período mostrado na figura. Nota-se que esta variável localiza-se em níveis mais baixos da troposfera quando comparada ao ice, situando-se entre 6 e 12 km de altura. No dia 26, apesar do grande acumulado de descargas elétricas observadas pela rede de detecção, a distribuição vertical da razão de mistura de snow apresenta valores não muito elevados quando

comparados aos demais dias, com valores próximos à  $0.4 \text{ kg.kg}^{-1}$ . O dia 27 apresenta um máximo de razão de mistura em torno de  $1,1 \text{ kg.kg}^{-1}$  nas camadas entre 8 e 10 km. Este valor de razão de mistura também é observado no dia 28, nos mesmos níveis verticais, entretanto, o total de horas nos quais esta variável atinge valores superiores a  $0.4 \text{ kg.kg}^{-1}$  nos níveis entre 6 e 12 km neste dia é 6 vezes maior do que o que foi observado para o dia anterior, iniciando-se às 12 UTC e estendendo-se até às 00 UTC.

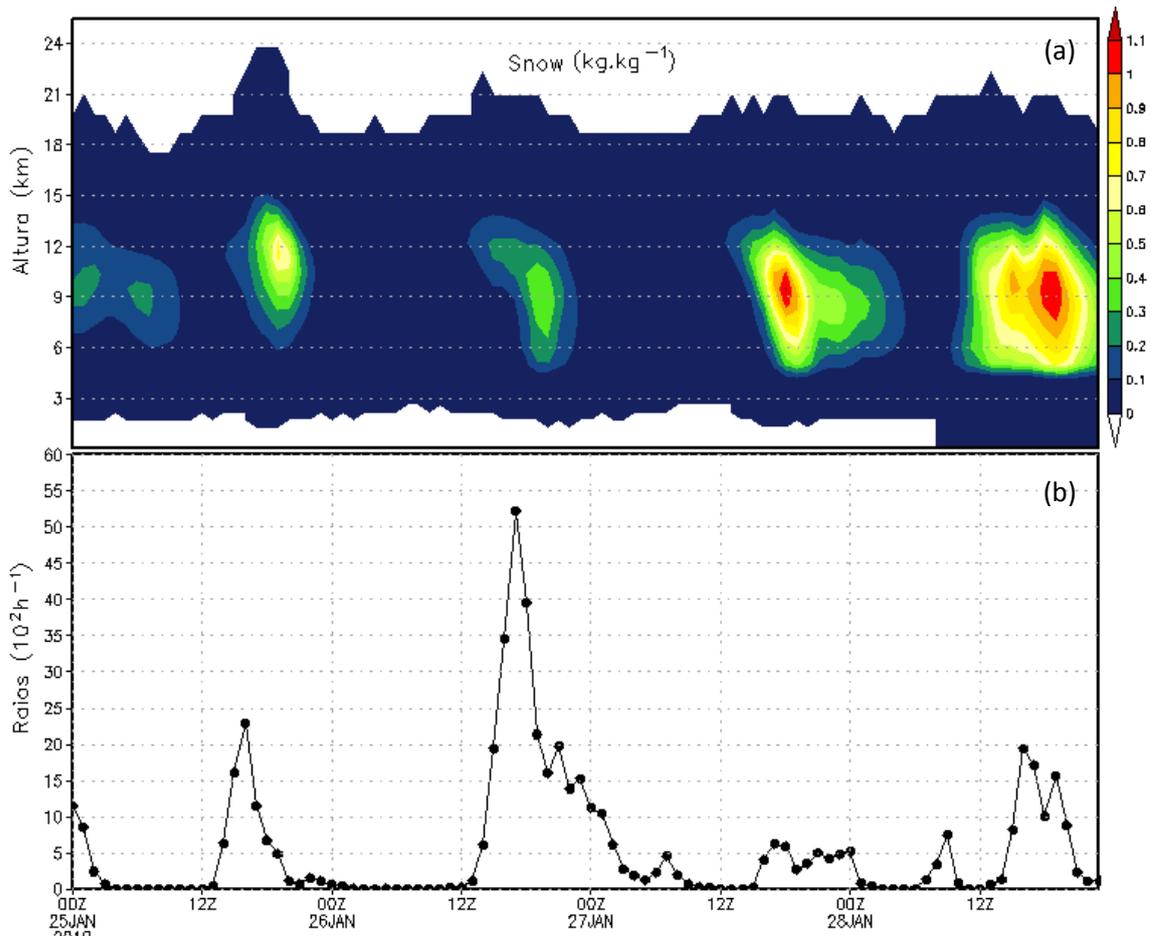


Figura 4.17 – Distribuição vertical dos valores de razão de mistura de snow ( $\text{kg.kg}^{-1}$ ) (a) e evolução temporal dos valores de descargas elétricas (b) acumulados na área apresentada nas imagens da figura 4.4 para o período entre 00 UTC do dia 25 de janeiro de 2010 e 23 UTC do dia 28 de janeiro de 2010.

A evolução temporal da distribuição vertical dos valores de razão de mistura de graupel simulados pelo WRF é apresentada na figura 4.18, para cada uma das 24 horas dentre os dias 25 e 28 de janeiro, juntamente com a série temporal de descargas elétricas. Nota-se que os quatro dias apresentados tiveram volumes consideráveis simulados para esta variável. Entretanto, o dia 26 apresenta os menores valores simulados, com valores de até  $0.028 \text{ kg.kg}^{-1}$  verificados entre aproximadamente 4 e 11 km de altura. No dia 27 os valores de razão de mistura simulados são semelhantes aos obtidos para o dia anterior, porém sua duração

estende-se por um período maior de horas, somando um total de 8 horas nos quais estes valores ocupam as camadas situadas entre 4 e aproximadamente 12 km.

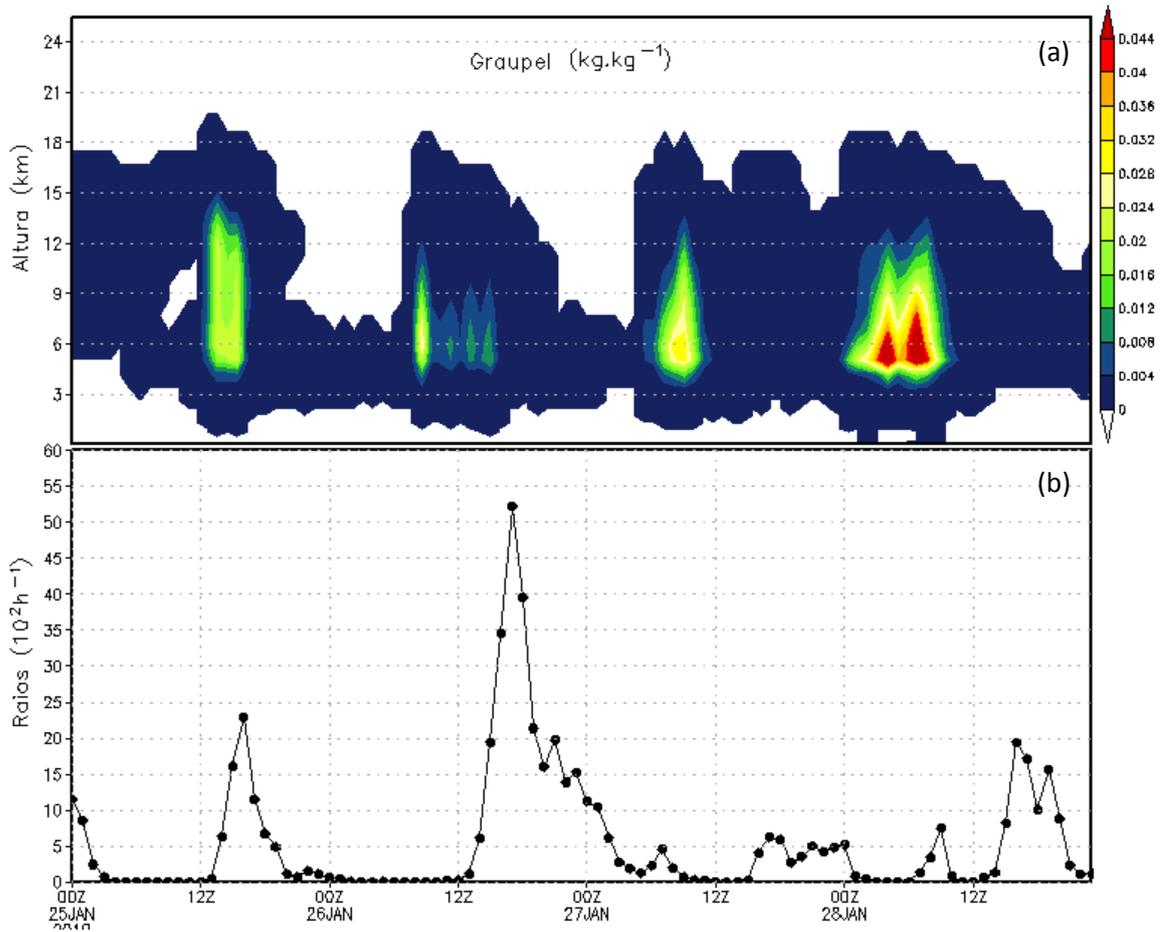


Figura 4.18 – Distribuição vertical dos valores de razão de mistura de graupel ( $\text{kg.kg}^{-1}$ ) (a) e evolução temporal dos valores de descargas elétricas (b) acumulados na área apresentada nas imagens da figura 4.4 para o período entre 00 UTC do dia 26 de janeiro de 2010 e 23 UTC do dia 30 de janeiro de 2010.

No dia 28 os valores simulados para este hidrometeoro alcançam o máximo observado, em torno de  $0,044 \text{ kg.kg}^{-1}$ . Dois picos podem ser observados, ambos se iniciando na altura de 4,5 km, com a diferença que o primeiro estende-se até os 7 km e o segundo ultrapassa os 8 km de altura. Desta forma, tem-se que os valores simulados para esta variável conseguem apontar para a ocorrência de descargas elétricas, mas as quantidades simuladas não apresentam qualquer relação com as quantidades de descargas elétricas observadas em cada um destes dias.

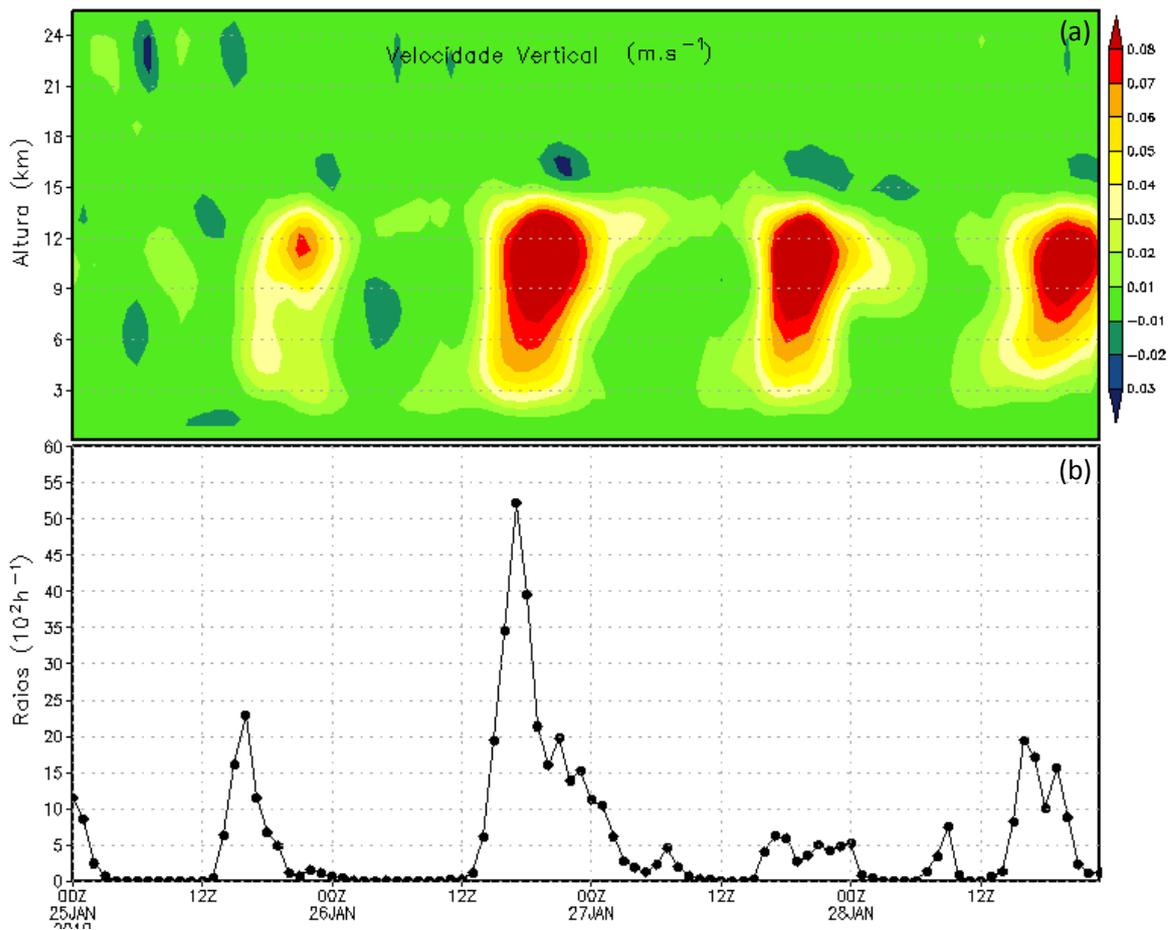


Figura 4.19 - Distribuição vertical dos máximos da componente vertical do vento ( $m.s^{-1}$ ) verificado sobre a área apresentada nas imagens da figura 4.4 (a) e evolução temporal dos valores de descargas elétricas nesta mesma região para o período entre 00 UTC do dia 25 de janeiro de 2010 e 23 UTC do dia 28 de janeiro de 2010.

A figura 4.19 é similar às figuras 4.16, 4.17 e 4.18, porém corresponde à evolução temporal da distribuição vertical da velocidade média da componente vertical da velocidade do vento. Entre os dias 26 e 28 é possível observar movimentos ascendentes da ordem de  $0,05 m.s^{-1}$  nas camadas entre 9 e 12 km de altura durante os períodos entre 12 e 00 UTC, horários nos quais registraram-se os maiores acumulados de descargas elétricas para cada um deste três dias. No dia 25 a intensidade das correntes ascendentes também alcançam  $0,05 m.s^{-1}$ , porém somente nas camadas próximas aos 12 km de altura. O dia 26 é o dia no qual os movimentos ascendentes mais intensos ocupam maior extensão vertical com valores acima de  $0,04 m.s^{-1}$  verificados desde os 5,0 km até 13,5 km de altura. Nos dois dias subseqüentes estes valores ocorrem a partir dos 6 e 7,5 km de altura respectivamente, estendendo-se até alturas próximas ao nível de 13 km. Ou seja, no dia no qual se registrou o maior acumulado de descargas elétricas, o modelo simulou velocidades verticais intensas em uma quantidade de camadas maior do que nos demais dias. Com isso, tem-se que para o período entre 25 e 28 de

janeiro de 2010, a velocidade vertical foi a variável simulada que melhor se correlacionou com a atividade elétrica observada em termos quantitativos.

A figura 4.20 mostra a evolução temporal das séries de descargas elétricas observadas e dos valores simulados de razão de mistura de *graupel*, *ice* e *snow*, da componente vertical da velocidade do vento, dos volumes de precipitação convectiva (*rainc*) e não convectiva (*rainnc*) e dos valores calculados de LPI para o período entre 25 e 28 de janeiro. As razões de mistura dos hidrometeoros citados tiveram, primeiramente, seus valores acumulados em cada coluna do modelo. Posteriormente, com exceção da velocidade vertical, todas as demais variáveis foram somadas, a cada hora, em cada ponto de grade dentro da área de estudo. No caso da componente vertical da velocidade do vento, o tratamento foi distinto. Primeiramente calculou-se a velocidade vertical média simulada entre os níveis de 0 e 10 km de altura para cada ponto de grade. Posteriormente obteve-se o valor máximo para a área analisada em cada hora de simulação, ou seja, os valores referentes à velocidade vertical mostrados na figura 4.20 correspondem à maior média da componente ascendente da velocidade vertical do vento para cada hora simulada. Além disso, as séries apresentadas já se encontram defasadas com relação à série de descargas elétricas de acordo com os valores informados na tabela 4.6.

Observa-se a ocorrência de descargas elétricas nos quatro dias apresentados na figura 4.20, nos períodos da tarde e início da noite, entre 12 UTC e 00 UTC. A ocorrência de atividade elétrica nestes períodos é acompanhada de uma elevação nos valores de todas as demais variáveis. Apesar da defasagem que otimiza a relação entre as variáveis simuladas e as descargas elétricas já ter sido aplicada a cada uma das evoluções temporais, ainda nota-se a existência de atrasos de algumas variáveis com relação às descargas elétricas. Tal fato fica mais explícito no dia 25, no qual o pico de descargas elétricas ocorre às 16 UTC, ao passo que os picos de LPI e velocidade vertical só foram verificados às 21 UTC, ou seja, há um atraso de 5 horas da simulação numérica com relação à atividade elétrica observada. Entretanto, nos demais dias mostrados na figura 4.20 não se verificam grandes defasagens para nenhuma das variáveis apresentadas como esta apontada para o dia 25. As defasagens mostradas na tabela 4.6, aplicadas na apresentação dos gráficos acima, foram obtidas considerando-se o conjunto das 739 horas de simulação do mês de janeiro de 2010, de forma que é normal que estes valores não sejam os ideais para alguns casos específicos, embora tenham sido escolhidos exatamente por inserir os melhores resultados em termos de correlação ao conjunto das 739 horas avaliadas.

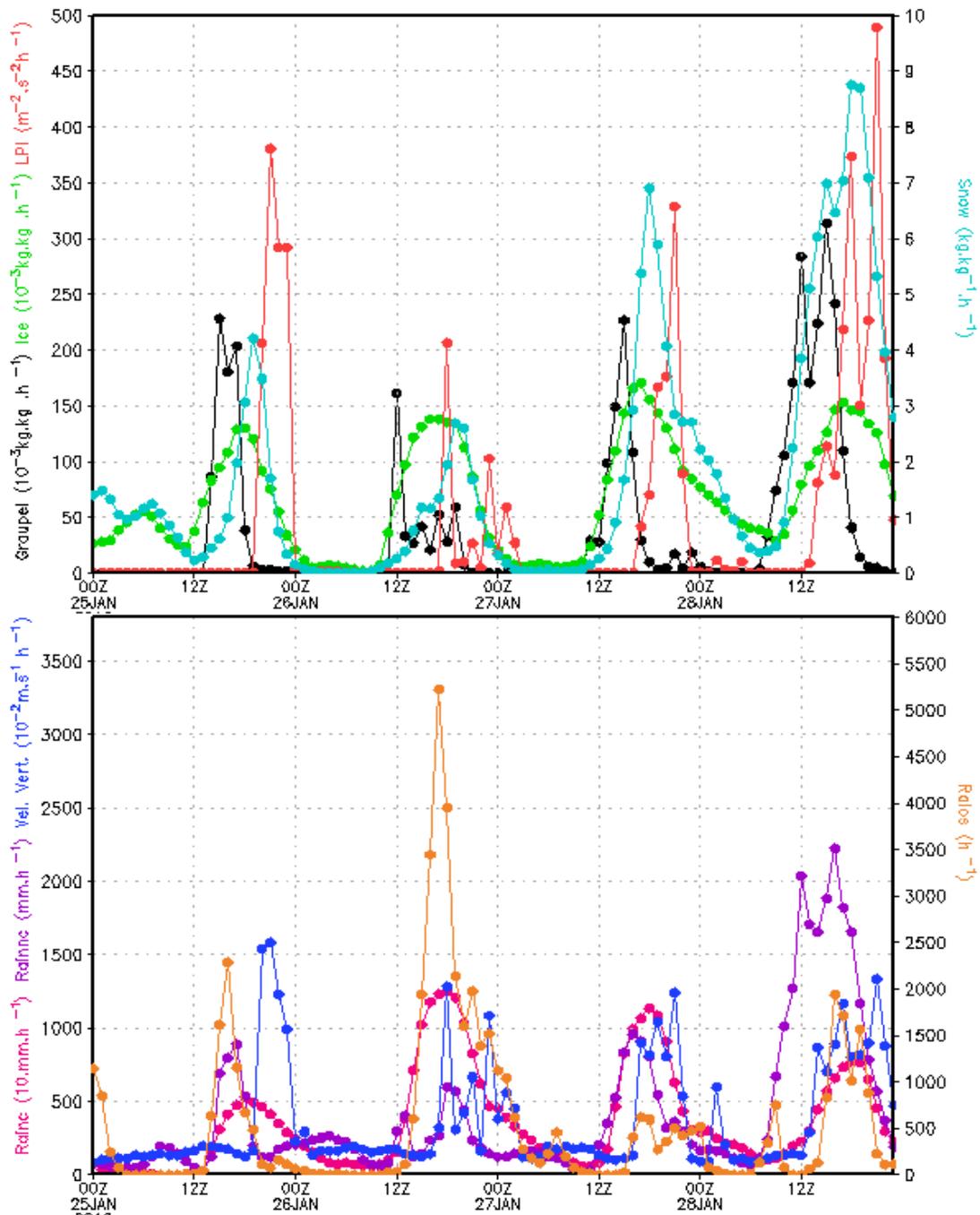


Figura 4.20 – Evolução temporal dos valores simulados para as variáveis do modelo WRF, acumulados na área da figura 4.4, para o período entre 00 UTC do dia 25 de janeiro de 2010 e 23 UTC do dia 28 de janeiro de 2010. Os valores referentes à razão de mistura de graupel ( $\text{kg.kg}^{-1}$ ), à razão de mistura de ice ( $\text{kg.kg}^{-1}$ ) e à razão de mistura de snow ( $\text{kg.kg}^{-1}$ ) foram acumulados na coluna vertical do modelo. As séries relativas aos valores de ice (curva em verde), snow (curva em azul claro), graupel (curva em preto), LPI ( $\text{m}^2.\text{s}^2$ ) (curva em vermelho), precipitação convectiva – rainc (mm) (curva em rosa), precipitação não convectiva – rainnc (mm) (curva em roxo) e descargas elétricas observadas – raios (curva em laranja) correspondem aos acumulados em cada ponto de grade da figura 4.4, a cada hora. O valor horário relativo à componente vertical da velocidade do vento ( $\text{m.s}^{-1}$ ) (curva em azul) representa a maior, na região apresentada pela figura 4.4, das médias obtidas entre os níveis de 0 e 10 km de altura em cada ponto de grade do modelo.

Uma característica que se destaca na análise destes gráficos é a fraca correlação encontrada entre as variáveis simuladas e as descargas elétricas em termos de intensidade. Dos três dias apresentados o dia 26 é claramente o que registrou maior incidência de descargas elétricas, alcançando a marca de 5.222 descargas acumuladas em apenas uma hora. O dia 25 apresentou atividade de intensidade mediana, com aproximadamente 2.400 descargas registradas no horário de maior atividade dos sistemas. Já o dia 27 não ultrapassou o limite das 750 descargas acumuladas no horário em que esta série atinge seu auge. No dia 28 o máximo horário desta variável é de 2.000 descargas elétricas observadas. Apesar da grande diferença observada nos totais de descargas registradas para os quatro dias, tais diferenças não foram bem representadas pela simulação numérica, uma vez que as quantidades simuladas para as variáveis analisadas não apresentam grandes diferenças ao longo destes quatro dias. Os máximos atingidos para a razão de mistura de ice e para a componente vertical da velocidade do vento são praticamente os mesmos ao longo deste período. Os valores simulados para snow, graupel, LPI e chuva não convectiva são ainda mais discordantes, pois apresentam os menores máximos exatamente para o dia 26, o dia eletricamente mais intenso dos quatro analisados. A chuva convectiva foi a única variável capaz de apontar para a intensa atividade elétrica verificada para o dia 26, pois apresentou o maior máximo dentre os três dias, em torno de 12.500 mm. Porém, de acordo com os valores simulados para esta variável nos demais dias, o dia 27 foi o segundo mais intenso do período em termos de precipitação convectiva, com um máximo ligeiramente abaixo do dia anterior, em torno de 11.000 mm. Entretanto, em termos de atividade elétrica, este foi o dia menos intenso do período analisado, tendo registrado acumulados de descargas elétricas consideravelmente menores que os dias 25 e 28, nos quais as quantidades de precipitação convectiva simuladas não foram tão representativas. Ou seja, mesmo para os valores de precipitação convectiva, a classificação do nível de intensidade dos sistema obtida através desta variável não condiz com aquela observada em termos de atividade elétrica.

A figura 4.21 é equivalente à 4.20, porém para o período entre 9 e 12 de janeiro. Neste período registrou-se o maior acumulado horário de descargas elétricas verificado para todo o mês de janeiro de 2010, com um total de 5.637 descargas ocorridas ao longo dos 60 minutos que compuseram às 20 UTC do dia 9 de janeiro. A atividade elétrica observada neste dia ocorreu por um curto espaço de tempo e de forma bastante intensa, ocorrendo entre às 16 e 23 UTC, período no qual o acumulado horário se eleva rapidamente de 176 descargas para o valor de 5.637 descargas verificadas às 20 UTC e volta a registrar valores próximos às 200 descargas nas últimas horas deste dia.

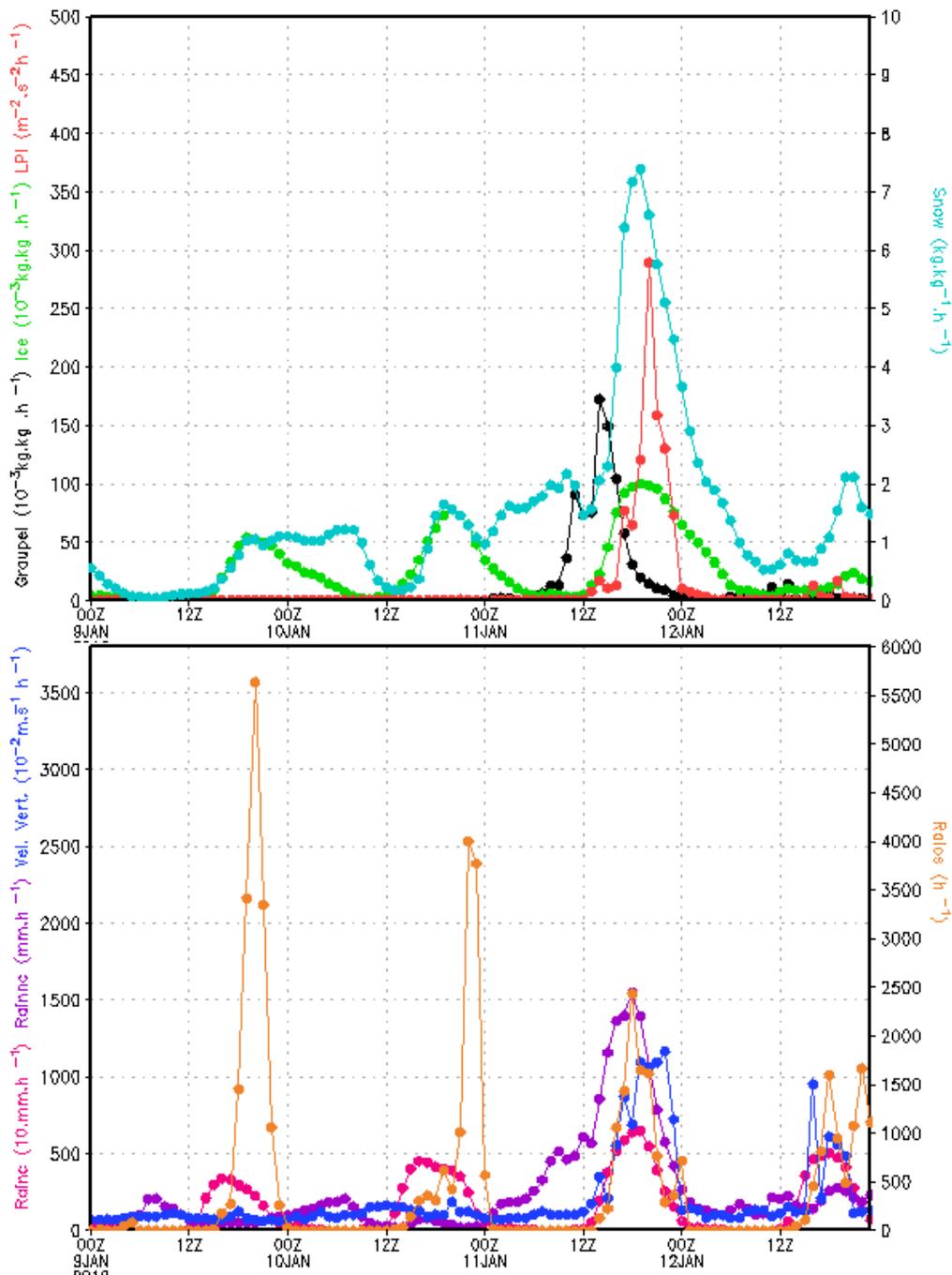


Figura 4.21 – Evolução temporal dos valores simulados para as variáveis do modelo WRF, acumulados na área da figura 4.4, para o período entre 00 UTC do dia 9 de janeiro de 2010 e 23 UTC do dia 12 de janeiro de 2010. Os valores referentes à razão de mistura de graupel ( $\text{kg.kg}^{-1}$ ), à razão de mistura de ice ( $\text{kg.kg}^{-1}$ ) e à razão de mistura de snow ( $\text{kg.kg}^{-1}$ ) foram acumulados na coluna vertical do modelo. As séries relativas aos valores de ice (curva em verde), snow (curva em azul claro), graupel (curva em preto), LPI ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ) (curva em vermelho),

precipitação convectiva – rainc (mm) (curva em rosa), precipitação não convectiva – rainnc (mm) (curva em roxo) e descargas elétricas observadas – raios (curva em laranja) correspondem aos acumulados em cada ponto de grade da figura 4.4, a cada hora. O valor horário relativo à componente vertical da velocidade do vento ( $m.s^{-1}$ ) (curva em azul) representa a maior, na região apresentada pela figura 4.4, das médias obtidas entre os níveis de 0 e 10 km de altura em cada ponto de grade do modelo.

Nos dias 10, 11 e 12 os máximos horários alcançam as marcas de 2.500, 1.500 e 1.000 descargas acumuladas, respectivamente. Todos os quatro dias apresentam um padrão de evolução da atividade elétrica bem definido, ocorrendo entre o final da tarde e início da noite. Observando-se os gráficos apresentados na figura 4.21 nota-se que o dia 11 destaca-se como aquele no qual os valores simulados para cada uma das variáveis são mais condizentes com a intensidade da atividade elétrica verificada. No dia 12 as curvas relativas à precipitação convectiva, precipitação não convectiva, velocidade vertical e snow também respondem de maneira satisfatória à atividade elétrica observada. Por outro lado, as curvas que representam as razões de mistura dos demais hidrometeoros e de LPI não conseguiram reproduzir as características da atividade elétrica para este dia.

Com relação aos dias 9 e 10, os quais obtiveram os maiores acumulados elétricos, a simulação do modelo não foi capaz de gerar volumes significativos para as variáveis avaliadas. Observa-se que apenas a precipitação convectiva e as razões de mistura de ice e snow apresentaram valores não nulos nestes dias. Apesar disto, os volumes obtidos são pequenos quando comparados àqueles obtidos no dia 11, no qual a quantidade de raios registrada equivale a menos da metade daquelas observadas no dia 9. Ou seja, novamente tem-se que os resultados do modelo foram capazes de reproduzir os padrões elétricos da atmosfera em termos qualitativos, mas não em termos quantitativos.

As tabelas 4.7 e 4.8 apresentam, para os 30 dias do mês de janeiro, um resumo dos resultados obtidos a partir das análises de gráficos similares aos exibidos nas figuras 4.16 a 4.19, e 4.20 e 4.21 no caso das componentes convectiva e não convectiva da precipitação. Estes resultados foram divididos em dois períodos de análise, o primeiro deles constitui-se do intervalo horário entre 12 UTC e 00 UTC do dia seguinte, período no qual, nesta época do ano, a grande maioria dos sistemas meteorológicos causadores de descargas elétricas se desenvolvem. O segundo período é composto pelos horários da madrugada e manhã, iniciando-se às 00 UTC e encerrando-se às 12 UTC do mesmo dia. Desta forma, a tabela 4.7 apresenta os resultados para o primeiro período, da mesma forma que a tabela 4.8 expõe os resultados obtidos para o segundo período. Nestas tabelas, cada célula simboliza a existência ou não de valores para cada uma das variáveis que ultrapassem os limites de 250 ocorrências de descargas elétricas,  $0,008 kg.kg^{-1}$ ,  $0,2 kg.kg^{-1}$ ,  $0,008 kg.kg^{-1}$  para as razões de mistura de ice,

*snow* e *graupel*, respectivamente,  $0,02 \text{ m.s}^{-1}$  para velocidade vertical, 2.000 mm para a precipitação convectiva e 250 mm para precipitação não convectiva. Ou seja, caso a quantidade de determinada variável atinja o limiar estabelecido para a mesma ao menos uma vez durante as 12 horas que constituem cada período, então esta variável será classificada como “SIM” para o período e dia no qual a referida variável está sendo avaliada. Caso contrário a mesma será classificada como “NÃO”.

Nota-se que, no primeiro período, que abrange os horários da tarde e início da noite, em apenas 4 dias não foi registrada a presença de sistemas atmosféricos eletricamente carregados, o que representa apenas 13% do total de dias avaliados. Dentre os 26 dias restantes, em apenas um o critério estabelecido para a componente vertical da velocidade do vento não foi atingido, representando 4% dos dias nos quais este período registrou ocorrência de descargas elétricas. O critério estabelecido para ice não foi alcançado em 35% dos períodos para os quais o critério estabelecido para descarga elétrica foi atendido. No caso das variáveis *snow* e *graupel*, 7 é o total de dias para os quais os critérios não foram atingidos, representando 27% do total de 26 dias classificados como “SIM” na segunda coluna da tabela 4.7.

De todos os dias nos quais houve registro de um número considerável de descargas elétricas para o período principal em apenas um não há registro de valores consideráveis para cinco das seis variáveis avaliadas. Neste dia, 2 de janeiro, houve acumulado significativo de descargas elétricas e a única variável simulada que sinalizou a ocorrência de sistemas convectivos intensos foi a precipitação convectiva, que também atingiu volumes significativos. Nos demais dias sinalizados como “SIM” na tabela 4.7, apenas o dia 20 apresentou volumes insignificantes para os três hidrometeoros avaliados e, conseqüentemente, para a precipitação não convectiva. Por outro lado os critérios estabelecidos para cada uma das variáveis foram alcançados simultaneamente em aproximadamente 46% dos casos, ou seja, em menos da metade dos 26 dias os valores obtidos para as variáveis simuladas foram todos compatíveis com a atividade elétrica observada.

Dos 4 dias para os quais não houve registro de descargas elétricas no período principal, 2 dias apresentaram resultados negativos para todas as quatro variáveis simuladas. Em um destes 4 dias os critérios estabelecidos para ice e velocidade vertical foram alcançados, de forma que tais variáveis sinalizam positivamente para ocorrência de descargas elétricas. No último dia deste conjunto, o dia primeiro de janeiro, todas as quatro variáveis simuladas foram classificadas como “SIM”, indicando condições favoráveis para ocorrência de descargas elétricas, contrariamente ao observado pela rede de detecção.

Tabela 4.7 – Resumo dos resultados obtidos a partir dos critérios estabelecidos para análise dos acumulados de descargas elétricas detectadas pela RINDAT e das distribuições verticais horárias dos valores de razão de mistura de ice, razão de mistura de snow, razão de mistura de graupel e componente vertical da velocidade do vento e para os acumulados horários de precipitação convectiva e não convectiva resultantes da simulação do WRF para o período entre 12 e 00 UTC do mês de janeiro de 2010.

<b>Dia</b>	<b>Raios</b>	<b>Ice</b>	<b>Snow</b>	<b>Graupel</b>	<b>Velocidade Vertical</b>	<b>Rainc</b>	<b>Rainnc</b>
1	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
2	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>	NÃO
3	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
4	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
5	<b>SIM</b>	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
6	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
7	<b>SIM</b>	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
8	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
9	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	NÃO
10	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	NÃO
11	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
12	<b>SIM</b>	NÃO	<b>SIM</b>	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	NÃO
13	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
14	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
15	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
16	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
17	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
18	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
19	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
20	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	NÃO
21	<b>SIM</b>	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
22	<b>SIM</b>	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
23	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
24	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	NÃO
25	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
26	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
27	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
28	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
29	NÃO	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO
30	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO

Tabela 4.8 – Resumo dos resultados obtidos a partir dos critérios estabelecidos para análise dos acumulados de descargas elétricas detectadas pela RINDAT e das distribuições verticais horárias dos valores de razão de mistura de ice, razão de mistura de snow, razão de mistura de graupel e componente vertical da velocidade do vento e para os acumulados horários de precipitação convectiva e não convectiva resultantes da simulação do WRF para o período entre 00 e 12 UTC do mês de janeiro de 2010.

Dia	Raios	Ice	Snow	Graupel	Velocidade Vertical	Rainc	Rainnc
1	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>
2	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
3	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
4	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>
5	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
6	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
7	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
8	<b>SIM</b>	NÃO	<b>SIM</b>	NÃO	<b>SIM</b>	NÃO	<b>SIM</b>
9	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>
10	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>
11	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>
12	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	NÃO	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO
13	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>
14	<b>SIM</b>	NÃO	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
15	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
16	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
17	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	NÃO	<b>SIM</b>	NÃO	<b>SIM</b>
18	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
19	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
20	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
21	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>
22	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
23	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO
24	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
25	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
26	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>
27	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	NÃO
28	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO
29	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO
30	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO

Um ponto de grande relevância a ser destacado é o alto percentual de concordância entre as colunas relativas às descargas elétricas e à precipitação convectiva. Este percentual é de 96,7%, o que significa que em apenas um dos 30 dias avaliados os *status* de classificação de ambas as variáveis não foram idênticos. A segunda variável de maior concordância com as descargas elétricas é a componente vertical da velocidade do vento, que apresenta um percentual de concordância de 90%. Ou seja, dos resultados obtidos da simulação numérica, dentre os horários entre 12 e 00 UTC, as variáveis que melhor sinalizam a ocorrência de descargas elétricas são a precipitação convectiva e a velocidade vertical do vento, ambas variáveis que não são produzidas pela parametrização de microfísica.

Para o período secundário de ocorrência de raios, apenas 30% dos dias registraram a ocorrência de descargas elétricas, conforme demonstra a tabela 4.8. Destes casos, 55% apresentaram valores simulados significativos de velocidade vertical, mesmo percentual observado para as razões de mistura de ice e snow. Destes 9 dias que nos quais os acumulados elétricos observados entre as 00 e 12 UTC foram significativos, 2 também obtiveram volumes consideráveis de precipitação convectiva simulada, e no caso da precipitação convectiva esse total é de 4 dias. Um ponto que merece destaque nesta tabela é o número de dias classificados como “SIM” simultaneamente nas colunas relativas a raio e graupel, condição esta estabelecida apenas uma única vez, no dia 28 de janeiro, dia no qual as demais variáveis também atingiram os critérios estabelecidos previamente.

Dos 21 dias nos quais não se verificou a ocorrência de acumulados consideráveis de descargas elétricas, em apenas 4 dias a componente vertical da velocidade do vento foi classificada como “SIM”, representando 19% destes casos. Para estas condições de descargas elétricas, o maior percentual obtido foi de 47% para a distribuição vertical da razão de mistura de snow, ao passo que o menor foi encontrado para as razões de mistura de ice e graupel e para a precipitação convectiva, percentual este equivalente a 9,5%.

Portanto, tem-se que, de acordo com as tabelas acima, a ocorrência de raios está fortemente relacionada à presença de componentes verticais de velocidade do vento ascendente e de magnitudes elevadas e, principalmente à ocorrência de volumes significativos de precipitação convectiva.

### 4.3.3 – Comparação entre as distribuições espaciais de descargas elétricas, LPI e componentes convectiva e não convectiva da precipitação

A figura 4.22 apresenta os valores calculados de LPI (a), descargas elétricas observadas (b) e os valores simulados de precipitação convectiva (c) e não convectiva (d) acumulados durante as 24 horas do dia 26 de janeiro de 2010. Através da análise da figura 4.22 (b) nota-se que o dia 26 registrou atividade elétrica bastante intensa, tanto em termos de quantidade de descargas observadas como do ponto de vista espacial, pois nota-se que a incidência de raios foi observada sobre uma grande extensão espacial.

As principais regiões atingidas por descargas localizam-se na porção sudeste da RMSP, com um segundo foco situado próximo ao litoral sul paulista e um terceiro mais ao norte, nas proximidades da fronteira com MG. Entretanto, estes padrões de distribuição de potencial para ocorrência de descargas elétricas não é observado nos resultados obtidos para o LPI (figura 4.22 (a)). Este índice consegue detectar apenas quatro pequenas regiões com elevado potencial para atividade elétrica, três delas localizadas nos arredores da RMSP, mais especificamente ao norte e à leste da mesma. Apenas o quarto foco foi situado sobre a RMSP, na sua porção norte. Devido à natureza abrangente da atividade elétrica que ocorreu neste dia, é possível afirmar que realmente verificou-se atividade elétrica nos locais nos quais o LPI apontou para a existência de elevado potencial elétrico. Entretanto, é notório o fato de que o índice subestimou consideravelmente a área na qual tal potencial efetivamente foi observado.

Ao observar os resultados de precipitação obtidos da simulação numérica, verifica-se a existência de dois padrões bastante distintos para os volumes e distribuição das precipitações convectiva e não convectiva. A parte convectiva da precipitação, proveniente da parametrização de *cumulus*, assim como as descargas elétricas observadas pela RINDAT, também apresentou um padrão de distribuição com elevada abrangência territorial, e com volumes acumulados durante as 24 horas consideravelmente elevados, principalmente ao norte da RMSP. Baseando-se unicamente em uma análise visual é possível afirmar que a área espacial sobre a qual o modelo simulou chuva convectiva é bastante similar à área na qual houve incidência de descargas elétricas, apesar de a primeira estar deslocada aproximadamente 1° para norte.

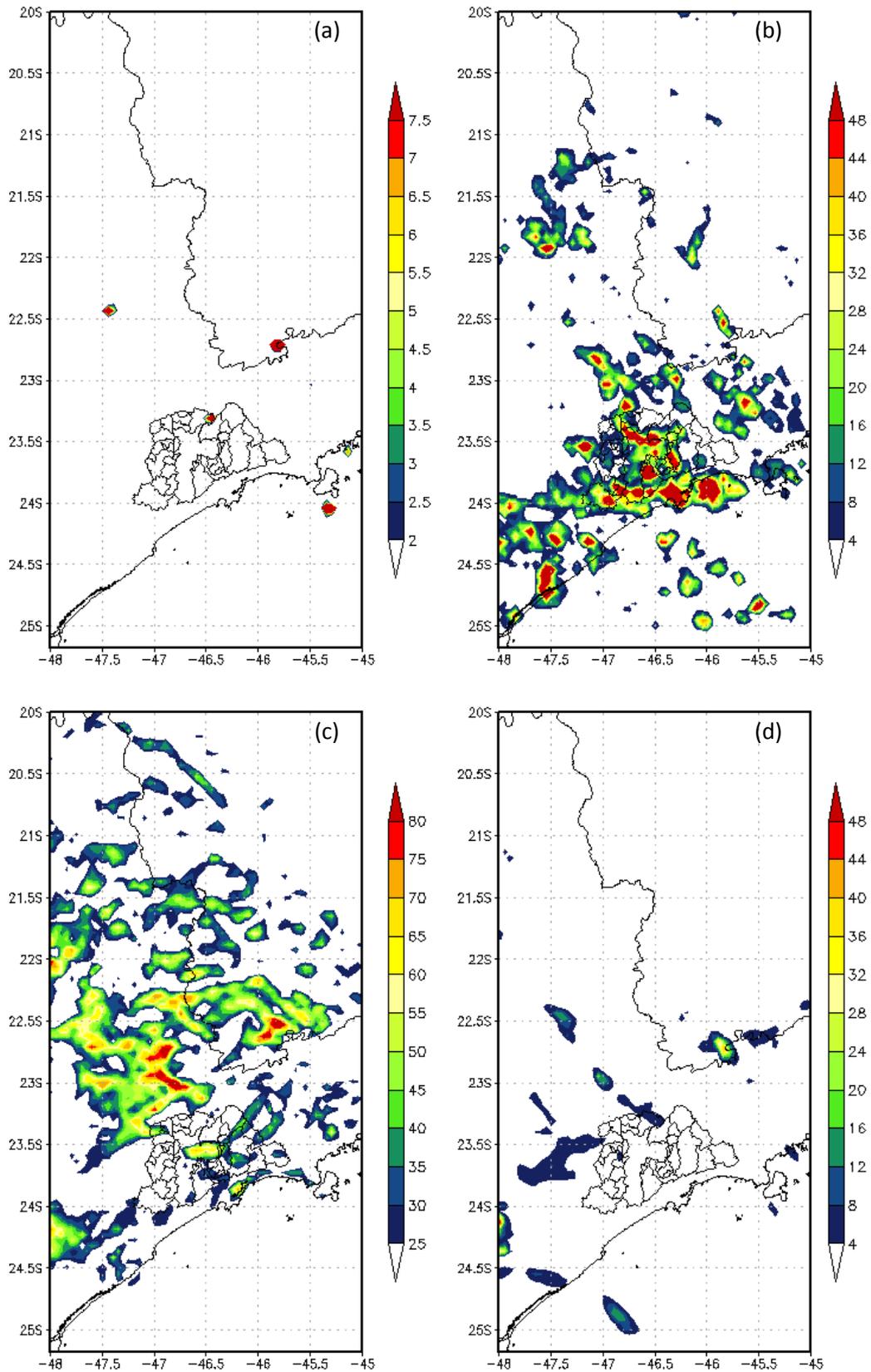


Figura 4.22 - Totais acumulados durante as 24 horas do dia 26 de janeiro de 2010 para os valores de LPI ( $m^2 \cdot s^{-2}$ ) (a), descargas elétricas detectadas pela RINDAT (b), precipitação convectiva (mm) (c) e precipitação não convectiva (mm) (d).

Porém, resultados bastante diferentes foram obtidos para a parte não convectiva da precipitação, conforme mostra a figura 4.22 (d). Os volumes observados para esta parte da precipitação, proveniente da parametrização de microfísica, foram bem menores do que aqueles observados para a precipitação convectiva. Mais do que isso, a extensão territorial sobre a qual o modelo simulou precipitação não convectiva também é consideravelmente inferior à região sobre a qual a precipitação convectiva foi simulada. Sobre praticamente toda a RMSP não se observam acumulados significativos de precipitação não convectiva, o que é bastante divergente do que foi observado para a atividade elétrica registrada nesta data. Desta forma, tem-se que, para este dia, nem o LPI nem a precipitação não convectiva reproduziram de maneira satisfatória a atividade elétrica verificada em termos de localização espacial, ou em termos de intensidade.

Por outro lado, a parte convectiva da precipitação conseguiu representar tanto o caráter disperso de incidência das descargas elétricas quanto o elevado número de ocorrências observadas no dia 26. Assim, nota-se que a parametrização de convecção obteve bom desempenho na tarefa de simular as características espaciais da atividade elétrica registrada para este dia, ao passo que os resultados obtidos a partir da parametrização de microfísica subestimaram de maneira relevante sua intensidade e abrangência espacial.

As imagens mostradas na figura 4.23 são similares às mostradas na figura 4.22, porém para as 24 horas do dia 09 de janeiro de 2010. A distribuição espacial do total de raios observados para este dia (figura 4.23 (b)) mostra que, conforme citado anteriormente, o acumulado de descargas verificado para este período foi bastante elevado, assim como a extensão territorial sobre a qual as descargas foram registradas, embora não tão abrangente quanto o caso do dia 26.

A atividade elétrica ocorreu, de forma intensa e bastante concentrada, basicamente a sudeste da RMSP, sobre o litoral central do estado de São Paulo e na região costeira adjacente. Porém, ao analisar os resultados obtidos a partir da simulação numérica para todos os três parâmetros apresentados nota-se claramente que a simulação realizada não conseguiu reproduzir os padrões atmosféricos verificados para este dia. Observa-se não haver volumes significativos simulados para a precipitação não convectiva, assim como para os valores calculados de LPI.

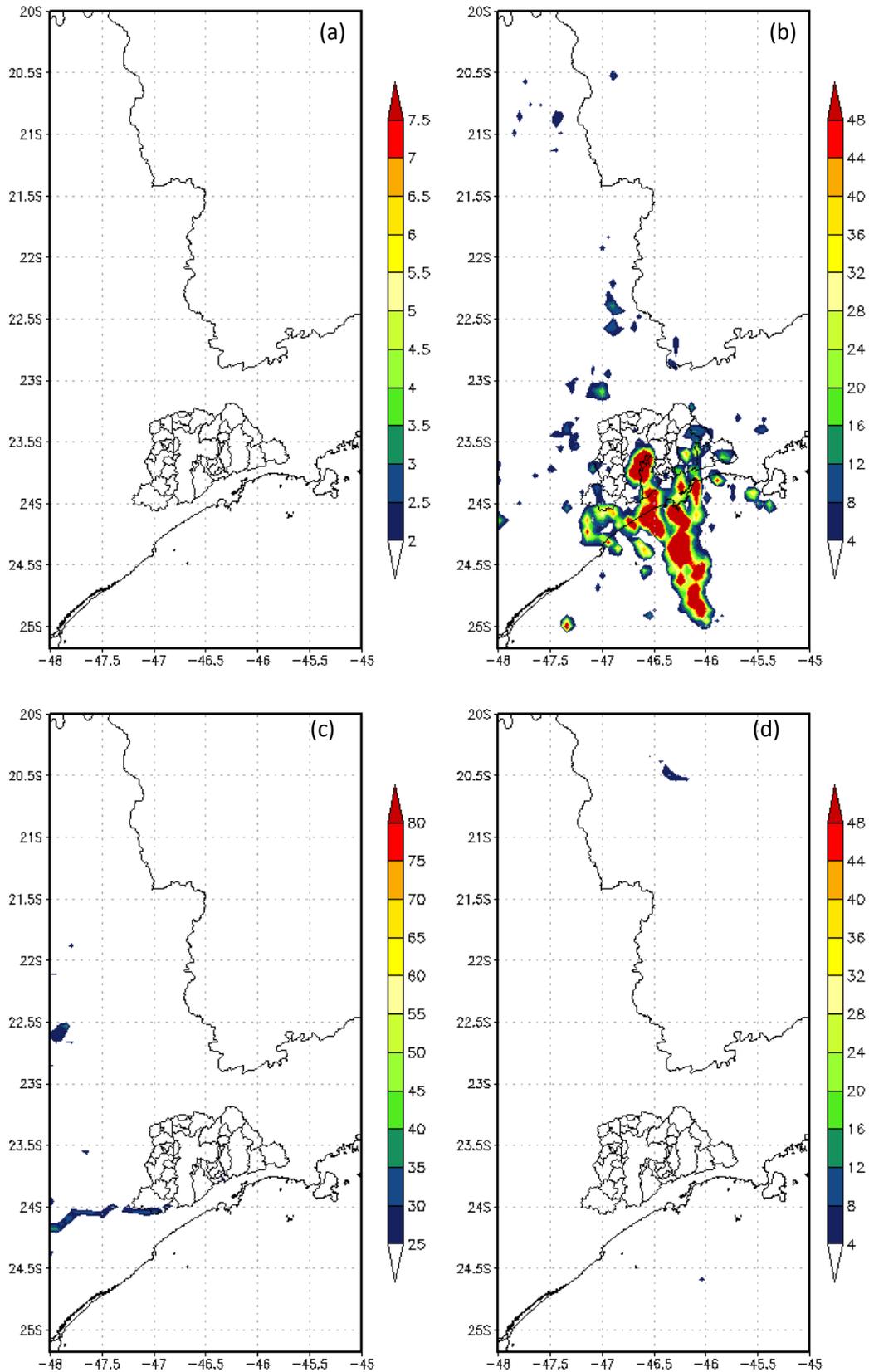


Figura 4.23 - Totais acumulados durante as 24 horas do dia 09 de janeiro de 2010 para os valores de LPI ( $m^2.s^{-2}$ ) (a), descargas elétricas detectadas pela RINDAT (b), precipitação convectiva (mm) (c) e precipitação não convectiva (mm) (d).

Mesmo os volumes simulados de precipitação convectiva são não representativos, além de estarem localizados em regiões diferentes daquelas sobre as quais os grandes acumulados de descargas elétricas foram observados. Sendo assim, faz-se necessário afirmar que a simulação numérica realizada, de maneira alguma conseguiu reproduzir os padrões da atividade elétrica efetivamente observados para o dia 9 de janeiro, uma vez que nenhuma destas três variáveis simuladas apresentou qualquer sinal da intensa atividade elétrica verificada para este período.

Desta forma, para um breve fechamento das descrições feitas para os resultados recém apresentados, conclui-se que o desempenho da simulação numérica avaliada é irregular ao longo do mês de janeiro de 2010. Os resultados oriundos da parametrização de *cumulus* representaram melhor os padrões de atividade elétrica verificados quando comparados aos resultados obtidos a partir da parametrização de microfísica. Porém, mesmo a precipitação convectiva, em alguns momentos, não conseguiu reproduzir a atividade elétrica observada, tanto com relação à localização espacial da mesma, quanto em termos de intensidade e abrangência territorial.

Portanto, apesar do resultado não satisfatório verificado para alguns momentos da simulação numérica do mês de janeiro de 2010, observando a evolução temporal das variáveis simuladas juntamente com a série de descargas elétricas observadas, nota-se que, em termos qualitativos, de uma maneira geral, as variáveis estudadas reproduzem satisfatoriamente a existência de atividade elétrica para a maior parte deste período.

#### **4.3.4 – Análises Quantitativas**

Com o objetivo de analisar de forma mais detalhada a relação entre a intensidade da atividade elétrica e os volumes simulados para cada uma das variáveis, optou-se por separar os horários nos quais houve registro de descarga elétrica incidente sobre a região avaliada em quatro categorias, de acordo com o acumulado horário observado. Entretanto, conforme observado quando das análises das figuras 4.16 à 4.19, há uma nítida diferença em os volumes de descargas elétricas observados nos horários da tarde e início da noite daqueles observados durante os períodos da madrugada e da manhã. Esta característica é condizente com o padrão de distribuição diárias das descargas elétricas para a região de estudo durante os meses de verão, conforme foi discutido nas análises da figura 4.3. Este mesmo padrão pode ser observado também na figura 4.5 (a), que apresenta a evolução diária das descargas elétricas detectadas pela RINDAT na área estudada para cada um dos 31 dias do mês de janeiro de 2010. Portanto, uma vez que o volume de descargas elétricas registradas durante os períodos da madrugada e da manhã é consideravelmente pequeno quando comparado aos volumes

detectados nos demais horários, optou-se por separar os horários situados entre 14 e 02 UTC daqueles nos quais a ocorrência de descargas elétricas não é uma regra, e sim uma exceção.

Desta forma, os resultados apresentados daqui em diante referem-se ao conjunto de horários limitado aos períodos situados entre 14 e 23 UTC e entre 00 e 02 UTC de todos os 31 dias. Posteriormente, este grupo de horários restantes foi novamente separado em dois subgrupos, sendo o primeiro deles constituído daqueles horários nos quais não houve registro de descargas elétricas e o segundo constituiu-se daquelas horas nas quais se verificou ocorrência de descargas elétricas na região em análise. A separação entre estes dois grupos foi realizada considerando-se como base um limiar de erro de no máximo duas descargas elétricas registradas em toda a extensão territorial avaliada para um determinado intervalo horário. Ou seja, caso o acumulado espacial de descargas elétricas observadas pela RINDAT em um dado horário fosse maior do que dois naquele intervalo horário pertenceria ao grupo no qual houve registro de descargas elétricas e, caso fosse menor ou igual a dois, pertenceria ao grupo das horas nas quais não houve registro de descargas. Este grupo horário, no qual os acumulados de descargas elétricas não ultrapassam o valor de 2 ocorrência a cada hora, foi denominado como conjunto SR (Sem Raios) e será citado como sendo o conjunto dos horários de atividade elétrica nula em algumas regiões deste texto, apesar de não ser composto somente por horários com acumulados de descargas iguais a zero. O limiar utilizado para realizar tal separação foi obtido considerando-se o conjunto total de descargas elétricas observados para os meses de janeiro de 2010, 2011 e 2012, acumulados em bases horárias. A partir destes dados obteve-se a média horária de descargas elétricas ( $293 \text{ h}^{-1}$ ) e, arbitrariamente escolheu-se que o limiar utilizado seria de 1% da média horária.

Em seguida, o grupo dos horários nos quais houve registro de descargas elétricas foi classificado em três outros conjuntos, de acordo com o total de raios acumulados em cada hora. Para a realização da referida classificação, utilizou-se novamente do conjunto dos três janeiros entre 2010 e 2012, para os períodos situados entre os horários de 14 e 23 UTC e 00 e 02 UTC de cada dia. Estes horários foram ordenados em ordem crescente de acumulado de descargas elétricas, de forma que o primeiro, e conseqüentemente menor valor da série, representasse o menor percentual de descargas elétricas possível para aquele grupo e o maior representasse o maior percentual possível. Sendo assim, tomando-se os limiares de 33% e 66% de intensidade de acordo com o acumulado de ocorrências, obtiveram-se os limiares de classificação utilizados para categorizar as ocorrências de descargas elétricas do mês de janeiro de 2010. Estes limiares são apresentados na tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Percentis representativos dos acumulados horários descargas elétricas detectadas pela RINDAT durante as 24 horas de cada um dos 31 dias dos meses de janeiro de 2010, 2011 e 2012. Os percentis foram obtidos considerando somente os horários para os quais foram observadas ao menos três descargas elétricas.

Percentil	Quantida de Descargas Elétricas
5%	5
10%	7
25%	23
<b>33%</b>	<b>38</b>
50%	108
<b>67%</b>	<b>272</b>
75%	377
90%	847
95%	1.304

Desta forma, a categoria 1, a menos intensa em termos de quantidade de descargas elétricas registradas, é composta por aqueles horários nos quais os acumulados alcançaram valores de no máximo 38 descargas elétricas e foi denominada como CAT1. A categoria 2, denominada CAT2 e caracterizada por acumulados medianos de descargas elétricas, é constituída pelos horários nos quais os valores desta variável ficaram entre 39 e 272 ocorrências verificadas. À categoria mais intensa pertencem os horários nos quais o acumulado ultrapassou o valor de 273 descargas elétricas observadas pela rede de detecção, sendo denominada de CAT3. A tabela 4.10 apresenta a distribuição obtida para os horários avaliados entre as quatro classes citadas, de acordo com a atividade elétrica verificada para cada hora.

Tabela 4.10 – Quantidade de horários pertencentes a cada um dos quatro grupos classificados de acordo com os acumulados horários de descargas elétricas observadas e baseados nos percentis da tabela 4.9. Valores referentes ao período entre 14 e 02 UTC do mês de janeiro de 2010.

Categoria	Quantidade de Horas
SR	71
CAT1	48
CAT2	97
CAT3	176
<b>Total</b>	<b>392</b>

Realizada a separação dos horários avaliados em quatro grupos distintos de acordo com seus respectivos acumulados de descargas elétricas registrados, a próxima etapa constituiu-se em analisar o comportamento das variáveis simuladas em cada um destes

grupos. O intuito desta análise foi o de caracterizar cada um dos quatro grupos recém-definidos de acordo com os volumes simulados, ou seja, este intuito baseou-se no pré suposto de que, se foi possível classificar os horários em termos de seus acumulados elétricos, também seria possível distinguir os volumes que cada variável assume em cada grupo. Desta forma, ficariam caracterizados valores de referência para as variáveis simuladas, a partir dos quais se tornaria possível determinar a intensidade da atividade elétrica de outras simulações numéricas, desde que realizadas sob os mesmos padrões que aquela realizada para janeiro de 2010.

Com isso, a figura 4.24 apresenta a distribuição de frequência obtida entre as variáveis simuladas numericamente e o acumulado horário de descargas elétricas para o mês de janeiro de 2010. Os valores horários estão partilhados entre os quatro grupos descritos acima, de forma que os pontos em vermelho representam os horários nos quais o acumulado de descargas elétricas ficaram abaixo de 3, simbolizando assim o grupo SR. Os pontos em amarelo, verde e preto representam, respectivamente, os horários pertencentes à CAT1, CAT2 e CAT3.

Dos 321 horários pertencentes às CAT1, CAT 2 e CAT3, apenas 3% apresentam acumulados de descargas elétricas maiores que  $3.000 \text{ h}^{-1}$ . Os volumes simulados para as variáveis estudadas nestes nove horários, que representam 3% do total de horários de atividade elétrica não nula, são completamente distintos e aleatórios entre si. No caso da razão de mistura de ice, pode-se separá-los em dois grupos, o primeiro com valores em torno de  $0,14 \text{ kg.kg}^{-1}$  e acumulados variando entre  $3.500$  e  $5.250 \text{ h}^{-1}$ . O segundo grupo possui acumulados elétricos similares, embora possuam valores estimados de aproximadamente  $0,06 \text{ kg.kg}^{-1}$ .

Os valores obtidos para razão de mistura de snow e graupel são mais padronizados, variando entre  $1$  e  $2 \text{ kg.kg}^{-1}$  e entre  $0$  e  $0.05 \text{ kg.kg}^{-1}$ , respectivamente, para todos os 9 horários. Velocidade vertical e LPI também apresentaram comportamento similares entre si, com oito dos 9 casos possuindo valores entre  $0,5$  e  $3 \text{ ms}^{-1}$  para a componente vertical da velocidade do vento e  $0 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$  para o índice em questão, sendo que apenas no horário no qual foi registrado um acumulado de 3.951 descargas os valores assumidos por estas variáveis foi de  $13 \text{ m.s}^{-1}$  e  $200 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$ , respectivamente. Em termos de precipitação não convectiva, os valores também ficaram limitados a acumulados menores que  $400 \text{ mm.h}^{-1}$ , com exceção, novamente, do horário para o qual o número de descargas elétricas detectadas foi de aproximadamente 3.951, que obteve valores de  $600 \text{ mm.h}^{-1}$ .

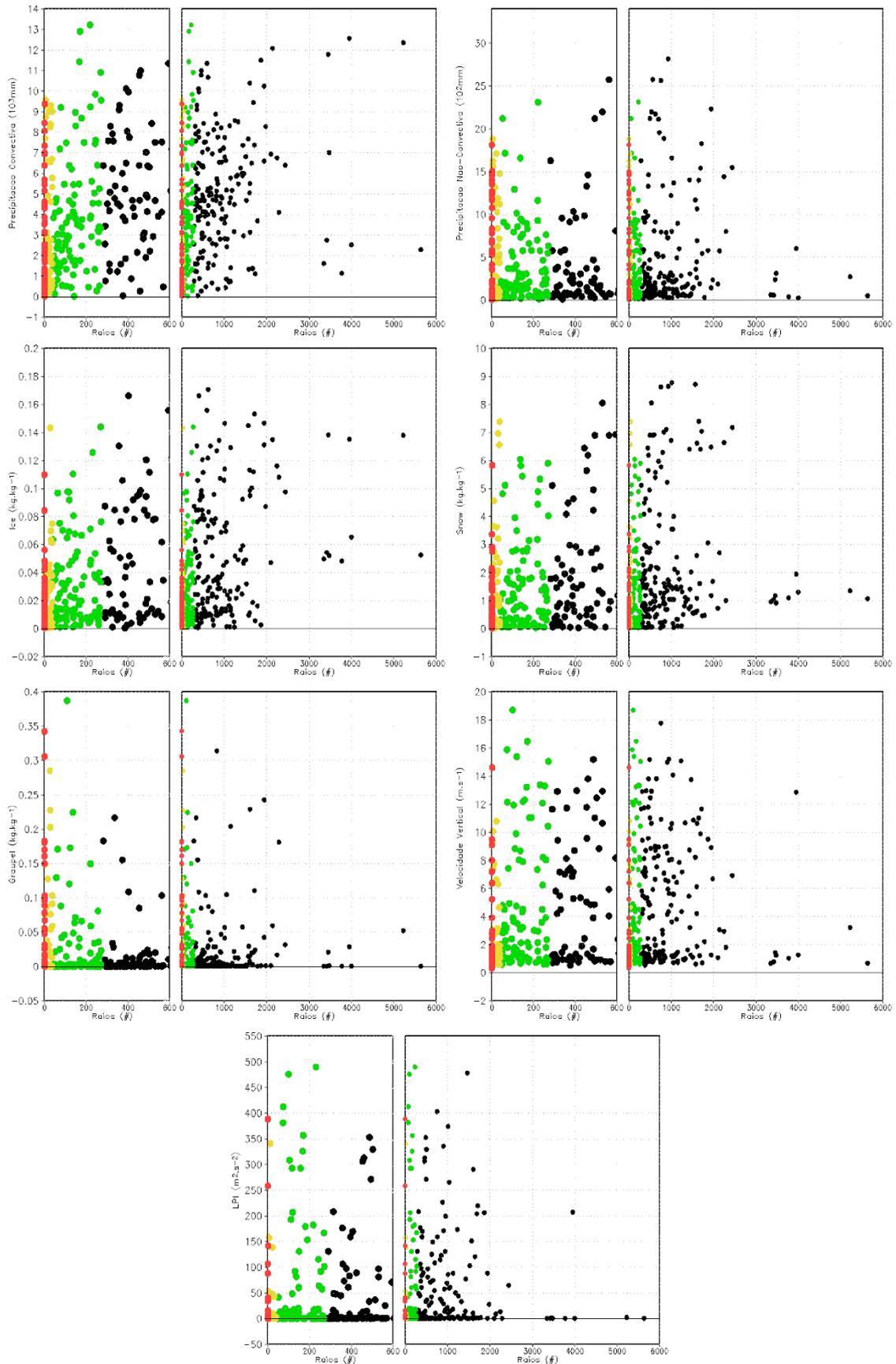


Figura 4.24 – Relações de dispersão obtidas entre os acumulados horários de descargas elétricas observadas (eixo das abscissas) e os acumulados horários das séries de precipitação convectiva ( $\text{mm.h}^{-1}$ ) (a), precipitação não convectiva ( $\text{mm.h}^{-1}$ ) (b), razão de mistura de

ice ( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ) (c), razão de mistura de snow ( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ) (d), razão de mistura de graupel ( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ) (e), componente vertical da velocidade do vento ( $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})\cdot\text{h}^{-1}$ ) (f) e LPI ( $(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2})\cdot\text{h}^{-1}$ ) (g), nos eixos das coordenadas de cada um dos gráficos apresentados. Valores correspondentes ao período entre 14 e 02 UTC de cada dia do mês de janeiro de 2010. Horários com acumulados de descargas menores que 3 aparecem em vermelho, aqueles com acumulados entre 3 e 38 aparecem em amarelo, entre 39 e 272 aparecem em verde e horários com acumulados maiores que 272 aparecem em preto, representando assim, respectivamente, os grupos SR, CAT1, CAT2 e CAT3 classificados de acordo com os percentis da tabela 4.9.

Ao analisar a relação de dispersão obtida para precipitação convectiva tem-se novamente um padrão aleatório de volumes acumulados. Em cinco dos nove horários por ora avaliados, estes volumes ficaram em torno de 1.000 e 3.000  $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ . No horário para o qual se registraram aproximadamente 3.500 descargas elétricas o volume precipitado foi de 7.000  $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ . Nos demais horários os acumulados de precipitação convectiva ficaram em torno de 12.000  $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ , dentre os quais se destaca novamente o horário caracterizado pelo total de 3.951 ocorrências de descargas elétricas com um acumulado horário de 12.550  $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ .

Alterando o foco da análise para o conjunto de dados horários que obtiveram acumulados inferiores a 3.000  $\text{h}^{-1}$ , incluindo aqueles pertencentes ao conjunto SR, repete-se novamente o fato de não haver qualquer relação entre os valores simulados e os totais observados de descargas elétricas. Ice e velocidade vertical apresentam uma distribuição bastante homogênea de valores simulados para este grupo de acumulados observados, com uma leve tendência de maior concentração próximo aos valores seus valores mais baixos. No caso de snow e precipitação não convectiva, mas principalmente de LPI e graupel, esta tendência é fortemente acentuada, de forma que estas distribuições não mais se classificam como homogêneas, sendo caracterizadas por sua distribuição assimétrica em direção aos valores mais baixos dos gráficos apresentados. Distintamente dos dois primeiros padrões citados, a distribuição de frequência verificada para os valores de precipitação convectiva contém uma concentração maior de horários próxima aos valores intermediários do eixo das ordenadas do gráfico exposto, de forma que a maioria dos valores simulados encontra-se entre os limites de 3.000 e 9.000  $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ .

Note-se que à análise há pouco realizada cabem todos os quatro conjuntos de dados, determinados anteriormente de acordo com o número de ocorrência de descargas elétricas observadas em cada hora. Desta forma, a consequente conclusão à qual tal análise conduz, de que não há uma relação clara entre os valores simulados e observados que permita a

diferenciação entre horários de maior e menor atividade elétrica, é pertinente à totalidade dos horários avaliados, independentemente das categorias às quais os mesmos pertencem.

Os gráficos da figura 4.24 contêm, a sua esquerda, um zoom na região situada entre os valores de 0 e 400 descargas elétricas observadas. Assim é possível notar de maneira mais nítida os intervalos assumidos pelas variáveis simuladas em cada uma das categorias. A distribuição obtida entre a razão de mistura de ice e as descargas elétricas mostra que para o conjunto SR o intervalo simulado varia entre 0 e 0,13  $\text{kg.kg}^{-1}$ , sendo que mais do que 97% destes valores ficam abaixo de 0,06  $\text{kg.kg}^{-1}$ . O intervalo verificado para os horários da categoria 1 localiza-se entre 0 e 0,143  $\text{kg.kg}^{-1}$ , porém apenas um horário obteve valor maior que 0,08  $\text{kg.kg}^{-1}$ . Nas categorias 3 e 4 os valores simulados variam entre 0 e 0,144  $\text{kg.kg}^{-1}$  e entre 0 e 0,17  $\text{kg.kg}^{-1}$ , respectivamente. Ou seja, da mesma forma como a intensidade da atividade elétrica verificada para cada um dos grupos é crescente desde a classe SR até a CAT3, o mesmo ocorre para os máximos simulados para a razão de mistura de ice em cada um deles. No caso da distribuição dos valores de razão de mistura de snow, o intervalo entre 0 e 6  $\text{kg.kg}^{-1}$  abrange todos os horários pertencentes às categorias SR e 2, ao passo que a categoria 1 possui três horários com valores simulados maiores que 6  $\text{kg.kg}^{-1}$ , de forma que seu intervalo de abrangência se estende desde 0  $\text{kg.kg}^{-1}$  até 7,34  $\text{kg.kg}^{-1}$ . No caso da categoria 3 os valores oscilam entre 0 e 9  $\text{kg.kg}^{-1}$ , com ressalva para o fato de que os horários com maiores acumulados de descargas elétricas apresentam baixas quantidades simuladas para esta variável. Portanto, esta distribuição de frequência não apresenta uma ordem crescente para os máximos simulados em cada um dos grupos que seja condizente com a ordem crescente de seus respectivos intervalos de acumulado de descargas elétricas. Para a distribuição dos valores da variável graupel, as quantidades simuladas estendem-se desde 0  $\text{kg.kg}^{-1}$  até 0,34, 0,28, 0,39 e 0,31  $\text{kg.kg}^{-1}$ , nas classes SR, CAT1, CAT2 e CAT3, respectivamente. Ou seja, mais uma vez nenhuma relação entre os máximos simulados e as diferentes categorias de intensidade elétrica foi observada. Na distribuição de frequência da velocidade vertical tem-se que o valor mínimo alcançado para as quatro classes é de 0,3  $\text{m.s}^{-1}$ , sendo que nas categorias 2 e 3 as simulações alcançam valores próximos à 18  $\text{m.s}^{-1}$ . Nas demais categorias os máximos observados foram de 14,6 e 10,7  $\text{m.s}^{-1}$ , nas classes SR e CAT1, respectivamente. Para o LPI os máximos valores simulados em cada categoria foram de 388, 340, 490 e 477  $\text{m}^2.\text{s}^{-2}$  para cada uma das classes em ordem crescente de atividade elétrica observada. Sendo assim, conforme verificado também para a velocidade vertical, não se observa relação entre os máximos observados e a atividade elétrica do grupo aos quais os mesmos pertencem. As classes SR e CAT1 possuem os mesmos intervalos de abrangência para as distribuições de precipitação convectiva e não convectiva, sendo eles delimitados pelos valores de 0 e 9.500  $\text{mm.h}^{-1}$  e 0 e

180 mm.h<sup>-1</sup>, respectivamente. Na categoria 2 o maior valor de precipitação convectiva ultrapassa o limite de 13.000 mm.h<sup>-1</sup> enquanto que na categoria 3 o máximo atingido por esta variável é de 12.550 mm.h<sup>-1</sup>. Portanto, a precipitação convectiva segue os mesmos moldes de comportamento das demais variáveis, com exceção do ice, apresentando valores máximos para cada um dos grupos que não possuem a mesma ordem crescente que a atividade elétrica característica de cada um deles. Já os máximos observados para precipitação não convectiva possuem sim uma ordem crescente para os grupos entre SR e CAT3, ordem essa condizente com a atividade elétrica característica dos mesmos, assim como observado para a distribuição de frequência da razão de mistura de ice.

Desta forma, as distribuições de frequência apresentadas mostram que, apenas para duas das sete variáveis estudadas verifica-se a existência, mesmo que sutil, de uma ordem crescente para os máximos observados em cada grupo. Para as demais variáveis tal correlação não foi encontrada. Com relação aos mínimos verificados, nota-se não haver qualquer distinção entre os valores obtidos para cada uma das quatro classes de acumulados elétricos para todas as sete distribuições apresentadas. Portanto, dada a figura 4.24 e as observações descritas há pouco, uma vez que a intersecção dos valores simulados existente entre as quatro classes de acumulados elétricos, definidas na tabela 4.9, é consideravelmente elevada, afirma-se que não é possível caracterizar as referidas classes de acordo com as quantidades simuladas para cada uma das variáveis analisadas.

Apesar disso, tendo-se em vista que o objetivo principal deste trabalho é determinar um método para estimar a atividade elétrica de tempestades a partir dos resultados de simulações numéricas, adotou-se uma metodologia baseada em limiares estabelecidos para as variáveis de saída do modelo WRF a fim de determinar, qualitativamente, a atividade elétrica do período simulado.

Tais limiares foram estabelecidos, considerando-se inicialmente, o conjunto de dados que compõem as categorias 1, 2 e 3. Estes horários foram ordenados de acordo com a ordem crescente de cada uma das variáveis simuladas, cada uma ao seu tempo, e independentemente da classe às quais os mesmos pertenciam. Por exemplo, o total dos 321 horários pertencentes às categorias 1, 2 e 3 foram ordenados em ordem crescente de acordo com a razão de mistura de ice simulada para cada um deles. A partir disto, o limiar para a variável ice foi estabelecido como aquele simulado para o horário que ocupava a 32ª posição nesta série, já ordenada no passo anterior. O mesmo procedimento foi realizado separadamente para cada uma das variáveis simuladas. A aplicação destes limiares se dá de forma que, os horários para os quais se verifica um valor de razão de mistura de uma determinada variável menor ou igual ao limiar estabelecido são considerados como horários

nos quais não há registro de descargas elétricas, de forma que, aqueles que apresentam valores maiores que o limiar são considerados horários para os quais os acumulados de descargas elétricas é representativo. A tabela 4.11 apresenta os valores dos limiares obtidos para cada uma das variáveis a partir da simulação numérica do mês de janeiro de 2010.

Tabela 4.11 – Limiares estabelecidos para avaliação dos grupos informados na tabela 4.10 a partir dos resultados obtidos para cada uma das variáveis simuladas para o mês de janeiro de 2010. Os limiares foram obtidos considerando somente os horários para os quais os acumulados de descargas elétricas detectadas pela RINDAT foram maiores ou iguais a três.

Vel. Vertical ( $m.s^{-1}$ )	Ice ( $kg.kg^{-1}$ )	Snow ( $kg.kg^{-1}$ )	Graupel ( $kg.kg^{-1}$ )	Rainc (mm)	Rainnc (mm)	LPI ( $m^2.s^{-2}$ )
0,7768	0,0048	0,0941	0,0000	794,20	36,29	0,0000

Todos os limiares foram estabelecidos com base no 32º valor de cada série devido ao fato deste número representar 10% do total de horários distribuídos entre as categorias 1, 2 e 3. Com isso, pretendeu-se assumir uma margem de erro de 10% na determinação do potencial elétrico da simulação. Ou seja, ao determinar que, no conjunto dos horários classificados como não nulos em termos de ocorrência de descargas elétricas, os horários que possuem razão de mistura de ice igual ou inferior ao limiar estabelecido para esta variável são considerados como horários nos quais não houve registro de atividade elétrica, tem-se que 10% destes valores serão considerados erroneamente. Desta forma, estes limiares foram aplicados às quatro classes de horários estabelecidas anteriormente com o objetivo de verificar quais seriam os percentuais de erro verificadas para cada uma delas.

A tabela 4.12 apresenta uma síntese dos resultados obtidos através da aplicação dos limiares mostrados na tabela 4.11 aos horários pertencentes às classes SR, CAT1, CAT2 e CAT3. Os percentuais informados representam a quantidade de horários que tiveram sua atividade elétrica classificada erroneamente através da aplicação do método dos limiares apresentado anteriormente. A última coluna desta tabela apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação simultânea dos limiares de ice, snow, graupel e precipitação convectiva (rainc) aos conjuntos de dados avaliados, e será daqui em diante referida como método combinado. A escolha destas variáveis para a composição do método combinado decorre do fato de que, as três primeiras representam variáveis diretamente ligadas ao fenômeno da separação de cargas dentro das tempestades elétricas, conforme descrito e referenciado na introdução deste trabalho. A precipitação convectiva foi escolhida por ter sido a variável que melhor representou os padrões de atividade elétrica observados para o período analisado, além de ser uma variável proveniente da parametrização de cumulus utilizada na simulação numérica.

Tabela 4.12 – Percentual de erro induzido pela aplicação dos limiares estabelecidos com base na simulação de janeiro de 2010 aos grupos classificados de acordo com os acumulados horários de descargas elétricas detectadas pela RINDAT para o mês de janeiro de 2010.

	Vel. Vert.	Ice	Snow	Graupel	Rainc	Rainnc	LPI	Comb.
SR	85%	80%	90%	56%	61%	82%	76%	35%
CAT 1	21%	19%	8%	46%	25%	19%	15%	60%
CAT 2	9%	12%	18%	32%	11%	12%	9%	40%
CAT 3	7%	6%	6%	22%	5%	6%	10%	28%

Os valores apresentados na tabela 4.12 mostram que, com exceção dos resultados obtidos para snow, LPI e para o método combinado, o percentual de erro assume os menores valores na classe CAT3, e os mesmos aumentam à medida que a intensidade da atividade elétrica dos conjuntos de dados decai. Desta forma, os maiores percentuais de erro são verificados para o grupo SR, independentemente da variável considerada. Isso significa que, a grande maioria dos horários pertencentes à categoria SR possui valores simulados para cada uma destas variáveis que são maiores que os limiares estabelecidos para cada uma delas. Sendo assim, a aplicação destes limiares para determinação da ocorrência ou não de atividade elétrica nestes horários induziria a um percentual de falso alarme de 80% do total de horários que não registraram ocorrência de atividade elétrica. Ou seja, 80% dos horários para os quais a atividade elétrica foi considerada nula seriam classificados como horários pertencentes às categorias CAT1, CAT2 ou CAT3.

A diminuição dos percentuais de erro verificada entre as categorias CAT1 e CAT3 simboliza que, apesar de não ter sido possível identificar uma separação entre os intervalos de valores que uma determinada variável assume em cada uma destas três categorias, conforme discussão apresentada em torno da figura 4.24, de uma maneira geral os valores simulados são sim maiores para os horários da CAT3, quando comparados aos horários das CAT2 e CAT1. Desta forma, uma vez que os valores que determinada variável assume nas categorias mais altas também são maiores, a aplicação desta metodologia tende a desprezar quantidades menores de horários, reduzindo assim o percentual de erro, conforme verificado na tabela 4.12.

A variável graupel apresentou o pior desempenho para as CAT1, CAT2 e CAT3, dentre todos os oito limiares propostos, considerando as sete variáveis simuladas e o método combinado. Por outro lado, apresentou o segundo menor percentual de erro para o conjunto SR, sendo maior somente do que aquele obtido para o método combinado.

A precipitação convectiva foi a variável que apresentou o melhor conjunto de valores quando consideram-se os percentuais apresentados para todas as quatro classes de acumulados elétricos. Isso porque esta variável apresenta um percentual de erro consideravelmente baixo para o conjunto SR, sem elevar os resultados obtidos para as demais categorias.

O método combinado reduziu consideravelmente o percentual de erro obtido para o grupo SR. Por outro lado, o percentual de erro observado nas demais categorias aumentou bastante, alcançando valores de 60% para a CAT1. Entretanto, para a CAT3, à qual pertencem os horários com maiores acumulados de descargas elétricas, o percentual de erro é menor do que 30%. Portanto, dentre os oito limiares avaliados, a combinação proposta como método combinado caracteriza-se como a melhor ferramenta disponível na tarefa de determinar a intensidade da atividade elétrica a partir da simulação numérica de janeiro de 2010. O método é capaz de separar os horários nos quais não houve registro de atividade elétrica daqueles nos quais os acumulados foram representativos com um percentual de erro de apenas 35%, sendo que o percentual de erro para aqueles horários de atividade elétrica mais intensa (CAT3) é ainda menor, em torno de 28%. Analisando conjuntamente o total das 392 horas avaliadas, o erro obtido com o método combinado é de apenas 36%.

Desta forma, a análise dos resultados apresentados até aqui mostra que, de uma maneira geral, a simulação numérica do mês de janeiro de 2010, realizada de acordo com os parâmetros apresentados nas tabelas 1 e 2, não conseguiu reproduzir de maneira satisfatória os padrões observados em termos de intensidade de atividade elétrica. Em termos qualitativos, nota-se que para grande parte do período analisado, os resultados obtidos a partir desta simulação condizem com a ocorrência de atividade elétrica de acordo com o observado pela rede de detecção. Entretanto, ao analisar quantitativamente estes resultados chega-se à conclusão de que não há correlação alguma entre os volumes simulados para cada uma das variáveis e as quantidades observadas de descargas elétricas para grande parte do período avaliado. Apesar das recentes afirmações, um método baseado na aplicação de limiares relativos às quantidades simuladas para as variáveis analisadas foi estabelecido. Este método tem o objetivo de classificar qualitativamente os horários simulados, indicando se houve ou não registro de acumulado considerável de descargas elétricas em determinado período. Ressalta-se que tal método não tem por objetivo determinar a intensidade da atividade elétrica.

#### **4.3.5 – Avaliação da simulação numérica do mês de janeiro de 2011**

Portanto, com o objetivo de verificar o desempenho deste método quando aplicado a outras simulações numéricas, escolheu-se o mês de janeiro de 2011 para análise. Optou-se por escolher o mesmo mês de outro ano para garantir que as características climáticas sob as quais a simulação seria realizada fossem mais próximas possível da realizada para o mês de janeiro de 2010. Além disso, dentre os três janeiros para os quais os dados de observação estavam disponíveis, o mês de 2011 foi o que apresentou menor acumulado elétrico, o que o torna bastante interessante por representar um período de atividade elétrica tão distinta daquele primeiramente simulado.

A simulação numérica do mês de janeiro de 2011 foi realizada nos mesmos moldes que aquela do mês de janeiro de 2010. Além disso, a esta simulação foram aplicados as mesmas defasagens apresentadas na tabela 4.6 para que as análises deste mês sejam realizadas sob as mesmas condições que a primeira. Ressalto que a simulação realizada para 2011 possui somente 29 dias, compreendendo o período entre 1° à 29 de janeiro de 2011. A tabela 4.13 apresenta uma síntese dos resultados obtidos a partir da análise da distribuição vertical das variáveis relativas às razões de mistura de ice, snow e graupel, além da componente vertical do vento, para o período entre 12 e 00 UTC de cada dia avaliado, realizada a partir de figuras similares às 4.16, 4.17, 4.18 e 4.19. Em outras palavras, a referida tabela é similar à tabela 4.7, porém traz informações a respeito da simulação numérica do mês de janeiro de 2011.

Assim como observado no mês de janeiro de 2010 nota-se que a grande maioria dos dias avaliados registrou ocorrência de volumes consideráveis de descargas elétricas, com um total de apenas 17% dos dias nos quais não houve registro de atividade elétrica entre às 12 e 00 UTC de cada um dos dias.

Dos 24 dias que registraram a ocorrência de descargas 33% não obtiveram volumes representativos simulados para cinco das seis variáveis apresentadas na tabela 4.13. Em todos estes 8 dias, por coincidência os 8 últimos dias de avaliação deste mês, apenas os volumes simulados para a precipitação convectiva sinalizaram a existência de nuvens de tempestade, o que está de acordo com o observado, uma vez que volumes representativos de descargas elétricas foram observados. Nos demais dias, a ocorrência de raios está sempre relacionada à ocorrência de movimentos ascendentes de velocidades significativas e de consideráveis acumulados de precipitação convectiva, exceto pelo dia 16 de janeiro. Nestes 16 dias, em apenas 3, 2 e 1 dias não se verificou valores consideráveis de razão de mistura de ice, snow e graupel, respectivamente. Com relação aos dias classificados como 'NÃO' para a ocorrência de descargas elétricas, em apenas um deles as variáveis simuladas foram classificadas da mesma forma, com exceção da precipitação convectiva. Por outro lado, em dois desses dias os

resultados obtidos para todas as variáveis simuladas apresentaram volumes representativos, de forma que foram classificados como 'SIM' para a ocorrência de raios. Todos os quatro dias nos quais os acumulados de descargas elétricas não foram representativos foram classificados como 'SIM' na coluna relativa à precipitação convectiva.

Tabela 4.13 - Resumo dos resultados obtidos a partir dos critérios estabelecidos para análise dos acumulados de descargas elétricas detectadas pela RINDAT e das distribuições verticais horárias dos valores de razão de mistura de ice, razão de mistura de snow, razão de mistura de graupel e componente vertical da velocidade do vento e para os acumulados horários de precipitação convectiva e não convectiva resultantes da simulação do WRF para o período entre 12 e 00 UTC do mês de janeiro de 2011.

Dia	Raios	Ice	Snow	Graupel	Velocidade Vertical	Rainc	Rainnc
1	SIM	NÃO	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
2	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
3	NÃO	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
4	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
5	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM	NÃO
6	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM	SIM	NÃO
7	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
8	SIM	NÃO	NÃO	SIM	SIM	SIM	NÃO
9	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	NÃO
10	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
11	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
12	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
13	NÃO	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
14	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
15	NÃO	NÃO	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
16	SIM	NÃO	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM
17	NÃO	SIM	SIM	NÃO	NÃO	SIM	NÃO
18	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
19	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
20	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
21	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
22	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	NÃO
23	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	NÃO
24	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	NÃO
25	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	NÃO
26	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	NÃO
27	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	NÃO
28	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	NÃO
29	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	NÃO

Tabela 4.14 – Resumo dos resultados obtidos a partir dos critérios estabelecidos para análise dos acumulados de descargas elétricas detectadas pela RINDAT e das distribuições verticais horárias dos valores de razão de mistura de ice, razão de mistura de snow, razão de mistura de graupel e componente vertical da velocidade do vento e para os acumulados horários de precipitação convectiva e não convectiva resultantes da simulação do WRF para o período entre 00 e 12 UTC do mês de janeiro de 2011.

Dia	Raios	Ice	Snow	Graupel	Velocidade Vertical	Rainc	Rainnc
1	NÃO	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
2	<b>SIM</b>	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
3	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
4	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
5	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
6	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	NÃO
7	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	NÃO
8	NÃO	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO
9	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
10	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
11	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
12	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
13	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
14	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
15	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
16	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
17	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	NÃO
18	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
19	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
20	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>
21	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	NÃO
22	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	<b>SIM</b>	NÃO	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO
23	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
24	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
25	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
26	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
27	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO
28	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
29	<b>SIM</b>	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO

A tabela 4.14 apresenta resultados similares aos da tabela 4.13, porém para o período entre 00 e 12 UTC dos 29 dias simulados para o mês de janeiro de 2011. Analisando a tabela 4.14 observa-se que em apenas 34% (10 dias) houve registro de descargas elétricas para o

período entre 00 e 12 UTC dos 29 dias avaliados, percentual este similar ao encontrado para o mês de janeiro de 2010. Destes 10 dias quatro tiveram valores simulados não representativos para todas as variáveis apresentadas, e somente os dias 11, 12, 13 e 20 foram classificados como 'SIM' em todas as colunas da tabela. No dia 2 apenas a razão de mistura de ice foi classificada como 'NÃO', enquanto as demais foram classificadas positivamente. No dia 22, três das seis variáveis apresentaram, em termos qualitativos, resultados coerentes com a atividade elétrica observada.

No grupo da grande maioria dos dias que não tiveram atividade elétrica de volume significativo neste horário, apenas quatro apresentaram resultados negativos para todas as variáveis avaliadas. Os dias nos quais a velocidade vertical foi a única variável que alcançou o critério estabelecido totalizam seis, no caso da precipitação convectiva este número equivale a cinco dias. Assim como observado em janeiro de 2010, a variável que melhor sinaliza a não ocorrência de atividade elétrica significativa é a razão de mistura de graupel, com um percentual de concordância de 84% para o período entre 00 e 12 UTC do mês de janeiro de 2011.

Desta forma, assim como observado para janeiro de 2010, a frequência de ocorrência de descargas elétricas no período que vai desde às 12 UTC de um dado dia até às 00 UTC do próximo é muito maior do que aquela observada para o período entre 00 e 12 UTC. Portanto, com base nessa argumentação e no gráfico da figura 4.5 (b) apresentado na seção 4.1, os horários entre 03 e 13 UTC foram desconsiderados do conjunto daqui em diante analisado.

Assim, para uma análise quantitativa das variáveis simuladas para janeiro de 2011 utilizou-se da mesma metodologia aplicada ao mês anteriormente avaliado. Ou seja, os horários entre 14 e 02 UTC de cada dia foram separados em quatro grupos, de acordo com o acumulado de descargas elétricas registrado para cada hora, conforme os intervalos apresentados na tabela 4.9. O resultado obtido a partir de tal classificação é mostrado na tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Quantidade de horários pertencentes a cada um dos quatro grupos classificados de acordo com os acumulados horários de descargas elétricas observadas e baseados nos percentis da tabela 4.9. Valores referentes ao período entre 14 e 02 UTC do mês de janeiro de 2011.

<b>Categoria</b>	<b>Quantidade de Horas</b>
SR	80
CAT 1	87
CAT 2	131
CAT 3	73
<b>Total</b>	<b>371</b>

A figura 4.25 equivale à 4.24, porém os resultados apresentados são relativos à simulação realizada para janeiro de 2011. O primeiro ponto a ser citado ao observar as distribuições de frequência é que, conforme dito anteriormente, o mês de janeiro de 2011 foi consideravelmente menos intenso que o mesmo mês do ano de 2010, uma vez que o máximo do eixo relativo às descargas elétricas daquele ano, escala horizontal, é de 3.300 descargas elétricas acumuladas em uma hora, enquanto que para o ano de 2010 este valor atinge 5.600 h<sup>-1</sup>. Além disso, há também um grupo constituído de apenas 4 horas que se destacam das demais devido ao elevado número de descargas elétricas observadas, mais de 1.500 h<sup>-1</sup>. Para estes horários nota-se que os valores simulados de precipitação não convectiva e razão de mistura de snow e graupel em nada se relacionam à atividade elétrica observada, pois apresentam valores notavelmente abaixo dos máximos simulados para cada uma delas.

Já os resultados obtidos para as distribuições de razão de mistura de ice e para a componente vertical da velocidade do vento são mais coerentes no caso destes horários de atividade mais intensa, uma vez que apresentam valores simulados relativamente elevados quando comparados ao restante da simulação. No caso do LPI, os dois casos mais intensos ocupam o 5º e o 7º lugar na lista dos maiores valores simulados para esta variável. Porém, nos outros dois casos que registraram volumes consideráveis de descargas elétricas observadas os volumes calculados para o LPI foram relativamente baixos. A distribuição de frequência obtida para a precipitação convectiva também apresenta resultados relativamente bons para estes casos mais extremos, uma vez que os pontos que os representam situam-se nas porções intermediárias do eixo vertical da distribuição de frequência apresentada. Ou seja, estes casos não correspondem aos maiores volumes simulados de precipitação convectiva, mas possuem volumes coerentes para horários caracterizados por alta atividade elétrica.

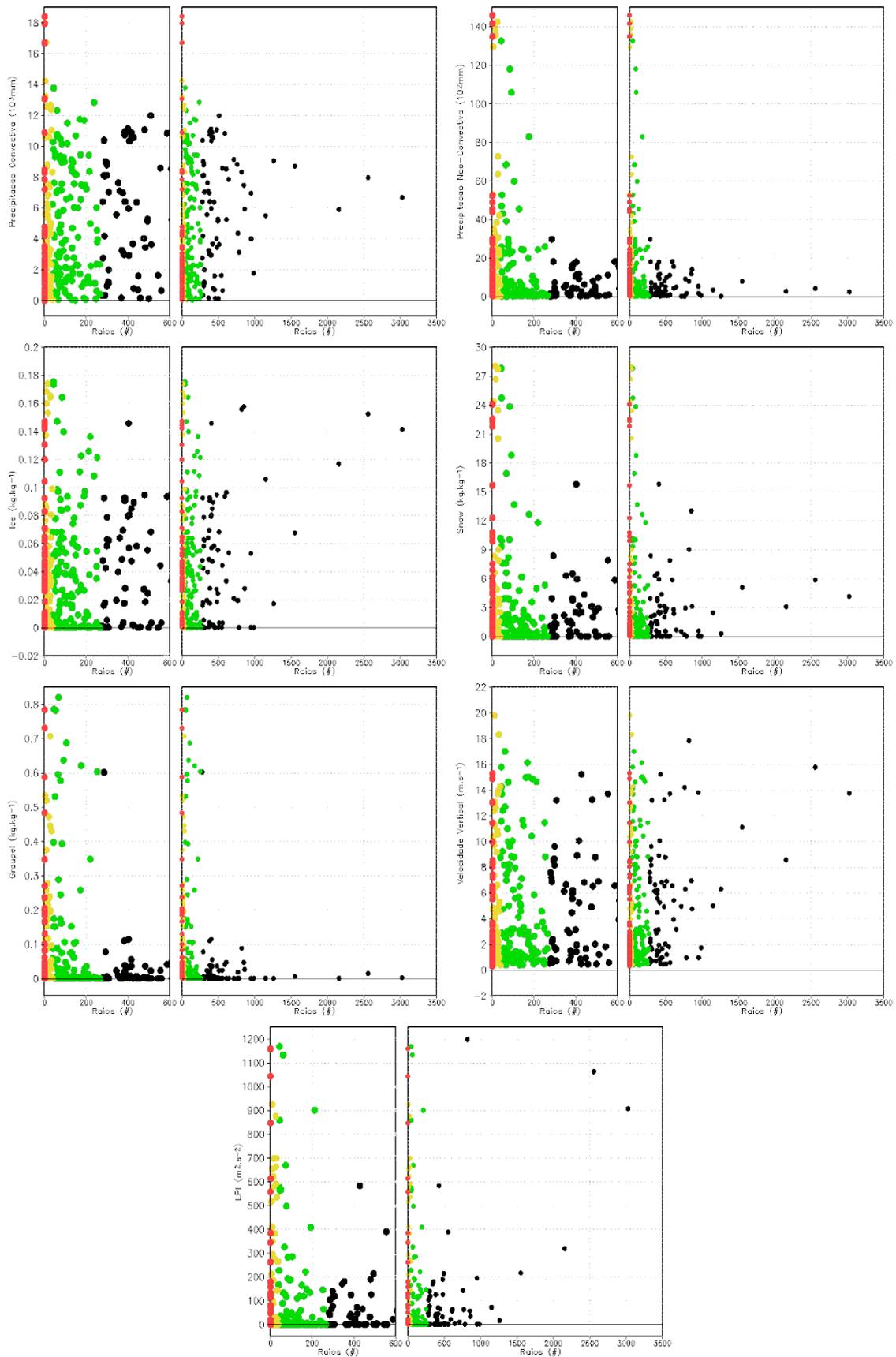


Figura 4.25 – Relações de dispersão obtidas entre os acumulados horários de descargas elétricas observadas (eixo das abscissas) e os acumulados horários das séries de precipitação convectiva ( $\text{mm.h}^{-1}$ ) (a), precipitação não convectiva ( $\text{mm.h}^{-1}$ ) (b), razão de mistura de ice

( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ) (c), razão de mistura de snow ( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ) (d), razão de mistura de graupel ( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ) (e), componente vertical da velocidade do vento ( $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})\cdot\text{h}^{-1}$ ) (f) e LPI ( $(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2})\cdot\text{h}^{-1}$ ) (g), nos eixos das coordenadas de cada um dos gráficos apresentados. Valores correspondentes ao período entre 14 e 02 UTC de cada dia do mês de janeiro de 2011. Horários com acumulados de descargas menores que 3 aparecem em vermelho, aqueles com acumulados entre 3 e 38 aparecem em amarelo, entre 39 e 272 aparecem em verde e horários com acumulados maiores que 272 aparecem em preto, representando assim, respectivamente, os grupos SR, CAT1, CAT2 e CAT3 classificados de acordo com os percentis da tabela 4.9.

Ao observar os demais horários, nos quais os registros de descargas elétricas não ultrapassaram o limite de 1.500 descargas acumuladas, notam-se dois comportamentos distintos para as distribuições da figura 30.0. As relações de dispersão obtidas para precipitação convectiva, razão de mistura de ice e velocidade vertical contém distribuições bastante homogêneas ao longo do eixo das ordenadas quando se observa o conjunto de todas as horas apresentadas, sem a distinção entre as diferentes categorias de intensidade de atividade elétrica. Ao analisar estas categorias discriminadamente tem-se que, para o gráfico relativo à precipitação convectiva, o intervalo de valores simulados para os horários dos grupos SR abrange valores entre 0 e 18.400 mm, o que caracteriza o grupo relativo à não ocorrência de descargas elétricas como sendo aquele para o qual foram simulados os maiores acumulados de precipitação convectiva. Apesar deste fato, a grande maioria dos horários pertencentes a este grupo obteve valores simulados para esta variável menores que 5.000 mm. Com exceção de um único horário da CAT1 que apresenta um acumulado de 16.700 mm, o intervalo de abrangência dos valores simulados para esta categoria é bastante similar ao da CAT2, variando entre 0 mm e aproximadamente 14.000 mm acumulados em uma hora. O conjunto CAT3, constituído pelos horários com maiores acumulados de descargas elétricas possui o menor máximo simulado dentre os quatro grupos avaliados. O intervalo de valores simulados para esta categoria se inicia em 0 mm mas não atinge o valor de 12.000 mm acumulados em uma hora.

No caso da velocidade vertical, os valores mínimos obtidos para cada um dos grupos são bastante próximos a  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . O maior intervalo de abrangência foi obtido para o grupo CAT1, com máximo simulado de quase  $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . A seqüência se completa pelos grupos CAT3, CAT2 e SR. Porém, se desconsiderarmos o único horário pertencente ao grupo CAT3 que obteve valores maiores que  $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , o intervalo de valores simulados para esta categoria se assemelha ao intervalo obtido para o grupo SR, que abrange os valores entre 0 e 16.000 mm. Com base nesta consideração, a seqüência dos grupos de acordo com a ordem decrescente de

intervalo de abrangência se inicia no grupo CAT1, passando pelos grupos CAT2, CAT3 e SR, respectivamente.

A relação de dispersão obtida para a razão de mistura de ice mostra que o mesmo intervalo de abrangência é verificado para os grupos CAT1 e CAT2, variando desde  $0 \text{ kg.kg}^{-1}$  até aproximadamente  $0.18 \text{ kg.kg}^{-1}$ . O intervalo observado para o grupo SR alcança máximos próximos à  $0.15 \text{ kg.kg}^{-1}$ , porém a grande maioria dos horários pertencentes a este grupo tiveram valores simulados para esta variável abaixo de  $0.07 \text{ kg.kg}^{-1}$ . O grupo CAT 3 possui intervalo de abrangência menor do que o observado para os grupos CAT1 e CAT2 e maior do que o verificado para o grupo SR, iniciando-se em  $0 \text{ kg.kg}^{-1}$  e estendendo-se até valores próximos à  $0.16 \text{ kg.kg}^{-1}$ . Entretanto, um ponto a ser destacado é que, apesar de apresentar horários com máximos consideráveis de razão de mistura, 90% dos horários pertencentes à CAT3 obtiveram valores simulados para esta variável que ultrapassaram o valor de  $0.1 \text{ kg.kg}^{-1}$ .

As relações de dispersão obtidas para as variáveis precipitação não convectiva, LPI e razão de mistura de snow e graupel apresentaram uma distribuição distinta das três primeiras descritas. Nota-se, nos gráficos relativos a cada uma destas variáveis, uma nítida concentração de horários nas regiões inferiores do eixo das ordenadas. Ou seja, os valores simulados para a grande maioria dos horários foram bastante inferiores aos máximos observados para cada variável. Acumulado nulo de precipitação não convectiva representa o mínimo observado para todos os quatro grupos de horários. Entretanto, ao observar os valores simulados para esta variável nota-se que o grupo que o grupo SR contém o maior máximo simulado, seguido respectivamente pelos grupos CAT1, CAT2 e CAT3. Mais do que isso, observa-se que, excluindo-se apenas um ponto, todos os horários pertencentes ao grupo CAT3 apresentaram acumulados simulados para esta variável abaixo de  $2.000 \text{ mm}$ , valor este que representa apenas 15% do máximo obtido para o grupo CAT2. Resultados muito semelhantes foram obtidos para a dispersão relativa à razão de mistura de graupel. Há um grande acumulado de horários próximos aos valores mais baixos de razão de mistura simulados, principalmente para o grupo CAT3, para o qual a grande maioria dos valores tiveram máximos simulados próximos a  $0.1 \text{ kg.kg}^{-1}$ , ao passo que nos grupos SR, CAT1 e CAT 2 os máximos ultrapassam o valor de  $0.7 \text{ kg.kg}^{-1}$ . No caso da variável snow, padrões semelhantes foram observados, ou seja, grande concentração de horários nas regiões inferiores do eixo das coordenadas e máximos simulados para os grupos SR, CAT1 e CAT2 consideravelmente maiores que aqueles simulados para o grupo CAT3. Porém, a razão obtida entre os máximos simulados para este último grupo e aqueles simulados para os demais grupos não é tão pequena quanto às razões obtidas para as relações de dispersão das variáveis de precipitação não convectiva e razão de mistura de graupel.

No caso do LPI, analisando-se os horários que obtiveram menos de 1.500 descargas acumuladas e desconsiderando-se o único ponto caracterizado pelo valor de  $1.200 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$  calculado para esta variável, tem-se que a distribuição dos demais horários restantes se dá de maneira semelhante à observada para a razão de mistura de snow. Os maiores máximos são observados para os grupos SR e CAT2 e o máximo observado para o grupo CAT3 é 50% menor do que aqueles obtidos para os dois primeiros grupos citados.

Portanto, com relação aos conjuntos apresentados na tabela 4.15 e destacados por cores distintas na figura 4.25, mais uma vez nota-se não ser possível delimitar intervalos de ocorrência para um determinado conjunto que não possua uma grande intersecção com os demais três conjuntos apresentados. Em outras palavras, os intervalos nos quais os volumes simulados para cada um dos grupos são verificados são praticamente idênticos entre si, de forma que não é possível estabelecer um valor a partir do qual o número de casos para um determinado grupo torna-se muito pequeno ao passo que o número de casos pertencentes ao próximo grupo na escala de atividade elétrica se eleva rapidamente.

Desta forma, apesar da clara diferença em termos de intensidade de atividade elétrica verificada entre os meses de janeiro de 2010 e de 2011, e ainda que não tenha sido possível diferenciar os grupos SR, CAT1, CAT2 e CAT3 em termos de volumes simulados para as variáveis avaliadas, os limiares da tabela 4.11, obtidos a partir da simulação do mês de janeiro de 2010, foram novamente utilizados para verificar o percentual de erro introduzido pelos mesmos a cada um dos grupos considerando-se a simulação numérica realizada para o mês de janeiro de 2011. A tabela 4.16 apresenta os percentuais de erro obtidos para esta simulação.

Tabela 4.16 – Percentual de erro induzido pela aplicação dos limiares estabelecidos com base na simulação de janeiro de 2010 aos grupos classificados de acordo com os acumulados horários de descargas elétricas detectadas pela RINDAT para o mês de janeiro de 2011.

	Vel. Vert.	Ice	Snow	Graupel	Rainc	Rainnc	LPI	Comb.
SR	83%	66%	68%	66%	61%	95%	74%	51%
CAT 1	11%	32%	28%	32%	13%	14%	14%	41%
CAT 2	12%	31%	32%	40%	11%	15%	13%	43%
CAT 3	11%	30%	32%	37%	12%	14%	15%	40%

O primeiro ponto a ser destacado ao se comparar os resultados apresentados nas tabelas 4.12 e 4.16 é o aumento no percentual de erro obtido para o grupo CAT3 quando da aplicação dos limiares à simulação do mês de janeiro de 2011. Os valores simulados para as variáveis pertencentes a este grupo são menores do que aqueles obtidos para janeiro de 2010,

de forma que ao se aplicar os limiares propostos à simulação de 2011 o número de horas pertencentes a este grupo que são desconsiderados aumenta, elevando assim o percentual de erro para esta categoria. No caso do grupo CAT2 os mesmos padrões são observados, ou seja, há uma elevação no percentual de erro obtido quando da aplicação dos limiares a esta simulação numérica. Entretanto, tal elevação se dá de maneira mais suave do que aquela observada no grupo CAT3, quando o erro para algumas variáveis chegou a aumentar cinco vezes de uma simulação para outra. Além disso, nos grupos CAT2 e SR não há diferença entre os percentuais de erros obtidos para os dois meses avaliados em termos da aplicação do limiar proposto para precipitação convectiva, que permanecem iguais a 11% e 61%, respectivamente, tanto para janeiro de 2010 quanto para o mesmo mês do ano de 2011.

Com relação ao grupo CAT1, com exceção dos resultados obtidos para as variáveis ice e snow, há uma redução no percentual de erro observado para esta categoria. Ou seja, os valores simulados para os horários pertencentes a esta categoria são, de uma maneira geral, maiores do que aqueles simulados para o mês anteriormente avaliado. Para o grupo SR, com exceção dos resultados obtidos para as simulações de graupel, precipitação não convectiva e para a o método combinado, observa-se que os percentuais de erro obtidos são menores para este mês do que para janeiro de 2010. Ou seja, a quantidade de horários para os quais não se observaram volumes representativos de descargas elétricas e tampouco se obtiveram valores simulados maiores que os limiares apresentados na tabela 4.11 é maior para o mês por ora avaliado. No caso dos resultados obtidos para a razão de mistura de graupel e para a precipitação não convectiva, a elevação do percentual de erro observada no grupo SR, quando comparado ao mesmo grupo do mês de janeiro de 2010, não é tão acentuada, ao passo que para o método combinado observa-se um aumento significativo no percentual de erro para esta categoria.

De uma maneira geral, os resultados obtidos a partir da aplicação dos limiares inicialmente propostos à simulação numérica do mês de janeiro de 2011 produziram resultados insatisfatórios, uma vez que os percentuais de erro calculados são maiores do que aqueles obtidos para o mês de janeiro de 2010. Desta forma, com base na mesma metodologia utilizada na obtenção dos limiares apresentados na tabela 4.11, novos limiares foram obtidos, porém o conjunto de dados a partir do qual os mesmos foram extraídos é composto pelos valores horários obtidos da simulação numérica do mês de janeiro de 2011. A tabela 4.17 apresenta os novos limiares propostos.

Tabela 4.17 – Limiares estabelecidos para avaliação dos grupos informados na tabela 4.15 a partir dos resultados obtidos para cada uma das variáveis simuladas para o mês de janeiro de 2011. Os limiares foram obtidos considerando somente os horários para os quais os acumulados de descargas elétricas detectadas pela RINDAT foram maiores ou iguais a três.

Vel. Vertical ( $m.s^{-1}$ )	Ice ( $kg.kg^{-1}$ )	Snow ( $kg.kg^{-1}$ )	Graupel ( $kg.kg^{-1}$ )	Rainc (mm)	Rainnc (mm)	LPI ( $m^2.s^{-2}$ )
0,5251	0,0000	0,0001	0,0000	248,64	20,09	0,0000

Nota-se que os limiares obtidos a partir da simulação numérica do mês de janeiro de 2011 são com exceção daqueles atribuídos ao graupel e ao LPI, que já eram iguais a zero, menores do que aqueles para o mês de 2010. A redução foi mais acentuada nos limiares referentes à razão de mistura de snow e à precipitação convectiva. A tabela 4.18 apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação destes novos limiares à simulação numérica de janeiro de 2011.

Os percentuais de erro obtidos a partir dos novos limiares reduzem notavelmente para os grupos CAT1, CAT2 e CAT3. Porém, o aumento deste percentual para o grupo SR também é nítido. Em outras palavras, ao se reduzir o número de horas descartadas dentre aqueles horários que efetivamente registraram acumulados consideráveis de descargas elétricas, observa-se conjuntamente um aumento no número de horas descartadas dentre os horários nos quais a atividade elétrica foi considerada nula. Com isso, fica clara mais uma vez a dificuldade de estabelecer diferenças entre os volumes simulados para cada variável com base na atividade elétrica observada pela rede de detecção.

Tabela 4.18 – Percentual de erro induzido pela aplicação dos limiares estabelecidos com base na simulação de janeiro de 2011 aos grupos classificados de acordo com os acumulados horários de descargas elétricas detectadas pela RINDAT para o mês de janeiro de 2011.

	Vel. Vert.	Ice	Snow	Graupel	Rainc	Rainnc	LPI	Comb.
SR	96%	100%	100%	66%	80%	99%	74%	60%
CAT 1	6%	6%	3%	32%	6%	6%	14%	33%
CAT 2	5%	9%	7%	40%	5%	5%	13%	40%
CAT 3	5%	10%	7%	37%	4%	5%	15%	37%

Ao comparar estes resultados aos da tabela 4.12 tem-se que, uma das características dos resultados encontrados para o mês de janeiro de 2010 é que o percentual de erro cresce a medida que a intensidade da atividade elétrica dos grupos decai, ou seja, o erro é menor para o grupo CAT3 e maior para o grupo SR. Porém, ao analisar a tabela 4.18, nota-se não haver variação significativa entre os percentuais de erros obtidos para os grupos CAT1, CAT2 e CAT3, de forma que não é possível generalizar os resultados obtidos utilizando-se da afirmação feita anteriormente para os resultados do mês de janeiro de 2010.

Dados dois fatos já citados, o primeiro a cerca dos percentuais de erro (tabela 4.12) calculados a partir da aplicação dos limiares apresentados na tabela 4.11 à simulação de janeiro de 2010, que crescem no sentido oposto ao da atividade elétrica dos quatro grupos estudados, o que não foi observado para janeiro de 2011, e o segundo relativo aos percentuais de erros obtidos para o grupo SR na tabela 4.18, que são muito elevados, alcançando valores de 100%, conclui-se que o mês de janeiro de 2010 apresenta uma distinção entre os valores simulados para cada um dos grupos avaliados, ainda que tal distinção seja muito tênue. No caso do mês de janeiro de 2011 tal distinção não foi verificada em nenhuma das análises aqui realizadas.

#### 4.4 - Discussão dos Resultados

Na seção 4.2 foram apresentados três estudos de caso simulados numericamente pelo modelo WRF através de três simulações numéricas distintas para três períodos distintos, porém com as mesmas características de parametrização e resolução espaço-temporal.

O primeiro caso, ocorrido em 19 de janeiro de 2010, ou seja, durante o período de verão do hemisfério sul, se desenvolveu durante a passagem de um sistema pré frontal sobre o sudeste do Brasil. A elevada temperatura máxima (31,4°C) verificada na estação meteorológica do IAG-USP reforça as características sinóticas observadas para este dia. Além disso, a análise sinótica ainda aponta que os padrões de circulação observados nas camadas médias e altas da troposfera favoreciam a ascensão das massas de ar devido à difluência verificada nestas camadas.

O segundo caso, também observado durante a estação de verão no sudeste brasileiro, ocorreu em 25 de janeiro de 2011. Este caso, assim como o anterior, ocorreu sob padrões atmosféricos pré frontais decorrentes do sistema frontal que atuava sobre a região sul do Brasil. As cartas sinóticas de altitude demonstram a ocorrência de difluência de ar nestas camadas mais altas da troposfera. A temperatura máxima verificada na estação meteorológica do IAG-USP foi de 29,7°C.

O terceiro caso ocorreu em 14 de novembro de 2011, caracterizando-se desta forma, como o único dos três apresentados não pertencente a estação de verão da região avaliada. De acordo com a carta sinótica de superfície este sistema se desenvolveu logo após a passagem de um sistema frontal, diferentemente dos demais casos apresentados. Nos níveis mais altos da troposfera o padrão de escoamento zonal não indicava a ocorrência de difluência de ar nestas camadas. A temperatura máxima observada na estação do IAG-USP foi de 22,2°C.

Com isso, ao observar os resultados obtidos a partir da aplicação do LPI às simulações numéricas destes períodos, tem-se que, este índice foi capaz de reproduzir de maneira bastante similar ao observado as características da atividade elétrica dos casos 1 e 2. De acordo com as características meteorológicas citadas acima, as tempestades elétricas verificadas em ambos os casos se formaram a partir de processos de caráter convectivo em uma atmosfera na qual a estrutura vertical era propícia ao desenvolvimento das mesmas. Por outro lado, o desempenho do LPI quando aplicado à simulação numérica do período no qual o caso 3 foi observado foi bastante inferior ao obtido nos primeiros casos. O que difere este caso dos demais, além da estação do ano na qual o mesmo ocorreu, é a maior estabilidade vertical observada, que pode ser embasada pela consideravelmente menor temperatura máxima de superfície verificada neste dia, associada ao padrão de circulação zonal observado em médios

e altos níveis, que não favorece a ocorrência de ascensão de massas de ar na coluna atmosférica. Ademais, a própria definição de sistema pós-frontal o caracteriza como sendo constituído por uma massa de ar fria, seca e estável, ou seja, uma massa de ar não propícia ao desenvolvimento de grandes tempestades convectivas.

Desta forma, tendo em vista o exposto, vale ressaltar que o LPI é um índice desenvolvido com o objetivo de estimar o potencial elétrico de tempestades de características convectivas, simuladas numericamente através de modelos meteorológicos, uma vez que considera em sua formulação o mecanismo não indutivo de carregamento das nuvens, mecanismo este desenvolvido a partir da teoria convectiva de separação de cargas em tempestades.

Portanto, considerando-se que o mecanismo não indutivo pode não ser o processo predominante na separação de cargas em tempestades que não possuam caráter fortemente convectivo, é razoável esperar que o LPI apresente resultados satisfatórios somente para aquelas tempestades formadas em ambientes caracterizados por uma estrutura vertical da coluna atmosférica que seja propícia à ocorrência de processos convectivos.

Porém, o bom desempenho apresentado pelo LPI, verificado em dois dos três casos descritos, foi obtido quando da aplicação deste índice a simulações numéricas de alta resolução espacial e temporal. Ao reduzir estas resoluções, aumentando o espaçamento entre os pontos de grade e, conseqüentemente, reduzindo a freqüência temporal com a qual as equações do modelo são resolvidas, alterações estas necessárias para tornar possível a simulação de períodos mais longos e de áreas mais extensas, modificações no padrão de desempenho do LPI foram observadas. De acordo com afirmações feitas por Yair et al. (2010), grades que contenham, no mínimo, 3 km x 3 km de espaçamento horizontal não produzem resultados satisfatórios na tarefa de reproduzir os parâmetros convectivos no lugar e tempo corretos, o que conseqüentemente torna grades com esta resolução inadequadas ao objetivo de se obter estimativas da ocorrência de descargas elétricas a partir das mesmas. Além disso, com a redução da resolução espaço-temporal da simulação numérica, fez-se necessário introduzir uma parametrização de cumulus ao conjunto das equações resolvidas pelo modelo, fator este que também influenciou nos resultados obtidos para o índice em análise.

Os resultados apresentados para as simulações numéricas dos meses de janeiro de 2010 e 2011 mostraram que, do ponto de vista qualitativo, estas simulações conseguiram reproduzir os padrões atmosféricos conforme os mesmos foram observados em termos de atividade elétrica. De acordo com os embasamentos teóricos apresentados na seção 2.3 deste trabalho, os quais descrevem os processos que conduzem à separação de cargas e ao carregamento das tempestades, a existência de atividade elétrica em dada tempestade está

associada à existência de hidrometeoros na fase sólida na presença de água superresfriada. Saunders (2008) conclui que os processos considerados como os principais responsáveis pela transferência e separação de cargas dentro das nuvens de tempestades envolvem a colisão entre os espécimes de gelo constituintes da mesma. Portanto, para que a condição de existência de volumes consideráveis de hidrometeoros sólidos ao longo das camadas situadas acima da isoterma de 0°C se estabeleça, é necessário que os movimentos ascendentes na região de desenvolvimento da tempestade sejam intensos. Estas correntes ascendentes intensas, além de manter os hidrometeoros constituintes da nuvem suspensos por mais tempo, proporcionando período mais longo para a interação entre os mesmos, e conseqüentemente, para seu crescimento e troca de cargas elétricas, ainda acarretam maior desenvolvimento vertical e elevam os níveis de supersaturação, propiciando a formação de um número ainda maior de hidrometeoros. Como conseqüência do estabelecimento destes fatores, além de descargas elétricas, a tempestade gera acumulados de precipitação consideráveis em curto espaço de tempo.

Ou seja, uma vez observada a ocorrência de descargas elétricas, a simulação numérica da tempestade das quais originaram estas descargas deverá apresentar volumes representativos de hidrometeoros da fase sólida, mais especificamente graupel e ice, movimentos verticais ascendentes intensos e grandes acumulados de precipitação. Com relação a esta última variável, tendo em vista que os processos de origem convectiva e os de origem microfísica são de igual importância para a formação e desenvolvimento da tempestade e contribuem, ambos, significativamente para a formação dos volumes precipitados a partir da mesma, espera-se que os volumes simulados de precipitação convectiva e não convectiva sejam também significantes.

Portanto, de uma maneira geral, os resultados obtidos mostram que o modelo conseguiu simular corretamente o desenvolvimento de cada uma destas variáveis de acordo com o desenvolvimento apresentado pela atividade elétrica observada, para grande parte dos períodos analisados. Neste estudo, a precipitação convectiva é a variável simulada que melhor se relaciona, em termos qualitativos, com a ocorrência de descargas elétricas. Em praticamente todos os horários nos quais houve registro de atividade elétrica há também volumes representativos de precipitação convectiva simulada. A componente vertical da velocidade do vento também reproduziu satisfatoriamente as variações observadas na série temporal de descargas elétricas, porém com uma taxa de acerto inferior à constatada para a precipitação convectiva. Porém, no caso das razões de mistura de ice, snow e graupel a quantidade de horas nas quais foram registradas ocorrências de descargas elétricas, mas os valores simulados para estas variáveis foram não representativos, é razoavelmente elevada.

Ao avaliar a relação entre os volumes observados de precipitação e de descargas elétricas do tipo nuvem-solo, para diversas regiões sobre o território norte-americano e sobre o Continente Marítimo e norte da Austrália, Pertersen e Rutledge (1998) concluíram haver fortes correlações entre estes conjuntos de dados, e que, no caso das regiões tropicais, estas correlações também são verificadas, apesar de variar de acordo com o regime de chuvas estabelecido para determinada época do ano.

Além disso, as evoluções temporais de algumas variáveis simuladas mostraram haver certa defasagem temporal com relação às descargas elétricas. Os três hidrometeoros da fase sólida avaliados, ice, snow e graupel, apresentaram defasagem com relação à série de descargas. Desta forma, o melhor alinhamento obtido entre as evoluções temporais de ice e snow e o desenvolvimento da atividade elétrica ocorre ao se aplicar uma defasagem de 4 horas entre estas séries. Ou seja, os padrões atmosféricos observados foram simulados com 4 horas de atraso no caso das variáveis ice e snow, no caso da razão de mistura de graupel esta defasagem foi de 6 horas. No caso da precipitação não convectiva, por ser um produto dos volumes simulados para todos os hidrometeoros da nuvem, esta defasagem na série evolutiva também foi observada, caracterizando-se neste caso por 6 horas de atraso. Esta dificuldade apresentada pelo modelo WRF em simular corretamente as tempestades, não somente com relação aos instantes em que as mesmas ocorrem, mas também em termos de localização espacial, foi também observada por McCaul et al. (2008) e Yair et al. (2010), ao sugerirem métodos de estimativa de descargas elétricas a partir de simulações numéricas com este modelo.

Por outro lado, para as variáveis relativas à precipitação convectiva, componente vertical da velocidade do vento e ao LPI estes atrasos não foram verificados, de forma que o melhor alinhamento ocorre ao se considerar zero hora de defasagem entre as séries. Sendo assim, com exceção do LPI, resultante de uma composição dos hidrometeoros avaliados e da velocidade vertical, aquelas variáveis que resultam da parametrização de microfísica levaram, de maneira geral, de 4 a 6 horas para simular os padrões atmosféricos observados em determinado instante, ao passo que as variáveis provenientes da parametrização de convecção conseguiram reproduzir instantaneamente os padrões atmosféricos observados. Tal fato pode estar relacionado à função da parametrização de convecção na simulação e sua interação com a parametrização de microfísica. Uma das funções da parametrização de convecção é distribuir a instabilidade atmosférica entre as diversas camadas verticais do modelo com o objetivo de evitar possíveis instabilidades numéricas decorrentes do acúmulo de energia em cada uma das camadas. Como consequência desta distribuição de instabilidade, a parametrização transforma o vapor d'água supersaturado que resulta do processo de ascensão das massas de ar em gotas

de água de chuva ou de nuvem. Estes dois fatores possuem influência direta na produção de hidrometeoros pela parametrização de microfísica. A distribuição de instabilidade atmosférica reduz a intensidade dos movimentos verticais ascendentes uma vez que a coluna atmosférica torna-se menos instável, e o consumo do vapor d'água para formação de gotas de água e de nuvem reduz a disponibilidade de vapor para a formação dos hidrometeoros da fase sólida. Desta forma, devido à interação com a parametrização de convecção, os processos de origem microfísica levam mais tempo para se desenvolverem por completo, e os volumes simulados para os produtos deste processo são menores quando comparados aos resultados de simulações que não utilizam a parametrização de convecção, conforme verificado nos três estudos de caso discutidos previamente.

Em termos quantitativos, os resultados obtidos a partir das simulações numéricas não possuem praticamente qualquer relação com a quantidade de descargas elétricas detectadas pela RINDAT. As relações de dispersão obtidas entre as variáveis simuladas e o número de descargas elétricas observadas a cada hora claramente expõem a incoerência entre as intensidades verificadas para cada uma destas variáveis. Para todas as variáveis, sem qualquer exceção, para os dois meses de simulação numérica, não foi possível estabelecer uma tendência de comportamento para os valores estimados que diferenciasse os horários de maior e menor atividade elétrica observada. Os horários avaliados foram separados em quatro grupos distintos de acordo com o valor do acumulado elétrico que os representava. Ainda assim, não foi possível obter intervalos dentro dos quais as variáveis de cada grupo se encaixassem, sem que neste mesmo intervalo houvesse uma quantidade considerável de horários pertencentes às outras categorias. Dentre todas as variáveis analisadas, a precipitação convectiva foi a que apresentou resultados mais sensíveis à variação de intensidade das descargas elétricas.

De uma forma geral, a distribuição dos horários ocorre de forma homogênea dentre os valores obtidos para as variáveis simuladas. Ou seja, independentemente da quantidade de descargas elétricas que foram detectadas em determinado horário, a probabilidade de o volume simulado assumir qualquer um dos valores dentro do intervalo de possibilidades, intervalo este delimitado pelo valor máximo e mínimo simulado para aquela variável, é a mesma para qualquer ponto do intervalo. Esta característica foi observada principalmente nas duas categorias de maior acumulado elétrico. Nas duas categorias compostas por horários que registraram acumulados elétricos menores há maior probabilidade dos volumes simulados assumirem valores pertencentes à metade inferior do intervalo de possibilidades.

No caso de algumas variáveis como, por exemplo, as razões de mistura de ice e graupel, as relações de dispersão obtidas demonstram haver maior probabilidade de ocorrência de valores simulados baixos, próximos a zero, independentemente do número de descargas elétricas observados. Portanto, para estas variáveis, a relação de dispersão não ocorre de maneira homogênea, e sim, tendenciosa na direção da extremidade inferior do intervalo de possibilidades para os valores simulados. Apesar disso, uma vez que esta tendência é verificada indiscriminadamente para qualquer horário, independente do seu respectivo acumulado elétrico, também para estas variáveis não foi possível identificar limiares que representassem os quatro grupos de horários estabelecidos sem que houvesse uma grande região de intersecção entre estes limiares.

Ao analisar os resultados obtidos para o mês de janeiro de 2010 a partir da aplicação dos limiares estabelecidos para cada uma das variáveis, nota-se que o percentual de erro obtido em cada um dos quatro grupos de acumulados de descargas elétricas diminui à medida que a intensidade da atividade elétrica característica de cada um deles também diminui. Isso quer dizer que, se classificarmos em ordem crescente as médias dos valores simulados obtidas a partir dos horários pertencentes a cada um destes quatro grupos, os mesmos estarão ordenados também em ordem crescente de intensidade de atividade elétrica. Entretanto, o fator que impossibilita a separação destes grupos em termos de volumes simulados para cada uma das variáveis é o desvio padrão apresentado pelos conjuntos de dados que compõem cada um dos grupos. Devido à distribuição quase que homogênea dos horários ao longo do intervalo de valores simulados para cada uma das variáveis, o desvio padrão característico de cada um dos grupos de acumulados de descargas elétricas é muito grande, o que resulta em regiões muito extensas de intersecção entre os grupos. Este fator impossibilita o estabelecimento de um critério para determinar, a partir dos volumes simulados, a provável intensidade da atividade elétrica observada.

No caso da simulação numérica do mês de janeiro de 2011, mesmo quando da aplicação dos limiares estabelecidos com base no conjunto de horários simulados para janeiro de 2011, não se observou relação entre os percentuais de erro e a intensidade da atividade elétrica característica de cada grupo. Os percentuais de erro encontrados para cada um dos três grupos de maior atividade elétrica são praticamente iguais. Ou seja, não há uma tendência, mesmo que tênue, de aumento dos valores simulados para os grupos que contêm os horários com maior acumulado de descargas elétricas. Desta forma, a relação crescente obtida entre as médias dos valores simulados para a maioria das variáveis analisadas e a atividade elétrica de cada um dos grupos, verificada para as simulações de janeiro de 2010, não foi observada no caso do mesmo mês do ano de 2011.

Portanto, esta dificuldade em obter uma relação coerente entre os volumes simulados e as quantidades de descargas elétricas observadas pela RINDAT para os períodos analisados pode advir de dois aspectos inerentes ao conjunto de dados avaliados. O primeiro aspecto refere-se à qualidade dos dados obtidos a partir das simulações numéricas. Neste sentido, o primeiro questionamento a ser feito trata a respeito de quão próximas estão as características simuladas daquelas efetivamente ocorridas para os períodos avaliados. De uma forma geral, quando realiza simulações numéricas de baixa resolução espacial e temporal, o modelo numérico WRF, assim como os demais modelos meteorológicos utilizados para simular os fenômenos de mesoescala, falha em reproduzir as características dos sistemas precipitantes simulados, tanto em termos de localização espaço-temporal quanto em termos da intensidade dos sistemas (McCaul et al. (2008) e Yair et al. (2010)). As resoluções espaço-temporais utilizadas nas simulações dos meses de janeiro de 2010 e 2011 devido a limitações da capacidade computacional de processamento e armazenamento de dados não são adequadas para resolver devidamente os sistemas meteorológicos estudados. Além disso, o domínio que se tem atualmente a respeito dos detalhes que compõem os processos de formação de nuvens não é completo, principalmente quando se trata dos processos que ocorrem dentro das nuvens de tempestade durante seu processo evolutivo, no que envolve a interação entre os diversos hidrometeoros, a interação entre os ambientes internos e externos à nuvem e a troca de massa e energia entre os mesmos, mas também no que concerne à interação entre estes fenômenos e os fluidos de larga e pequena escala. Desta forma, uma vez que as equações integrantes de um modelo apenas simulam o entendimento teórico que se tem a respeito do fenômeno que se deseja reproduzir, é possível afirmar que a probabilidade de os resultados obtidos a partir destas simulações numéricas não reproduzir satisfatoriamente os processos de desenvolvimento das tempestades é suficientemente significativa para não ser desprezada. Portanto, tendo em vista que os processos que levam ao carregamento elétrico das nuvens de tempestades são inerentes aos processos de crescimento e desenvolvimento das mesmas, é possível afirmar que parte da incoerência encontrada entre as simulações e as observações de descargas elétricas provém da má representação dos processos físicos pelas parametrizações que constituem o conjunto das equações que compõem o modelo, ou seja, é inerente ao próprio processo de simulação numérica. Entretanto, os erros oriundos da má representação dos processos de formação e crescimento dos hidrometeoros pelas parametrizações do modelo não devem ser tão representativos frente a outras fontes de erro, uma vez que as simulações numéricas realizadas para os estudos de caso anteriormente avaliados reproduziram resultados bastante satisfatórios quando comparados às características da atividade elétrica observada pela RINDAT. Desta forma, a redução da resolução espacial e

temporal, aliada à implementação da parametrização de convecção ao conjunto de equações resolvido pelo WRF, constitui-se como a maior responsável pela dificuldade do modelo em representar os componentes atmosféricos responsáveis pela geração das descargas elétricas.

Além disso, outro aspecto importante a respeito dos produtos das simulações aqui analisados é que os dados utilizados para todas as variáveis avaliadas, com exceção dos volumes de precipitação convectiva e não convectiva, correspondem aos valores instantâneos assumidos por estas variáveis durante a simulação numérica. Ou seja, ao se tratar das razões de mistura dos diversos hidrometeoros, por exemplo, os valores horários utilizados nas análises aqui apresentadas correspondem àqueles simulados para o instante inicial das horas a que se referem e não ao acumulado dos 60 minutos que compõem cada hora. Sendo assim, este fato constitui mais um motivo pelo qual os valores simulados não condizem com os acumulados de descargas elétricas observados, pois, conforme dito, os valores apresentados de descargas elétricas referem-se ao total de descargas observadas ao longo de uma hora, ao passo que os valores de razão de mistura das variáveis correspondem aos montantes assumidos pelas variáveis nos instantes iniciais de cada hora ao longo da simulação numérica. Portanto, é bastante provável que, caso os valores utilizados para as razões de mistura dos hidrometeoros correspondessem efetivamente ao acumulado em cada hora de simulação, as relações de dispersão obtidas entre estas variáveis e as descargas elétricas apresentassem resultados diferentes e mais coerentes com a atividade elétrica observada.

O segundo aspecto que, eventualmente, possa ter contribuído para a dificuldade em se encontrar uma relação coerente entre as simulações numéricas e as descargas elétricas observadas provém única e exclusivamente das características dos dados observados. A RINDAT detecta somente as descargas elétricas atmosféricas que atingem o solo, de forma que aquelas que ocorreram entre nuvens diferentes (tipo nuvem-nuvem) ou internamente a uma mesma tempestade (tipo intranuvem) durante os períodos analisados não foram consideradas no conjunto de dados de descargas elétricas utilizado neste trabalho. Entretanto, a grande maioria das descargas elétricas geradas pelas tempestades é do tipo nuvem-nuvem ou intranuvem (RINDAT, 2012), de forma que o conjunto de dados aqui utilizado representa apenas um pequeno percentual das descargas elétricas emitidas pelos sistemas simulados. Porém, ao avaliarmos os resultados das simulações numéricas e os volumes obtidos para cada variável participante no processo de carregamento elétrico das tempestades, estamos analisando o potencial elétrico da tempestade como um todo, e não somente o potencial de geração daquelas descargas elétricas que atingem o solo. Desta forma, ao comparar os resultados das simulações numéricas com os dados da RINDAT estamos comparando todo o processo de carregamento das tempestades com apenas uma parte do produto final

resultante deste processo, parte esta que representa uma pequena parcela do total de descargas elétricas produzidos pelas tempestades. Portanto, a utilização de uma base de dados composta por todos os tipos de descargas elétricas, incluindo as descargas que representam a grande maioria das emissões elétricas das tempestades, ou seja, aquelas que ocorrem intra e entre nuvens, proporcionaria uma avaliação mais consistente dos resultados obtidos a partir das simulações, gerando, possivelmente, relações mais coerentes do que as que foram aqui descritas. Resultados obtidos por outros autores corroboram estas suposições. De acordo com Schultz et al. (2011), os resultados encontrados por muitos dos estudos desenvolvidos com o objetivo de relacionar os totais de descargas do tipo nuvem-solo à ocorrência de fenômenos característicos de tempo severo, como a formação de tornados e rajadas de vento, não apresentaram correlação alguma com os totais observados para este tipo de descarga. Por outro lado, estes mesmos autores concluem que o total de descargas elétricas produzido pelas tempestades e a ocorrência de fenômenos de tempo severo constituem conjuntos de dados altamente correlacionados. Ou seja, uma vez que as simulações numéricas visam reproduzir os padrões gerais de intensidade das tempestades, os padrões delas resultantes se assemelham mais aos totais de descargas elétricas produzidos pelas tempestades do que às pequenas parcelas que atingem o solo.

## 5.0 - Conclusões

O WRF, quando utilizado com o objetivo de produzir simulações numéricas de altas resoluções espaciais e temporais, e abastecido do conjunto de parametrizações adequadas, é capaz de reproduzir satisfatoriamente os processos de formação e crescimento dos componentes atmosféricos de mesoescala responsáveis pela emissão de descargas elétricas.

As estimativas de potencial elétrico obtidas através da aplicação do LPI reproduziram corretamente as características elétricas dos sistemas simulados em dois dos três estudos de caso avaliados. Fatores como distribuição e localização espacial e evolução temporal foram estimados por este índice de maneira similar ao observado, para os dois primeiros casos, os quais ocorreram sob condições favoráveis ao desenvolvimento convectivo. Porém, quando desenvolvidos sob condições menos propícias à convecção, os processos de formação das descargas elétricas não são bem reproduzidos pelo LPI. A partir disto conclui-se que este índice constitui uma ferramenta útil na tarefa de estimar o potencial para ocorrência de descargas elétricas a partir de simulações numéricas com o modelo WRF, desde que tais simulações sejam realizadas com alta resolução espacial e temporal e as parametrizações utilizadas sejam aquelas apresentadas na tabela 3.1, com exceção da parametrização convectiva, a qual deve estar desativada, e ainda com a condição de que a região e o período simulados apresentem condições propícias ao desenvolvimento convectivo de tempestades.

Os resultados obtidos a partir das simulações numéricas dos meses de janeiro de 2010 e de 2011 foram bastante distintos daqueles obtidos para os estudos de caso em termos de volumes obtidos para o LPI, e conseqüentemente, para as razões de mistura de ice, snow e graupel. Entretanto, com exceção da resolução espaço-temporal aplicada, a única diferença entre as simulações é que aquelas realizadas para os três estudos de caso citados anteriormente não utilizavam a parametrização de cumulus. Portanto, uma vez que os volumes obtidos para cada um dos hidrometeoros avaliados nas simulações dos meses de janeiro de 2010 e de 2011 foram notavelmente inferiores àqueles obtidos nas simulações que não utilizaram a parametrização de cumulus, conclui-se que a aplicação deste tipo de parametrização gerou conseqüências diretas nos processos reproduzidos pela parametrização de microfísica, causando redução na eficiência em produzir os hidrometeoros avaliados. Entretanto, tendo em vista que estes hidrometeoros estão diretamente relacionados aos mecanismos de carregamento das nuvens de tempestade, conclui-se que a utilização da parametrização de cumulus reduz também a eficiência do LPI em estimar o potencial elétrico das tempestades simuladas.

A interação entre as parametrizações convectiva e de microfísica gera defasagens temporais nas variáveis que dependem exclusivamente da parametrização de microfísica para

serem produzidas, como é o caso das razões de mistura de ice, snow e graupel, que apresentam atrasos de, em média, 4 a 6 horas com relação à ocorrência de descargas elétricas.

Apesar disso, os resultados obtidos para as simulações numéricas dos meses de janeiro de 2010 e janeiro de 2011 mostram que em termos qualitativos o modelo foi capaz de reproduzir a formação dos componentes atmosféricos responsáveis pela separação de cargas e carregamento das nuvens de tempestades. Dentre o conjunto das variáveis avaliadas, constituído pelas razões de mistura de ice, snow e graupel, pela componente vertical da velocidade do vento, pelas partes convectiva e não convectiva da precipitação e finalmente, pelo LPI, a variável que melhor sinalizou a existência de potencial para ocorrência de descargas elétricas foi a precipitação convectiva. Portanto, em termos qualitativos, as análises apresentadas permitiram concluir que a variável mais indicada para estimar a ocorrência de descargas elétricas nos meses avaliados é a precipitação convectiva.

Em termos quantitativos não foi possível relacionar as variáveis simuladas pelo modelo WRF com os totais de descargas elétricas detectadas pela RINDAT para as simulações de menor resolução espaço-temporal. Duas razões principais podem ser destacadas para justificar tal fato. O primeiro motivo advém do fato de que a comparação é feita entre conjuntos de dados de características distintas em termos temporais. Os valores apresentados para as descargas elétricas representam o acumulado desta variável ao longo dos 60 minutos que compõem cada hora, ao passo que os valores apresentados para as variáveis simuladas, com exceção da precipitação convectiva e da precipitação não convectiva, representam apenas os montantes assumidos pelas variáveis no instante inicial de cada hora. O segundo motivo provém do fato de que o conjunto de dados de descargas elétricas utilizados como base de comparação é constituído apenas pelas descargas elétricas do tipo nuvem-solo, as quais representam apenas uma pequena parcela das descargas elétricas produzidas pelo potencial elétrico contido em cada tempestade.

Os resultados obtidos a partir das simulações de diferentes resoluções espaço-temporais permitem também concluir que houve impacto da resolução utilizada sobre a eficiência do modelo em reproduzir, de acordo com os padrões estabelecidos pelo conjunto de descargas elétricas da RINDAT, os componentes responsáveis pela eletrificação das tempestades, como por exemplo, a intensidade da componente vertical do vento e os volumes dos hidrometeoros avaliados, de forma que a eficiência de estimativa do potencial elétrico das tempestades foi menor para os períodos simulados através de grades de menor resolução espaço-temporal. Entretanto, ressalta-se aqui, que as resoluções espaço-temporais aplicadas às simulações, além do período avaliado, não representam as únicas diferenças entre as

mesmas, uma vez que a parametrização de convecção foi utilizada somente nas simulações realizadas com menor resolução-espaco temporal.

Finalmente conclui-se que, caso as análises tivessem sido conduzidas de forma a considerar efetivamente, para as variáveis simuladas, o total acumulado em cada hora e ainda que, se a base de dados de comparação fosse constituída por todos os tipos de descargas elétricas produzidas pelas tempestades e não somente por aquelas que atingem o solo, as quais representam apenas uma parcela do potencial elétrico das referidas tempestades, os resultados obtidos seriam, possivelmente, mais coerentes e contribuiriam de maneira mais determinante na tarefa de construir um método eficiente de estimativa de descargas elétricas baseado em simulações numéricas com modelos meteorológicos e que possa também ser utilizado em simulações climatológicas.

## **6.0 – Sugestões para Trabalhos Futuros**

Os questionamentos, discussões e conclusões obtidos no decorrer deste trabalho levam às seguintes sugestões de trabalhos futuros:

1. Normalizar os valores de cada uma das variáveis simuladas de acordo com a área de abrangência destes valores. Em outras palavras, considerar nas análises temporais a razão entre os valores simulados das variáveis (observados, no caso das descargas elétricas) e a quantidade de pontos de grade que estes valores representam na região avaliada.

2. Realização de simulações numéricas similares às realizadas para os meses de janeiro de 2010 e 2011, porém sem a aplicação de parametrização de convecção, permitindo isolar o impacto da redução da resolução espaço-temporal daquele proveniente da utilização desta parametrização na eficiência de estimativa de descargas elétricas através de simulações numéricas.

3. Utilizar os acumulados horários dos hidrometeoros simulados na comparação com os dados de descargas elétricas observados.

4. Utilização de uma base de dados composta pelo total de descargas elétricas produzidas pelas tempestades na comparação dos resultados obtidos a partir dos modelos numéricos de simulação atmosférica.

## 7.0 - Referências

- BAKER, B.; BAKER M. B.; JAYARATNE E. R.; LATHAM J.; SAUNDERS, C. P. R. The influence of diffusional growth rates on the charge transfer accompanying rebounding collisions between ice crystals and soft hailstones, Q.J.R. Meteorol. Soc., v.113, p. 1.193-1.215, 1987.
- BORGES, A. S.; PEREIRA FILHO, A. J. Análise das condições meteorológicas de superfície antecedentes à precipitação de origem convectiva na cidade de São Paulo. XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2000.
- CECIL, D. J.; GOODMAN, S. J.; BOCCIPPIO, D. J.; ZIPSER, E. J.; NESBITT, S. W. Three years of TRMM precipitation features. Part I: Radar, Radiometric, and Lightning Characteristics. Monthly Weather Review, v.133, p. 543-566, 2005.
- CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS – CPTEC. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Cartas Sinóticas Isobáricas. Disponível em: <<http://img0.cptec.inpe.br/~rgptimg/Produtos-Pagina/Carta-Sinotica/Analise>>. Acesso em: 08 Ago. 2013.
- DASH, J. G.; MASON, B. L.; WETTLAUFER, J. S. Theory of charge and mass transfer in ice-ice collisions. Journal of Geophysical Research, v. 106, p. 20.395–20.402, 2001.
- DYE, J. E.; JONES, J. J.; WINN, W. P.; CERNI, T. A.; GATDINER, B.; LAMB, D.; PITTER, R. L.; HALLETT, J.; SAUNDERS, C. P. R.. Early electrification and precipitation development in a small isolated Montana cumulonimbus. Journal of Geophysical Research, v. 91, p. 1.231–1.247, 1986.
- DOSWELL, C. A. Severe Convective Storms – An overview. Meteorological Monographs - American Meteorological Society, v 28, p. 1-26, 2001.
- GRUPO DE ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA - ELAT. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. Disponível em <<http://www.inpe.br/weblat/homepage>>. Acesso em 01 fev. 2012.
- GUREVICH, A. V.; ZYBIN, K. P. Runaway Breakdown and the Mysteries of Lightning. American Institute of Physics, p.37-43, 2005.

- JAYARATNE, E. R.; SAUNDERS, C. P. R.; HALLETT, J. Laboratory studies of the charging of soft-hail during ice crystals interactions. *Quart. J. R. Met. Soc.*, v. 109, p. 609-630, 1983.
- KAIN, J. S. The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *Journal of Applied Meteorology*, v. 43, p. 170-181, 2004.
- LYNN, B. H.; YAIR, Y. Lightning power index: A new tool for predicting the lightning density and the potential for extreme rainfall. *Geophysical Research Abstr.*, 10, Abstract EGU2008-A-01571, 2008.
- MCCAUL, E. W.; GOODMAN, S. J.; LACASSE, K. M.; CECIL, D. J. Forecasting Lightning Threat Using Cloud Resolving Model Simulations. *Weather Forecast*, v. 24, p. 709-729, 2008.
- NACCARATO, K.P.; PINTO JR., O.; PINTO, I.R.C.A. A detection efficiency model for the Brazilian Lightning Detection Network. *Proceedings of the 19th International Lightning Detection Conference*, Tucson, 2006.
- PETERSEN, W. A.; RUTLEDGE, S. A. Regional variability in tropical convection: observations from TRMM. *Journal of Climate*, v. 14, p. 3.566-3.586, 2001.
- PETERSEN, W. A.; RUTLEDGE, S. A. On the relationship between cloud-to-ground lightning and convective rainfall. *Journal of Atmospheric Research*, v.103, p. 14.025-14.040, 1998.
- PINTO, I.R.C.A.; CARDOSO, I.; PINTO JR., O.; GEIER, N. Lightning fatalities in Brazil in the last decade. *21st International Lightning Detection Conference (ILDC) & 3rd International Lightning Meteorology Conference (ILMC)*, Orlando, USA, 2010.
- PINTO JR., O.; NACCARATO, K. P.; SABA, M. M. F.; PINTO, I. R. C. A.; ABDO, R. F.; GARCIA, M.; CAZETTA FILHO, A. Recent upgrades to the brazilian integrated lightning detection network. *Proceedings of the 19th International Lightning Detection Conference*, Tucson, 2006.
- RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. *Lightning: Physics and Effects*. Cambridge University Press, 2003.
- REDE INTEGRADA NACIONAL DE DETECÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS - RINDAT. Disponível em <<http://www.rindat.com.br>>. Último acesso em 02/03/2012.
- ROGERS, R. R.; YAU, M. K. *A Short Course in Cloud Physics*. Ed. 3, 1996.

- SAUNDERS, C. Charge Separation Mechanism in Clouds. *Space Science Reviews*, v. 137, p. 335-353, 2008.
- SCHULTZ, C. J.; W. A. PETERSEN; L. D. CAREY. Lightning and severe weather: A comparison between total and cloud-to-ground lightning trends. *Weather Forecasting*, v. 26, p. 744-755, 2011.
- SFERICS TIMING AND RANGING NETWORK – STARNET. Disponível em: <<http://www.zeus.iag.usp.br>>. Acesso em: 12 mai. 2012.
- SIINGH, D.; GOPALAKRISHNAN, R. P.; SINGH, R. P.; KAMRA, A. K.; SINGH, S.; PANT, V.; SINGH, R.; SINGH, A. K. The atmospheric global electric circuit: an overview. *Atmospheric Research*, v. 84, p. 91–110, 2007
- SKAMAROCK, W. C.; KLEMP, J. B.; DUDHIA, J.; GILL, D. O.; BAKER, D. M.; DUDA, M. G.; HUANG, X.; WANG, W.; POWERS, J. G. A description of the Advanced Research WRF version 3. Colorado: MMD-NCAR, 2008. 125 p. NCAR Technical Note, NCAR/TN-475+STR.
- STOLZENBURG, M.; RUST, W. D.; MARSHALL, T. C. Electrical structure in thunderstorms convective regions 3. synthesis. *Journal of Geophysical Research*, v. 103, p. 14.097–14.108, 1998.
- THE COMET PROGRAM. Disponível em: < <https://www.meted.ucar.edu/>>. Acesso em 25 set. 2013.
- THOMPSON, G.; RASMUSSEN R. M.; MANNING K. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis. *Mont. Weather Review*, v.132, p. 519–542, 2004.
- WALLACE, John M.; HOBBS, Peter V. *Atmospheric Science: An Introductory Survey*. Ed. 2, 2006.
- WILLIAM, E. R.; Lightning and Climate: A review. *Journal of Atmospheric Research*, v. 76, p. 272-287, 2005.
- YAIR, Y.; LYNN, B.; PRICE, C.; KOTRONI, V.; LAGOUVARDOS, E. M.; MUGNAI, A.; LLASAT, M. D. C. Predicting the potential for lightning activity in Mediterranean storms based on the Weather Research and Forecasting (WRF) model dynamic and microphysical fields. *Journal of Geophysical Research*, v. 115, p. 1-13, 2010.

ZEPKA, G. S. Previsão de Descargas Atmosféricas Usando o Modelo de Mesoescala WRF. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial / Ciências Atmosféricas) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2010.