

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS

Programa de Pós-Graduação em Geografia.

**Tempestades severas na Região Metropolitana de Belo  
Horizonte:  
Estudos de Storm Track em escala regional**

Carlos Wagner Gonçalves Andrade Coelho

**Belo Horizonte  
2011**

CARLOS WAGNER GONÇALVES ANDRADE COELHO

**Tempestades severas na Região Metropolitana de Belo  
Horizonte:  
Estudos de Storm Track em escala regional**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em  
Geografia – Tratamento da Informação Espacial,  
como requisito parcial à Obtenção do Título de  
Doutor.

**Área de Concentração:** Análise Espacial

**Orientador:** PhD. João Francisco de Abreu

**CoOrientador:** Dr. Ruibrán Januário dos Reis

Belo Horizonte  
2011

## FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

C672t Coelho, Carlos Wagner Gonçalves Andrade  
Tempestades severas na Região Metropolitana de Belo Horizonte: estudos de Storm Track em escala regional / Carlos Wagner Gonçalves Andrade Coelho. Belo Horizonte, 2011.  
150f.: il.

Orientador: João Francisco de Abreu  
Coorientador: Ruiبران Januário dos Reis  
Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.  
Programa de Pós-Graduação em Tratamento da Informação Espacial.

1. Tempestades - Belo Horizonte (MG). 2. Análise espacial. 3. Sistemas de informação geográfica. I. Abreu, João Francisco de. II. Reis, Ruiبران Hanuário. III. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Tratamento da Informação Espacial. IV. Título.

CDU: 551.577(815.11)

Carlos Wagner Gonçalves Andrade Coelho

# **Tempestades severas na Região Metropolitana de Belo Horizonte: Estudos de Storm Track em escala regional**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia – Tratamento da Informação Espacial, como requisito parcial à obtenção de Título de Doutor.

---

Prof. Phd João Francisco de Abreu – PUC Minas

---

Prof. Dr. Ruibran Januário dos Reis – PUC Minas

---

Profa. Phd. Magda Luzimar de Abreu – IGC UFMG

---

Prof. Dr. Fúlvio Cupollilo IFMG

---

Dr. Daniel Pereira Guimarães – Embrapa

---

Prof. Dr. Luiz Cláudio de Almeida Magalhães Filho– PUC Minas

Belo Horizonte, 25 de outubro de 2011



Dedico este trabalho a meus irmãos por acreditarem em mim, à minha querida mãe Êdala (*in memoriam*) que foi a nascente do meu rio, à meu eterno pai herói Edidácio (*in memoriam*) por me ensinar sobre a beleza das águas, a minha amada esposa Karina e aos meus amados e queridos filhos Matheus e Caio que são o meu oceano, onde cedo ou tarde eu volto.

## **DECLARAÇÃO DE AUTORIA**

Eu, Carlos Wagner Gonçalves Andrade Coelho, declaro que o trabalho intitulado “Tempestades severas na Região Metropolitana de Belo Horizonte: Estudos de Storm Track em escala regional”, apresentado como requisito para a obtenção do título de Doutor em Geografia no Programa de Pós-Graduação em Geografia – Tratamento da Informação Espacial da PUC-Minas é integralmente obra de minha autoria.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço ao Prof. João Francisco de Abreu pela orientação e pelo profissionalismo na elaboração e desenvolvimento desta tese. Agradeço a confiança, além da amizade e da gentileza, sempre que solicitei seu apoio.

Ao meu Coorientador Prof. Ruibrán Januário dos Reis, pela oportunidade, dedicação e puxões de orelha nas horas em que foi preciso. Os caminhos indicados foram responsáveis pelo meu sucesso. Muito obrigado.

À Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), em especial à Gerência de Planejamento Energético – PO/PE e a todos os meus amigos. Especial agradecimento a André Cavallari, Marcelo de Deus Melo (Gerente de Planejamento Energético) e Nelson Benício Marques Araújo (Superintendente de Planejamento e Operação de Geração e Transmissão) pelo incentivo, apoio e cooperação na realização desta tese.

À minha amada esposa Karina Nicoli pelas horas dedicadas às leituras, correções e sugestões para este estudo, e aos meus amáveis filhos, Matheus Coelho e Caio Coelho, pela felicidade que vocês me proporcionam a cada minuto da minha vida.

Aos meus pais (in memoriam), que depositaram em mim suas vidas. Obrigado pai, obrigado mãe. Aos meus segundos pais, Regina e Antônio Inácio. Vocês são muito importantes na minha jornada. A Deus, que permitiu tudo isto.

Ao programa de Geografia Tratamento da Informação Espacial – TIE, a todos os professores, Alexandre Diniz, Oswaldo Amorim, João Francisco, Ruibrán, José Flavio, Leônidas Barroso aos amigos da Secretaria do TIE, Fátima e Délio.

A todos que de alguma forma contribuíram para este trabalho: Magda Luzimar, Alceu Raposo, Julio Giovanni, Fulvio Cupollilo, Cristiane Prudente, Arthur Chaves, Adma Raia, Cesar Junior (a Geografia é o futuro), Mathaus Shall (the information man), Henrique Nunes (the statistical man), APROGEO, Fernanda Wasner e amigos da UNA, Emerson Batista, aos meus queridos alunos da Gestão Ambiental, aos meus irmãos Gyselle, Fred, Edidácio Filho e Isabela, à Cleusinha pelo companheirismo, Marcelinha, Luiza, Joana, Pedrão, Davi, Betinho, a todos os Nicoli, Geraldo Manoel Paixão, e um super agradecimento a Gustavo Enésio Amorim que, em meados de 2002, me auxiliou com muita destreza nos primeiros passos, fora da academia, em Geoprocessamento.

Desculpo-me por deixar escapar algum nome nesta lista. Foram tantas outras pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito obrigado!

## RESUMO

O Censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) de 2010 apresentou números relevantes sobre a população da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH). Os resultados mostraram que 4.882.977 (quatro milhões, oitocentas e oitenta e duas mil e novecentas e setenta e sete) pessoas vivem distribuídas nos 34 municípios que formam a região mais importante do estado de Minas Gerais. Portanto, existe a constante preocupação com as possíveis alterações na atmosfera, causadas pela forte concentração de pessoas, uso cada vez mais intenso de veículos automotores, retirada da vegetação, verticalização das moradias com consequências para a dinâmica dos ventos, desequilíbrio térmico e alterações nos padrões espaciais e temporais das precipitações. Uma das maiores preocupações para uma região com alta concentração de pessoas é o impacto que uma chuva possa causar, sobretudo as chamadas tempestades severas, pois são elas que, apesar de serem fenômenos rápidos, podem ocasionar transtornos dos mais variados. Os eventos mais explosivos frequentemente podem causar danos à sociedade, como perdas humanas e materiais. Ainda há deslizamentos de encostas, quedas de árvores, enchentes, quedas de granizos que provocam perdas significativas. Exemplos de eventos dessa magnitude são cada vez mais frequentes. O monitoramento e o entendimento do deslocamento de uma tempestade se tornam fundamentais para a melhor gestão de um território. O entendimento da geografia das tempestades como suas trajetórias, tempo de duração e distâncias percorridas são importantes para o diagnóstico e o prognóstico de áreas de risco, para o enfrentamento de um evento severo e mesmo para a correta utilização dos serviços disponíveis que eventualmente são impactados por uma forte chuva. Portanto, pretende-se utilizar dados de descargas atmosféricas na determinação de storm track em escala regional na Região Metropolitana de Belo Horizonte, no período de 1989 a 2007. Dessa forma, determinar os principais corredores das tempestades na área de estudo. Utilizaram-se 74 casos de tempestades severas, onde os dados foram tratados com técnicas de GIS, determinando os vetores de deslocamentos das tempestades e toda a sua dinâmica espacial de atuação. Os resultados atingidos demonstraram que a RMBH frequentemente é atingida por fenômenos dessa natureza, com impactos dos mais diversos para a sociedade local. Grande parte dos casos analisados se forma e se dissipa dentro da própria região. A média de deslocamento de uma tempestade na RMBH está de acordo com o que diz a bibliografia sobre as tempestades no mundo, sobretudo na região tropical, sendo 20 km médios de trajetória. Entretanto, algumas linhas de tempestades têm sua gênese e evolução fora da região, percorrendo distâncias superiores a 70 km. Os resultados

também indicam para a contribuição da geografia local na formação, evolução e dissipação de uma tempestade. A topografia contribui fortemente na determinação do comportamento destes fenômenos. Outros fatores como a circulação e a precipitação, além do fenômeno ilha de calor, se associam a essa dinâmica e precisam ter estudos mais aprofundados.

Palavras-chave: Palavras-chave: Análise espacial. Tempestade severa. Storm Track. Sistemas de informações geográficas.

## ABSTRACT

The IBGE (Brazilian Geography and Statistics Institute) census of 2010 presented relevant numbers about the population of the MRBH (Metropolitan Region of Belo Horizonte). The results showed that 4.882.977 (four *million eight hundred and eighty two thousand nine hundred and seventy seven*) people spread over, live in the 34 cities that form the most important region of the state of Minas Gerais. Thus, there is a constant preoccupation with the possible atmosphere changes, caused by the high concentration of people, intense escalating use of motor vehicles, removal of vegetation, vertical residences affecting the wind dynamics, thermal disequilibrium, and spatial and temporal alterations of precipitations. One of the biggest concerns for a region with a high concentration of people is the impact a rainstorm may generate, above all, the so called severe storms, for they are the ones that, despite being of short duration, can cause a variety of disturbances. The most explosive events frequently can cause damage to society such as human and material loss. Still, there are mudslides, trees that fall, flooding, and outbursts of hail that result in significant losses. Examples of events of this magnitude are becoming more and more frequent. The monitoring and understanding of storm movements becomes fundamental for better caring of a territory. The understanding of a storm's geography such as its trajectory, time duration, and the distances covered are important for elaborating a diagnosis and a prognosis of risk areas, in order to face a severe event and even for the correct use of services available that eventually suffer impact resulting from a rainstorm. Thus, the intention is to utilize atmospheric discharge data to determine the storm track in a regional scale in the Metropolitan Region of Belo Horizonte from 1989 to 2007. In this manner, it is possible to determine the main storm paths in the area being studied. GIS techniques were used to analyze the data of 74 cases of severe storms, determining the displacement vectors of these storms and all their spatial dynamics action. The results obtained demonstrated that the MRBH is frequently struck by phenomena of this nature with diverse impacts on local society. Great part of the cases analyzed are formed and dissipate within the region itself. The average rate of a storm displacement in the MRBH is in accordance with the bibliography about storms in the world (20km average in trajectory), especially in tropical regions. However, some types of storms are formed and evolve outside of this region, and cover distances superior to 70km. The results also indicate local geography as a contributor in the formation, evolution, and dissipation of a storm. The topography strongly contributes in determining the behavior of these phenomena. Other

factors such as circulation and precipitation, and the heat island phenomenon, are associated to this dynamics and require further and more thorough investigation.

**Keywords:** Spatial analysis. Severe storm. Storm Track. Geographic information systems.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização da RMBH .....	18
Figura 2 – Mapa Altimétrico da RMBH.....	19
Figura 3 - Distribuição dos tipos de desastres naturais no mundo, período1900-2006.....	24
Figura 4 – Grid utilizado para contagem dos dados por km <sup>2</sup> .....	37
Figura 5 – Entrada de dados para visualização de movimento de descargas atmosféricas .....	39
Figura 6 – Exemplo de deslocamento de uma tempestade indicada pelo vetor de direção.....	40
Figura 7 – Mapa de trajetória de um evento de tempestade na RMBH - Exemplo do dia 20/11/1990.....	42
Figura 8 – Densidade de descargas atmosféricas na RMBH.....	44
Figura 9 – Sobreposição de layers – Correlação espacial entre variáveis .....	45
Figura 10 – Perfil topográfico e perfil de densidade de descargas atmosféricas.....	47
Figura 11 – 1º evento: Dia 02/02/1989, às 22h GMT .....	49
Figura 12 – Circulação dos ventos na formação das nuvens.....	49
Figura 13 – 2º evento: Dia 05/02/1989, às 18h GMT. ....	50
Figura 14 – 3º evento: Dia 10/06/1989, às 18 horas.....	51
Figura 15 – 4º evento: Dia 29/09/1989, à 0 hora GMT.....	52
Figura 16 – 5º evento: Dia 09/10/1989, entre 21 e 22 horas GMT .....	53
Figura 17 – 6º evento: Dia 12/10/1989, à 0 hora GMT.....	54
Figura 18 – 7º evento: Dia 06/11/1989, entre 10 e 11 horas GMT. ....	55
Figura 19 – 8º evento: Dias 15 e 16 de 02/1990, entre 23 e 0 hora GMT.....	56
Figura 20 – 9º evento: Dia 27/02/1990, às 20 horas GMT.....	57
Figura 21 – 10º evento: Dia 27/03/1990, entre 20 e 21 horas GMT .....	58
Figura 22 – 11º evento: Dia 01/05/1990, às 18 horas GMT.....	59
Figura 23 – 12º evento: Dia 11/05/1990, às 23 horas GMT.....	60
Figura 24 – 13º evento: Dia 05/11/1990 às 3 horas GMT.....	61
Figura 25 – 14º evento: Dia 11/11/1990, às 21 horas GMT.....	62
Figura 26 – 15º evento: Dia 20/11/1990, entre 21 e 22 horas GMT .....	63
Figura 27 – 16º evento: Dia 23/01/1991, entre 1 e 3 horas GMT. ....	64
Figura 28 – 17º evento: Dia 25/01/1991, às 14 horas GMT.....	65
Figura 29 – 18º evento: Dia 12/02/1991, às 22 horas GMT.....	66
Figura 30 – 19º evento: Dia 16/02/1991, às 3 horas GMT.....	67
Figura 31 – 20º evento: Dia 24/02/1991, às 19 horas GMT.....	68



Figura 32 – 21º evento: Dia 02/04/1991, às 15 horas GMT.....	69
Figura 33 – 22º evento: Dia 27/04/1991, à 0 hora GMT.....	70
Figura 34 – 23º evento: Dia 27/04/1991, às 16 horas GMT.....	71
Figura 35 – 24º evento: Dia 17/09/1991, às 19 horas GMT.....	72
Figura 36 – 25º evento: Dia 25/09/1991, entre 0 e 1 hora GMT.....	73
Figura 37 – 26º evento: Dia 18/11/1991, entre 1 e 2 horas GMT. ....	74
Figura 38 – 27º evento: Dia 20/11/1991, às 18 horas GMT.....	75
Figura 39 – 28º evento: Dia 27/12/1991, à 0 hora GMT.....	76
Figura 40 – 29º evento: Dia 27/01/1992, às 22 horas GMT.....	77
Figura 41 – 30º evento: Dia 09/04/1992, entre 19 e 20 horas GMT. ....	78
Figura 42 – 31º evento: Dia 16/04/1992, às 2 horas GMT.....	79
Figura 43 – 32º evento: Dia 18/11/1992, entre 22 e 23 horas GMT. ....	80
Figura 44 – 33º evento: Dia 22/03/1993, à 1 hora GMT.....	81
Figura 45 – 34º evento: Dia 01/03/1993, à 0 hora GMT.....	82
Figura 46 – 35º evento: Dia 01/04/1993, às 18 horas GMT.....	83
Figura 47 – 36º evento: Dia 15/04/1993, às 23 horas GMT.....	84
Figura 48 – 37º evento: Dia 16/04/1993, às 2 horas GMT.....	85
Figura 49 – 38º evento: Dia 21/09/1993, às 23 horas GMT.....	86
Figura 50 – 39º evento: Dia 23/09/1993, às 19 horas GMT.....	87
Figura 51 – 40º evento: Dia 09/11/1993, às 20 horas GMT.....	88
Figura 52 – 41º evento: Dias 18 e 19 /11/1993, entre 23 e 0 hora GMT.....	89
Figura 53 – 42º evento: Dia 02/12/1993, às 15 horas GMT.....	90
Figura 54 – 43º evento: Dia 31/12/1993 entre, 2 e 3 horas GMT. ....	91
Figura 55 – 44º evento: Dia 24/03/1994, às 18 horas GMT.....	92
Figura 56 – 45º evento: Dia 03/11/1994, entre 17 e 20 horas GMT. ....	93
Figura 57 – 46º evento: Dia 22/01/1995, às 14 horas GMT.....	94
Figura 58 – 47º evento: Dia 14/03/1995, às 9 horas GMT.....	95
Figura 59 – 48º evento: Dia 03/10/1995, à 0 hora GMT.....	96
Figura 60 – 49º evento: Dia 06/10/1995, entre 17 e 18 horas GMT. ....	97
Figura 61 – 50º evento: Dia 15/10/1995, às 19 horas GMT.....	98
Figura 62 – 51º evento: Dias 15 e 16 10/1995, entre 23 e 0 hora GMT.....	99
Figura 63 – 52º evento: Dia 03/12/1995, às 18 horas GMT.....	100
Figura 64 – 53º evento: Dia 10/02/1996, entre 18 e 21 horas GMT. ....	101
Figura 65 – 54º evento: Dia 25/02/1996, entre 16 e 17 horas GMT. ....	102

Figura 66 – 55° evento: Dia 26/02/1996, às 16 horas GMT.....	103
Figura 67 – 56° evento: Dia 21/03/1996, às 17 horas GMT.....	104
Figura 68 – 57° evento: Dia 23/03/1996, às 20 horas GMT.....	105
Figura 69 – 58° evento: Dia 12/04/1996, às 17 horas GMT.....	106
Figura 70 – 59° evento: Dia 13/01/1998, às 19 horas GMT.....	107
Figura 71 – 60° evento: Dia 15/12/1998, às 15 horas GMT.....	108
Figura 72 – 61° evento: Dia 24/12/1998, entre 22 e 23 horas GMT. ....	109
Figura 73 – 62° evento: Dia 16/02/1999, às 17 horas GMT.....	110
Figura 74 – 63° evento: Dia 06/03/1999, às 19 horas GMT.....	111
Figura 75 – 64° evento: Dia 25/02/2000, às 21 horas GMT.....	112
Figura 76 – 65° evento: Dia 30/01/2002, entre 17 e 18 horas GMT. ....	113
Figura 77 – 66° evento: Dia 07/12/2002, às 20 horas GMT.....	114
Figura 78 – 67° evento: Dia 25/12/2002, entre 18 e 19 horas GMT. ....	115
Figura 79 – 68° evento: Dia 22/12/2003, à 1 hora GMT.....	116
Figura 80 – 69° evento: Dia 01/01/2005, às 22 horas GMT.....	117
Figura 81 – 70° evento: Dia 18/03/2005, às 19 horas GMT.....	118
Figura 82 – 71° evento: Dia 07/09/2005, às 3 horas GMT.....	119
Figura 83 – 72° evento: Dia 29/01/2006, às 2 horas GMT.....	120
Figura 84 – 73° evento: Dia 12/02/2006, às 22 horas GMT.....	121
Figura 85 – 74° evento: Dia 09/11/2007, às 21 horas GMT.....	122
Figura 86 – Mapa com distribuição das trajetórias de 0 a 10 km.....	125
Figura 87 – Mapa com distribuição das trajetórias de 10 a 20 km.....	125
Figura 88 – Mapa com distribuição das trajetórias de 20 a 30 km.....	126
Figura 89 – Mapa com distribuição das trajetórias de 30 a 40 km.....	126
Figura 90 – Mapa com distribuição das trajetórias de 40 a 50 km.....	127
Figura 91 – Mapa com distribuição das trajetórias de 50 a 60 km.....	127
Figura 92 – Mapa com distribuição das trajetórias de 60 a 70 km.....	128
Figura 93 – Mapa com distribuição das trajetórias de 70 a 80 km.....	128
Figura 94 – Mapa com distribuição das trajetórias de 80 a 90 km.....	129
Figura 95 – Mapa com distribuição das trajetórias de 90 a 100 km.....	129
Figura 96 – Mapa com distribuição das trajetórias acima de 100 km. ....	130
Figura 97 - Rosa dos raios na RMBH – Período 1989 – 2007 .....	131
Figura 98 - ireção predominante por quadrante na RMBH.....	132

## **LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1 – Número de eventos no período de 1970 a 2007 no mundo. ....	22
Gráfico 2 – Número de vítimas por desastres no período entre 1970 e 2007. ....	23
Gráfico 3 - Número de raios por hora na RMBH entre 1989 e 2007. ....	38
Gráfico 4 – Clusterização pelo método k-means.....	41
Gráfico 5 - População total por município na RMBH. Fonte IBGE, 2010 .....	46

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Catástrofes no ano de 2007 por região no mundo.....	24
--	----

## **ABREVIATURAS**

CEMIG – Companhia energética de Minas Gerais

GIS – Geographic Information System

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration

RMBH – Região Metropolitana de Belo Horizonte

SIG – Sistema e Informação Geográfica

SLT – Sistema de Localização de Tempestade

TIE – Tratamento da Informação Espacial

TSM – Temperatura de superfície do mar

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>1.1 Formação e desenvolvimento de uma tempestade.....</b>	<b>20</b>
<b>1.2 Objetivos da Tese.....</b>	<b>21</b>
<b>2 AS TEMPESTADES SEVERAS COMO DESASTRES NATURAIS.....</b>	<b>22</b>
<b>3 AS TEMPESTADES E A SOCIEDADE – ESTUDOS DE CASOS .....</b>	<b>27</b>
<b>3.1 Algumas contribuições sobre estudos de tempestades .....</b>	<b>28</b>
<b>3.2 Estudos sobre deslocamentos de tempestades.....</b>	<b>30</b>
<b>4 MÉTODOS E TÉCNICAS .....</b>	<b>34</b>
<b>4.1 O papel do GIS no auxílio à tomada de decisão .....</b>	<b>34</b>
<b>4.2 Sistema de Localização de Tempestades .....</b>	<b>35</b>
<b>4.3 Organização dos dados para geração do mapa de densidade .....</b>	<b>36</b>
<b>4.4 Correlação espacial entre variáveis .....</b>	<b>37</b>
<b>4.5 Definição dos eventos de tempestades severas .....</b>	<b>37</b>
<b>4.6 Mapeamento dos deslocamentos das tempestades.....</b>	<b>38</b>
<b>4.7 Método de clusterização k-means .....</b>	<b>40</b>
<b>5 ANÁLISES DOS RESULTADOS.....</b>	<b>43</b>
<b>5.1 Densidade das descargas atmosféricas na RMBH.....</b>	<b>43</b>
<b>5.2 Storm track na RMBH, uma análise exploratória .....</b>	<b>47</b>
<b>5.3 Eventos de tempestades severas .....</b>	<b>48</b>
<b>6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>123</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>135</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>139</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística de 2010 apresentou números relevantes sobre a população da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH). Os resultados mostraram que 4.882.977 (quatro milhões, oitocentas e oitenta e duas mil e novecentas e setenta e sete) pessoas vivem distribuídas nos 34 municípios que formam a região mais importante do estado de Minas Gerais. A maior concentração dessa população está inserida nas imediações da capital, isso demonstra a força de atração que Belo Horizonte exerce sobre os demais municípios.

Essa atração traz preocupações socioeconômicas e, sobretudo ambientais, já que a concentração de população em um determinado local acaba por exigir muito do ambiente natural face às alterações do uso e ocupação do solo para atendimento às demandas mais variadas desta sociedade. Portanto, existe a constante preocupação, entre outras, com as possíveis alterações na atmosfera causadas pela forte concentração de pessoas, uso cada vez mais intenso de veículo automotores, retirada da vegetação, verticalização das moradias com consequências para a dinâmica dos ventos, desequilíbrio térmico e alterações nos padrões espaciais e temporais das precipitações.

Assis (2010) apresentou evidências sobre a forte relação entre uma cidade e o comportamento de alguns elementos climáticos. O autor relata o sistema do clima urbano de Belo Horizonte sob uma perspectiva têmporo-espacial com incremento, sobretudo, nas condições térmicas da cidade. Uma das maiores preocupações para uma região com alta concentração de pessoas é o impacto que uma chuva possa causar, sobretudo, as chamadas tempestades severas, pois são elas que, apesar de serem fenômenos rápidos, podem ocasionar transtornos dos mais variados.

Os eventos mais explosivos frequentemente causam danos à sociedade, como perdas humanas e materiais, e ainda deslizamentos de encostas, quedas de árvores, enchentes, quedas de granizos que provocam perdas significativas. As descargas atmosféricas, fenômenos que frequentemente vêm acompanhados das tempestades mais fortes, também podem trazer seus impactos como a queima de equipamentos, desligamentos de redes de energia elétrica e comunicação e até a morte de indivíduos. Ainda podem-se analisar esses transtornos sob a ótica econômica.

As tempestades mudam por completo o cotidiano citadino trazendo prejuízos dos mais diversos. Aeroportos são fechados, o trânsito paralisa, comércio e atividades produtivas são

interrompidos, o granizo que vem ocorrendo com maior frequência causa significativas perdas materiais e prejuízos consideráveis ao sistema de Seguros. Exemplos de eventos dessa magnitude são cada vez mais frequentes. Constantemente, na mídia em geral, os impactos dos mais variados são retratados em diversas cidades do mundo.

No Brasil, recentemente, registraram-se tristes episódios de eventos severos com prejuízos materiais e mortes. O caso mais recente foi o desastre ocorrido no estado Fluminense, na região serrana, com uma magnitude há muito tempo não vista no Brasil. Na Região Metropolitana de São Paulo o transtorno causado por chuvas intensas está se tornando parte do cotidiano das pessoas. A cada estação chuvosa, a cidade sofre com as enchentes, deslizamentos de encostas e os mais variados prejuízos para a sociedade.

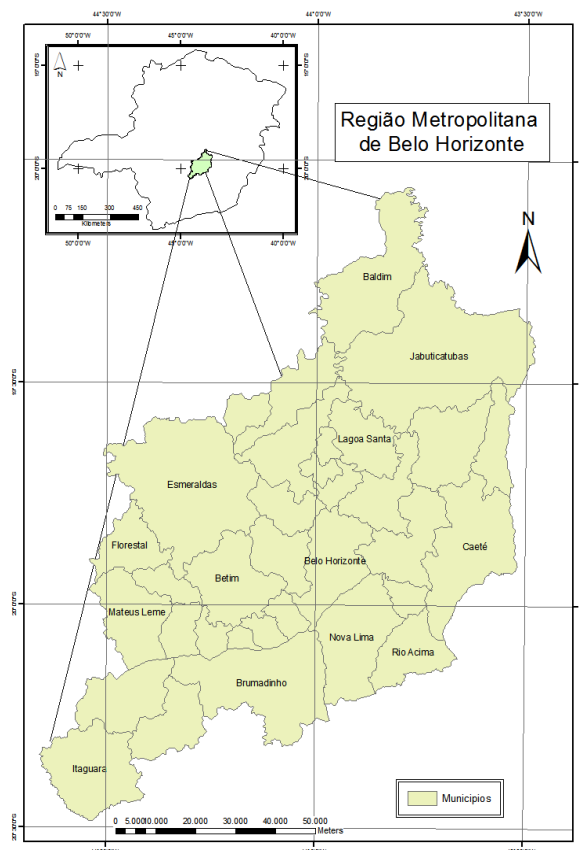
A RMBH também tem observado as chamadas “chubaradas”. Em 31 de dezembro de 2008, a cidade de Belo Horizonte foi atingida por uma forte chuva que causou prejuízos materiais. As águas pluviais suplantaram a capacidade de escoamento e fizeram com que o rio Arrudas saísse de sua calha inundando diversas regiões, além de outros eventos (COELHO; PRUDENTE, 2010). Portanto, o monitoramento das precipitações a cada dia torna-se mais importante para a sociedade, sobretudo a sociedade moderna, pois cada vez mais as atividades humanas dependem e sofrem influências do regime das chuvas.

As tempestades severas têm se tornado uma preocupação eminente para as populações dos centros urbanos, onde as mesmas têm causado diversos transtornos ao cotidiano das pessoas. Sendo assim, uma vez que as tempestades estejam formadas, é necessário prever e monitorar. Esses são os assuntos da previsão do tempo de curto e curtíssimo prazo associados às tempestades (HALLAK, 2007), a formação das chuvas é acompanhada e se torna fundamental monitorar seu deslocamento. Dessa forma, podem-se emitir alertas mais eficazes para as áreas com potencial de serem atingidas, a fim de minimizar os possíveis impactos causados por esses fenômenos meteorológicos.

A RMBH, apresentada na FIG.1, é densamente povoada e de suma importância sócio-econômica para o estado de Minas Gerais e sem dúvida para o Brasil e o mundo, já que nessa região encontra-se o quadrilátero ferrífero, região de exploração de minério de ferro e outros minerais que alimentam o mercado internacional. Do ponto de vista hidrológico, a RMBH está inserida em duas principais bacias hidrográficas, sendo a bacia do rio das Velhas e a bacia do rio Paraopeba. Essa última de importância energética para a concessionária local, já que suas águas contribuem para o rio São Francisco, a montante da usina de Três Marias, ao passo que a outra bacia, a do rio das Velhas, não menos importante, alimenta o São Francisco

a jusante da usina. Portanto, essas duas unidades fisiográficas são de grande importância para a população local, uma vez que existe um processo produtivo muito importante nessa região.

**Figura 1 – Mapa de localização da RMBH**



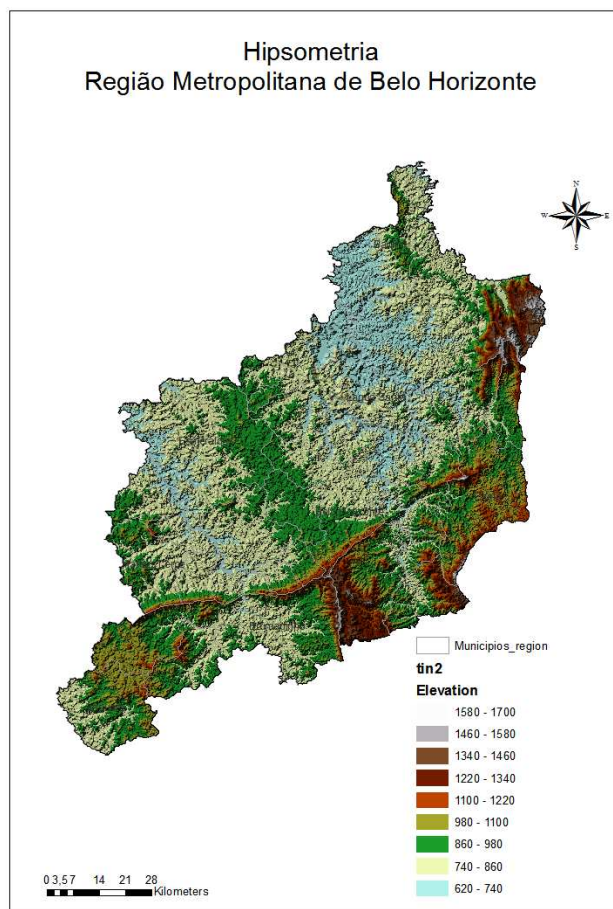
**Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)**

A RMBH tem algumas características ambientais peculiares. Observa-se grande diversidade fisiográfica, além da sua posição geográfica em relação ao estado de Minas Gerais, região central com clima de transição entre o sul e o norte do estado. A topografia muito marcada, com áreas de elevadas altitudes com destaque para as serras do complexo do Espinhaço que cortam a região. (FIG.2).

Fatores como a complexidade do relevo associada à vegetação e fatores como a latitude e a continentalidade interagem com a circulação atmosférica, originando os vários tipos de clima. (MAIA, 1986; PRATES, 1994). Isso vem contribuir com a grande diversificação nos valores da precipitação pluviométrica, conjugada com o fato de a RMBH estar localizada na trajetória normal das frentes polares e o constante equilíbrio dinâmico dos anticiclones do Atlântico Sul (baixa latitude) e do polar (altas latitudes), Nimer (1979) apud Coelho (2006).



**Figura 2 – Mapa Altimétrico da RMBH**



**Fonte: Dados SRTM, desenvolvimento: Coelho C. W. G. A. (2011)**

De acordo com Lucio, Abreu e Toscano (1998), completando e confirmando Nimer (1979), citam que a RMBH, por sua localização geográfica, sofre a influência de fenômenos meteorológicos de latitudes médias e tropicais como a Frente Polar Atlântica (FPA) e o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul atuando no inverno, e a predominância de sistemas convectivos associados ao aquecimento continental e à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) atuando no verão, caracterizando assim as duas estações bem definidas, uma seca (inverno) e outra chuvosa (verão) também descritas e explicadas em Moreira (2002), além de efeitos locais de ilha de calor (MAGALHÃES, 2006).

## 1.1 Formação e desenvolvimento de uma tempestade

De uma forma geral as nuvens se formam a partir da condensação do vapor d'água existente na atmosfera, formando gotículas de água. O processo de formação das nuvens de tempestades na atmosfera depende basicamente de três fatores: a umidade do ar, o grau de instabilidade vertical da atmosfera que está relacionado à variação de temperatura com a altura, e a existência de mecanismos dinâmicos denominados forçantes. A umidade está relacionada à quantidade de vapor d'água existente no ar (2006).

De acordo com Battan, (1961) Riehl (1965) e Ayoade (2003), as nuvens de tempestades se distinguem das demais pelo seu tamanho, pela grande extensão vertical e outros fatores. Nuvens de tempestades podem se apresentar de dois modos: isoladas (tempestades isoladas) ou em grupos (tempestades organizadas). As tempestades organizadas costumam ser mais severas e apresentar chuvas e ventos mais intensos, e também há a ocorrência de granizo.

Tempestades são mais comuns em regiões tropicais e temperadas e durante o verão, embora ocorram em regiões próximas aos pólos e outras estações. As tempestades são mais frequentes durante a tarde (máxima ocorrência entre 16 e 18 horas locais), mas podem ocorrer em todas as horas do dia (VIANELO; ALVES, 1991).

O principal mecanismo para aparecimento das tempestades é o aquecimento diferenciado da superfície terrestre, elas aparecem causadas pela instabilidade da atmosfera. Na atmosfera instável o ar quente sobre a superfície sobe. Esse processo iniciado faz com que o ar aquecido se expanda e comece a condensar, formando assim as trovoadas. Quando a atmosfera está muito instável, o ar passa por resfriamento até seu ponto de orvalho, iniciando a formação das nuvens Cumulus. Os Cumulus continuarão a se desenvolver na vertical até virarem Cumulonimbus podendo chegar a até 13 km ou mais de altura, Bell (1961).

Muitas tempestades são de vida curta e os danos causados são relativos à superfície que elas atingirão. Uma tempestade crescerá mais que a média e se desenvolverá com uma estrutura interna bem diferente. Essas tempestades, conhecidas como tempestades severas, podem crescer até 20 km verticalmente, dependendo da energia disponível e da região de atuação. Elas são frequentemente associadas a relâmpagos, pancadas de chuva e rajadas de vento de 60 km/h médios, granizo e, eventualmente, tornados. As tempestades de modo geral, ocorrem em virtude de um desequilíbrio energético do fluido atmosférico que, segundo Hallak (2007) “o estado básico natural de referência local é o de mínima energia potencial convectiva disponível”.

A duração e dimensão espacial de uma tempestade variam muito de um local para outro, entretanto, é mais comum encontrar fenômenos de curta duração como duas horas e de dimensões com deslocamentos não superiores a 20 km. A observação desses fenômenos pode ser desenvolvida de diversas formas, entre as quais se destacam dados de estações meteorológicas de superfície, imagens de satélite, imagens de Radar, modelos meteorológicos e sistemas detectores de raios denominados Sistema de Localização de Tempestades (SLT), sistema este fonte desta tese.

## **1.2 Objetivos da Tese**

O monitoramento e o entendimento do deslocamento de uma tempestade se tornam fundamentais para a melhor gestão de um território. A utilização desse conhecimento poderá trazer benefícios para uma sociedade. O entendimento da geografia das tempestades como sua trajetória, tempo de duração e distância percorrida é importante para o diagnóstico e o prognóstico de áreas de risco, para o enfrentamento de um evento severo e mesmo para a correta utilização dos serviços disponíveis que eventualmente são impactados por uma forte chuva, como trânsito, telecomunicação, planejamento energético e elétrico de uma concessionária. Desse modo, os objetivos desta tese são:

### **1. Objetivo geral**

Geovisualizar dados de descargas atmosféricas na determinação de storm track em escala regional na Região Metropolitana de Belo Horizonte; período 1989 a 2007.

### **2. Específicos**

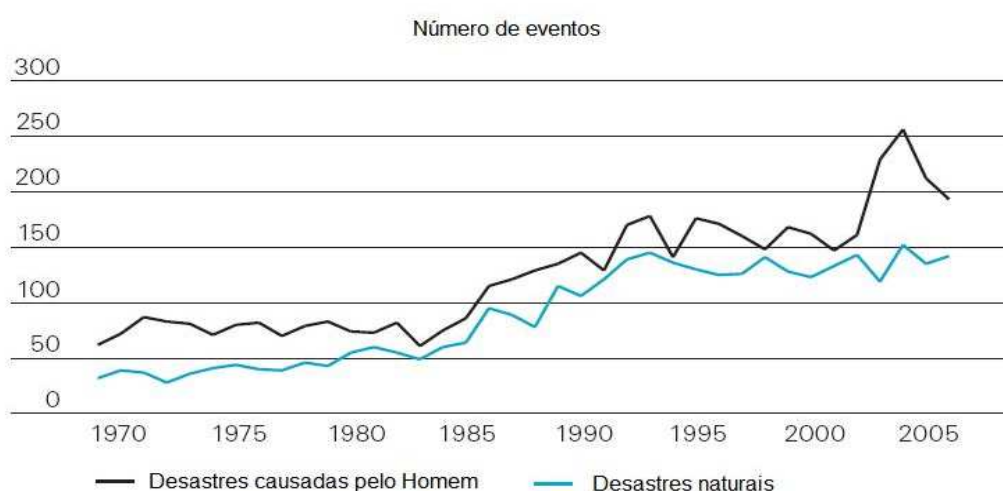
- a) Mapear, em alta resolução, a densidade de descargas atmosféricas na RMBH, período 1989 a 2007;
- b) Correlacionar a topografia como forçante na ocorrência de descargas atmosféricas;
- c) Determinar as principais trajetórias das tempestades na RMBH;
- d) Identificar as principais regiões de atuação das tempestades na RMBH;
- e) Determinar a distância média percorrida pelas tempestades;
- f) Associar o fenômeno ENOS às trajetórias das tempestades.

## 2 AS TEMPESTADES SEVERAS COMO DESASTRES NATURAIS

Os problemas ambientais, sobretudo nas metrópoles, com as complexas relações de seus componentes como o homem, as construções, o solo, a água, a flora e a fauna, exigem uma maior investigação e um maior entendimento por aqueles, ditos especialistas. Para a obtenção de um melhor entendimento de seu comportamento, há a necessidade cada vez mais eminente de uma melhor compreensão, por parte da sociedade, das condicionantes ambientais locais (LOMBARDO, 1985).

A aceleração do processo de urbanização vem causando preocupações em nível local, que na maioria dos casos não foi acompanhada por estudos técnicos que avaliassem as possíveis modificações no meio ambiente citadino, bem como a sua vulnerabilidade frente aos fenômenos de magnitude extrema que de tempos em tempos assolam a superfície terrestre deixando um rastro de destruição por onde passam. Conforme Tominaga (2009), a relação entre o homem e a natureza saiu de uma submissa aceitação fatalista dos fenômenos naturais, ao longo dos tempos, a um domínio da tecnologia equivocado. O homem tem sido surpreendido por fenômenos de ordem natural, tão intensos, que mesmo as sociedades mais bem preparadas têm sofrido com prejuízos de todas as ordens. O GRAF. 1 demonstra o número de eventos em todo o globo de 1970 a 2007. Percebe-se claramente o incremento anual dos desastres naturais e dos provocados pelo próprio homem.

**Gráfico 1 – Número de eventos no período de 1970 a 2007 no mundo.**

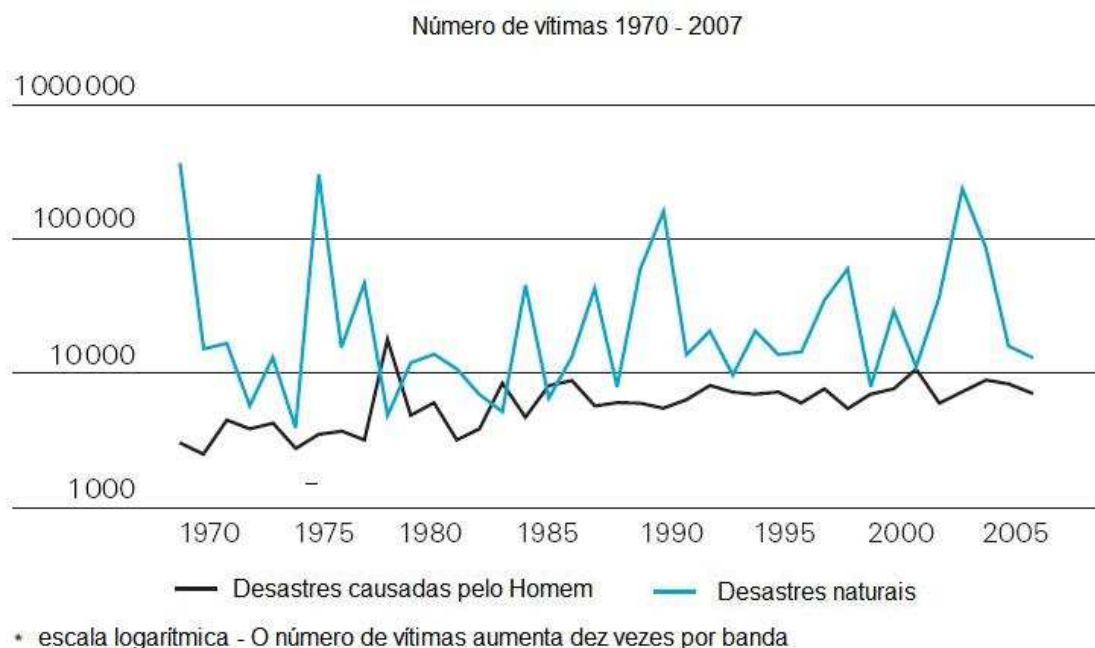


Fonte: Sigma 2008

Os desastres, tanto de ordem natural como os provocados pelo homem, têm se constituído uma rotina na vida das pessoas, sejam os residentes ou não em áreas de risco. Ainda conforme Tominaga (2009), mesmo que o termo desastres naturais nos leve a associá-

lo com os fenômenos de grande escala como terremotos, tsunamis, erupções vulcânicas, ciclones e furacões, o mesmo contempla os fenômenos de escala local tais como deslizamentos, inundações, subsidências, erosão e tempestades severas, esses últimos, as tempestades, têm sido um input fundamental para as ocorrências dos demais citados. Esses fenômenos ainda podem ocorrer tanto naturalmente como induzidos pelo homem. Fenômenos desta natureza têm tido uma recorrência maior nas últimas décadas em todo o globo e seus impactos são cada vez mais intensos, com alta correlação com a maior urbanização. Os prejuízos também têm sido alarmantes tanto economicamente como em perdas humanas (GRAF. 2). Alguns cientistas sugerem que a maior recorrência desses fenômenos seja resultado das mudanças climáticas globais. Entretanto, o fato necessita ser explorado com mais cautela.

**Gráfico 2 – Número de vítimas por desastres no período entre 1970 e 2007.**



Fonte: Sigma 2008

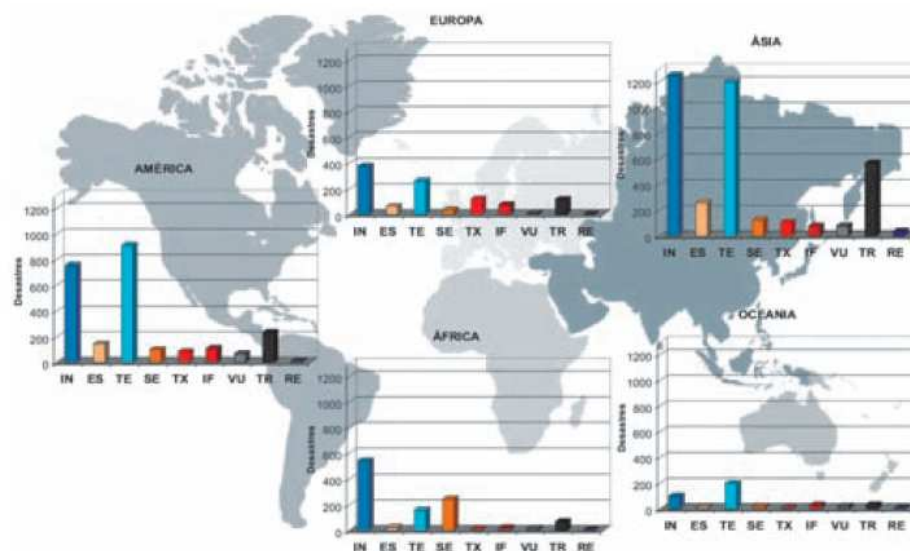
A tabela a seguir relaciona as catástrofes no ano de 2007 por regiões no mundo. Isso enfatiza a distribuição espacial dos fenômenos deixando a entender que, mesmo com todo o aparato tecnológico e econômico de um país, os impactos podem ser danosos em virtude da magnitude do fenômeno para qualquer área do planeta. A vulnerabilidade pode ser potencializada pela falta de preparo de uma sociedade, mas também os impactos podem ser catastróficos devido à ação do desastre natural e as componentes de superfície envolvidas.

**Tabela 1 - Catástrofes no ano de 2007 por região no mundo**

Região	Número	%	Vítimas	%	(USD m)	%
North America	47	14.0	983	4.6	8767	31.8
Europe	35	10.4	1088	5.0	12431	45.1
Asia	146	43.6	13748	63.8	3533	12.8
South America	19	5.7	1216	5.6	228	0.8
Oceania/;Australia	7	2.1	303	1.4	1283	4.7
Africa	32	9.6	2215	10.3	46	0.2
Oceans/Space	49	14.6	2000	9.3	1276	4.6
<b>Total</b>	<b>335</b>	<b>100.0</b>	<b>21553</b>	<b>100.0</b>	<b>27564</b>	<b>100.0</b>

Fonte: Sigma 2008

A FIG. 3 mostra um conjunto de gráficos que também demonstra os tipos de desastres no mundo, porém discretiza-os por eventos. O tipo de evento TE – Tempestade Severa tem significativo número de ocorrências, principalmente no mundo tropical em consonância com os tipos IN - Inundações, ES – Escorregamento e SE – Seca. Com essa análise percebe-se o papel do clima sobre uma determinada sociedade. O clima e o tempo atmosférico, bem como suas variações, exercem grande influência sobre o comportamento de uma sociedade e, o que vai determinar se essa relação é positiva ou negativa é a capacidade da população de enxergar o clima como um recurso e não somente como um inimigo.

**Figura 3 - Distribuição dos tipos de desastres naturais no mundo, período1900-2006.**

Legenda: IN – inundação, ES – escorregamento, TE – tempestades (furacões, tornados e vendavais), SE – secas, TX – temperatura extrema, IF – incêndios florestais; TR – terremoto; VU - vulcanismo; RE - ressaca.

Fonte: MARCELINO, 2007 apud TOMINAGA, 2009

Na Região Metropolitana de Belo Horizonte, área de estudo desta tese, e no Brasil de uma forma geral, apesar de não termos (talvez estejamos livres) os fenômenos considerados como grandes desastres naturais, ou mesmo os chamados de grande porte e magnitude como terremotos e vulcões, os fenômenos relacionados a grandes tempestades são cada vez mais expressivos. Os seus registros estão relacionados diretamente a acidentes ou mesmo a desastres, como os escorregamentos e inundações, acarretando prejuízos e perdas significativas, inclusive de vidas humanas. As tempestades que atingem a região têm se tornado um dos principais fenômenos geoambientais relacionados aos desastres naturais. Além da intensidade dos fenômenos naturais, o processo acelerado da urbanização observado nos últimos anos, sobretudo no Brasil e inclusive na RMBH, levou ao crescimento das cidades, na maioria das vezes em áreas impróprias à ocupação, suplantando a capacidade do uso da terra e aumentando as situações de perigo e de risco para as catástrofes envolvendo o homem.

O entendimento dos processos ambientais pressupõe um destaque aos aspectos climáticos, tanto em relação à predição quanto ao planejamento. Isso porque os aspectos climáticos e sua variabilidade estão diretamente ligados à qualidade de vida. A redução de áreas verdes e o rápido escoamento das águas causados pelas modificações da superfície alteram a infiltração e a evaporação, e consequentemente há uma diminuição do resfriamento do ar junto à superfície. Tais modificações associadas à atividade industrial, ao complexo viário e ao crescimento do número de habitações contribuem para o aumento da energia térmica no núcleo urbano. As áreas urbanas e metropolitanas são as mais atingidas pelas alterações, porque correspondem a segmentos da superfície mais intensamente transformados.

Os eventos de precipitações, sobretudo os chamados de extremos, são os mais temidos e de maior preocupação para uma sociedade, uma vez que esses eventos podem causar transtornos dos mais diversos. Muito se tem discutido sobre a causalidade desses fenômenos, seus impactos, como mitigá-los e sua relação com as possíveis mudanças climáticas que tanto se observa no mundo. Importante entender, primeiramente, o significado de evento extremo, já que o mesmo pode ter causas diferentes e impactos os mais variados, dependendo da vulnerabilidade inserida no ambiente em que ele ocorre.

Para iniciar essa análise foi utilizada a definição do ponto de vista físico, ou seja, sob a ótica do fenômeno em si, baseado nas suas características físicas atmosféricas e nos padrões de tempo e clima do lugar de ocorrência. Segundo o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), no seu 4º relatório de 2007, a definição de um evento extremo é um evento que raramente acontece em um determinado lugar e em determinada época do ano.

E continua,

Por definição, as características do que é chamado de extremo climático podem variar de lugar em sentido absoluto... Quando um padrão de condições meteorológicas extremas persiste por um mesmo tempo, como uma temporada, pode ser classificado como um evento climático extremo, especialmente se produzir uma média ou total que é em si mesmo é extremo. (IPCC, 2004, p. 5).

Para Vianelo e Alves (1991) eventos extremos ou tempestades severas, como eles denominam, são as chamadas chuvaradas locais com intensidade forte, que normalmente vêm acompanhadas de outros elementos que podem intensificar o fenômeno como trovões, raios, granizos, rajadas de ventos, uma súbita variação térmica e, eventualmente, percebe-se a ocorrência de tornados.

Ainda segundo os autores, esses eventos têm curtíssima duração. O ciclo completo pode durar entre uma e duas horas. Ayoade (2003) também classifica as tempestades como ciclos curtos e ainda complementa a descrição deste tipo de fenômeno como sendo altamente localizados, pois seus diâmetros são geralmente inferiores a 25 km.

Esses eventos analisados sob outro ponto de vista podem ganhar em magnitude ou mesmo serem subjugados. A interface que definirá essa força está na relação desses eventos com a sociedade em termos de extensão, e na relação harmônica do homem com as variações do tempo e do clima, ou seja, sua vulnerabilidade ou sua resiliência. “O homem e suas sociedades são vulneráveis às variações climáticas” (AYOADE, 2003). Portanto, sob a ótica social, eventos extremos são aqueles que provocam impactos extremos como mortes, danos materiais, perdas econômicas, deslizamentos de encostas e desabrigados, e essas consequências terão maior ou menor magnitude dependendo da vulnerabilidade ou da resiliência da sociedade em questão. Segundo Castro (1998), apud Tominaga (2009), “A intensidade de um desastre depende da interação entre a magnitude do evento adverso e o grau de vulnerabilidade do sistema receptor afetado”.

A vulnerabilidade é a susceptibilidade de uma população sofrer com os eventos extremos, ao passo que a resiliência se refere à capacidade de uma população em resistir de maneira mais eficaz a esses eventos. A resiliência ainda pode ser maior em virtude de alguns fatores como estoque ou acúmulo de reservas alimentares, tipo de infraestrutura e suprimentos de energia e água, logística nos recursos financeiros, materiais, tecnologia e transporte, uma coesão social e moral e confiança da população nos seus governantes.



### 3 AS TEMPESTADES E A SOCIEDADE – ESTUDOS DE CASOS

Para a caracterização climática de uma região, é necessário o conhecimento do comportamento de grandezas físicas denominadas elementos climáticos. Conforme Pédelaborde (1970) “temps et climat représentent des combinaisons réalisées dans l’atmosphère par certaines valeurs respectives de la température, de l’humidité, de la pression, du vent, de la charge électrique, etc...”. Todas essas variáveis se dão através de levantamento de dados em um período médio de tempo. Portanto, o clima refere-se às características da atmosfera inferida de observações contínuas em um período de tempo longo. Aliados a esses elementos, outros intervêm neste complexo campo, como os fatores climáticos que segundo Marques (1972) “são os agentes, que determinam, em cada ponto, o regime vigente para cada elemento” como altitude, vegetação, massas de ar, continentalidade, etc.

Conforme Coelho (2006), as variações climáticas de uma região para outra, determinadas por combinações ambientais diversas, tanto bióticas como abióticas, produzem uma variedade de tipos climáticos. Para Vianello e Alves (1991) uma determinada região, onde os efeitos combinados de diversos fatores resultam em um conjunto de condições climáticas ditas homogêneas, é denominada região climática.

Segundo Lucio; Abreu e Toscano (1998), estudando séries climatológicas para Belo Horizonte, as condições climáticas de uma região são determinadas por uma série de fatores que atuando de forma combinada irão dotá-la de características peculiares. Torna-se necessário avaliar individualmente esses fatores para que se obtenha uma completa compreensão da dinâmica do clima local da região em estudo. Os autores ainda chamam a atenção para a possibilidade do regime termo-climático de certa região ser afetado por variações atmosféricas remotas, como o fenômeno ENOS, encontradas em Philander (1990), Reis *et al* (1999), Moreira (1999), Elliott (2001) e Minuzzi (2003).

Portanto, o clima ocupa uma posição importante para o amplo campo das ciências ambientais, como afirma Ayoade (2002), “os processos atmosféricos influenciam os processos nas outras partes do ambiente, principalmente na biosfera, hidrosfera e litosfera”. Dessa forma, todas as outras partes do ambiente influenciarão e serão influenciados pelo clima.

### 3.1 Algumas contribuições sobre estudos de tempestades

Diversos estudos vêm sendo desenvolvidos no sentido de melhor compreender o comportamento das chuvas, no tempo e no espaço, em várias regiões do mundo e do Brasil, principalmente nas grandes metrópoles. Os métodos e as técnicas variam com os objetivos propostos, entretanto, muito se tem preocupado com o padrão espacial das precipitações e suas implicações sobre a sociedade, ou seja, muito se tem preocupado com o fator urbano no comportamento das chuvas. Alguns desses estudos serão citados a seguir, procurando explorar e demonstrar exemplos das mais variadas propostas. Algumas delas relacionadas à chuva, ao tempo, outras ao espaço, mas sem perder sua intensidade, causa e efeitos sobre uma superfície.

Oliveira *et al* (1998) em um estudo para São Paulo capital, sobre chuvas intensas, ressalta em seu experimento que as ocorrências das tempestades mais severas têm como preferência os períodos da tarde e início da noite. Esse comportamento, típico de chuvas associadas à forte convecção, deixa clara a influência urbana no que tange à emissão de material particulado, à concentração de energia e, claro que, associado à máxima insolação do dia, já que esses fenômenos necessitam desse tipo de input e sua ocorrência se dá em épocas de maior insolação, sobretudo, primavera e verão, deixando a entender a sazonalidade padrão das ocorrências das chuvas mais fortes. A topografia local e a posição latitudinal também são fatores de forte influência nos tipos de ocorrências meteorológicas. No caso da serra do Mar, a maritimidade, a proximidade do litoral e a atuação dos fenômenos sinóticos de larga escala (NIMER, 1979).

O entendimento do padrão pluviométrico de certa região, seja no tempo, seja no espaço, tanto dos aspectos quantitativos como dos qualitativos como onde, quando, quanto e qual sua trajetória, é importante para planejar a época do plantio e colheita e também para os trabalhos de conservação do solo, estradas, barragens, irrigação e drenagem e, para uma outra atividade que tanto vem preocupando, a emissão de alertas para as populações inseridas nas regiões ditas de riscos (ASSUNÇÃO; SOARES, 2000).

Com base nisso, os autores acima desenvolveram um estudo para a cidade de Toledo, no Paraná. Os resultados apresentados em mapas mensais indicaram uma tendência pluviométrica homogênea para toda a região de ano para ano, mesmo que, durante o período chuvoso exista variação espacial dentro da área municipal com amplitude de até 400 mm. Portanto, fica evidente que o comportamento pluviométrico, apesar de médio, pode variar muito de um ano para o outro.

Nesse estudo destaca-se ainda a utilização de uma rede de 66 estações distribuídas por todo o estado, com informações desde 1975 até o ano de 1995, com os totais mensais de precipitação. Uma rede com densidade média considerada razoável para estudos pluviométricos.

É importante destacar que, mesmo com todas as forçantes locais, sejam a urbanização ou mesmo a topografia, as variabilidades temporal e espacial das chuvas estão de acordo com o desenvolvimento e atuação de mecanismos de macro e mesoescala, demandando um entendimento maior sobre os aspectos sinóticos da região.

Esse entendimento sinótico é percebido em algumas atividades de uma sociedade. Destaca-se aqui o planejamento energético e operacional de uma rede de distribuição da concessionária de energia local, a CEMIG. O conhecimento hidrológico prévio é salutar, entretanto, acompanhar o comportamento pluviométrico para o desenvolvimento das atividades diárias se torna fundamental. A geração de energia necessita confiar nas previsões dos modelos meteorológicos que dão subsídios diários, semanais, mensais e sazonais qualitativos do comportamento pluviométrico de uma região ou bacia hidrográfica de interesse. A mensuração e a correta indicação do desenvolvimento e deslocamento para certo reservatório é insumo primário para a correta operação, possibilitando, assim, otimizar a geração energética bem como o controle de cheias. Para a distribuição de energia, a informação antecipada da ocorrência de uma tempestade, sobretudo, os fenômenos severos, é indicativa de uma melhor adequação do quadro funcional para suportar os danos possíveis com a passagem de uma chuva dessa magnitude. Fenômenos severos acompanhados de raios e ventos causam distúrbios na rede elétrica com desligamentos de diversos alimentadores, excesso de ligações no centro de atendimento ao cliente e, conseqüentemente, uma má imagem da empresa perante seus clientes.

Vale destacar a importância do conhecimento prévio da ocorrência de chuva para as diversas classes de uma sociedade, uma vez que todos são atingidos de alguma forma pelos diversos estragos causados em um dia de chuva forte.

Em um estudo desenvolvido na RMBH para analisar a frequência da distribuição temporal das tempestades, Pinheiro e Naghettini (1998) utilizaram dados de 11 postos pluviográficos para encontrar a definição de curvatura tipo IDF (intensidade, duração e frequência). Os resultados demonstraram a importância da inclusão da precipitação anual na equação do tipo IDF, pois ela sintetiza a influência de dois fatores sobre as intensidades máximas de chuva. Um primeiro fator foi a diferença espacial de umidade, disponível para a gênese e permanência das precipitações intensas, indiretamente quantificadas pela variação

dos totais anuais de chuva na RMBH. Um segundo fator foi inerente ao próprio traçado espacial do mapa de isoietas, que permitiu verificar a influência da topografia local sobre a intensificação dos eventos de precipitação.

Os estudos de Reis *et al* (2004) se deram dentro da capital mineira, com resultados satisfatórios, e pode-se dizer que corroboraram com os resultados de Pinheiro e Naghettini (1998). Os autores analisaram dados pluviométricos de diversas estações espalhados sobre o território da capital mineira, procurando identificar através dos dados coletados as principais áreas de potencial de chuvas intensas. Os resultados mostraram, mais uma vez, que essas áreas, ditas de risco se encontram próximas às encostas da serra do Curral.

Estudos como os de Reis *et al* (2004) e Mellart (1999) apud Bega *et al* (2005) sinalizam a importância de uma rede de pluviômetros mais densa para estudos espaciais das chuvas em um centro urbano, pois aliada a questões da topografia local, dinâmica térmica e variação dos ventos, as variabilidades das chuvas são marcantes, mesmo em pequenas distâncias, como afirma Coelho (2006), que aprofundou os estudos do impacto da ampliação de uma rede pluviométrica sobre a cidade de Belo Horizonte. O autor salienta que há diferenças significativas nos totais pluviométricos em baixas distâncias e que essas diferenças variam de local para local, fenômeno para fenômeno e estação para estação. Entretanto, são mais percebidas diariamente e os totais acumulados tendem a se igualar, principalmente os anuais.

### **3.2 Estudos sobre deslocamentos de tempestades.**

Muito se tem estudado sobre as precipitações no mundo. Seu conhecimento no tempo ou no espaço tem atraído discussões das mais variadas, nas diversas áreas da sociedade. No tópico anterior, procurou-se demonstrar alguns estudos sobre as chuvas em um contexto dinâmico espacial e temporal com interesse no regime mensal e anual, sua magnitude e outros estudos sobre seus impactos na vida humana. Em suma, procurou-se explorar as precipitações no contexto urbano. Neste tópico, as discussões serão sobre alguns estudos desenvolvidos, no Brasil e no mundo, sobre os deslocamentos das tempestades, ou seja, estudos que procuraram entender a dinâmica das trajetórias das tempestades ou mesmo dos sistemas de meso e macroescala de deslocamento de núcleos de sistemas meteorológicos causadores de precipitação. Esse conhecimento se faz importante principalmente quando se tem uma área a monitorar e pretende-se conhecer as principais vias de deslocamentos (entradas e saídas) que

as formações convectivas poderão seguir, a fim de se tomar certos procedimentos em virtude de tais fluxos. Ressalta-se ainda que essa breve discussão está longe de esgotar o assunto, e fortalece a importância do objetivo central desta tese, que é o de se produzir uma climatologia dos deslocamentos de tempestades na Região Metropolitana de Belo Horizonte.

Em se tratando de estudos sobre deslocamentos de tempestades, muito se tem dedicado ao entendimento do chamado storm track. Essa expressão será adaptada a este estudo, pois a maior parte dos estudos que a utilizou abordou análises de macroescala, trabalhando em áreas maiores do que o aqui proposto, uma escala regional. Como o termo storm track, no sentido da expressão, trilha de tempestade ou mesmo trajeto de tempestade, tem o mesmo sentido deste estudo, o de analisar as trajetórias das tempestades na RMBH, definiu-se adaptar o termo para o estudo. Outro fator importante a destacar, os estudos sobre storm track utilizaram outros parâmetros para suas análises.

A proposta aqui é utilizar dados de descargas atmosféricas de um banco de dados com 74 casos de tempestades severas, julgando que as mesmas podem indicar o caminhar do fenômeno. Neste estudo somente as tempestades que registraram mais de 500 ocorrências de raios por hora entraram nas análises. Entretanto, não foram considerados todos os casos que atendiam a esse pré-requisito, e sim os que mais tiveram aderência ao estudo. Ressalva-se que alguns casos com número menor podem ser considerados como tempestade severa, pois existem outros elementos aqui não considerados como precipitação, vento e granizo. Entretanto, foi necessário estabelecer, arbitrariamente uma linha de corte, já mencionada na seção de materiais e métodos.

Os estudos sobre storm track no mundo estão relacionados na maioria dos casos a análises macro, ou seja, a extensas áreas, por vezes a hemisférios inteiros. Os dados para a identificação de tais trajetórias é bem diversificado. Harnik e Chang (2002) utilizaram dados de reanálises de modelos e/ou radiossondagem. Os autores analisaram dados de 1949 a 1999 sobre as variações interanuais de storm track no hemisfério norte. Os dados do modelo NCEP foram comparados com os dados coletados na sonda, a fim de se determinar em que medidas as variações dos storm track na reanálise são reais. Os resultados analisados pelo modelo indicaram que as tempestades se intensificaram durante as décadas de 1960 a 1990, sobretudo nos anos 1970. Os mesmos resultados foram encontrados nos dados da sonda, entretanto, a intensificação foi mais fraca que a encontrada no NCEP. A pesquisa encontrou ainda algumas diferenças nas principais entradas das tempestades, sendo a sondagem com forte tendência ao longo do Canadá, ao passo que, os dados de reanálise com forte influência espacial próximo

ao Japão. O estudo ressalta para a continuidade da pesquisa uma vez que, a falta de dados, sobretudo na radiossondagem, impossibilita de se atingir fortes conclusões.

Orlansk (2003) também trabalhou com saídas de modelo, as reanálises. O autor procurou investigar a influência do aquecimento global sobre a circulação extratropical e sua associação à variabilidade dos storm track. O resultado apresentado reforça a tese da forte associação da variabilidade da circulação geral com o aquecimento tropical, com os efeitos mais presentes nas posições dos jatos polares e equatoriais. Já Bengtsson; Hodges e Erich (2005) procuram avaliar os cenários, sobretudo futuros, dos storm track, desenvolvendo uma comparação com o relatório do IPCC. Os autores não encontraram indicações de tempestades mais intensas no clima futuro e sim uma redução, seja nos trópicos ou latitudes médias. Entretanto, mudanças significativas ocorrem em uma escala regional na localização das tempestades. Há uma clara alteração, segundo os autores, em direção aos pólos. Os autores alertam para essa mudança estar relacionada ao incremento da TSM.

Berbery e Vera (1996) utilizam as informações de ventos, no caso, dados de circulação geral, para analisar a relação entre os storm track e os ciclones e anticiclones. Os resultados aqui apresentados indicam que é possível utilizar série não filtrada de vento meridional para representar as características das ondas sinóticas e compreender as inter-relações entre os fenômenos citados. Maiores informações ainda podem ser encontradas em Hoskins (1990), Trenberth (1991), Rogers (1997), Chang (2000 e 2002) e Hodges et al (2003).

No Brasil, Held & Escobedo (2010) procuraram desenvolver um climatologia para as tempestades na área central do estado de São Paulo, utilizando o software Thunderstorm Identification, Tracking Analysis and Nowcasting (TITAN), desenvolvido no National Center for Atmospheric Research e implementado no IPMET em São Paulo. Com a utilização de dados como volume, área, altura dos topos dos ecos, refletividade máxima e média, bem como velocidade e deslocamento dos sistemas precipitantes, foi possível evidenciar algumas áreas no centro de São Paulo preferenciais de concentração de maior atividade convectiva. Entretanto, vale ressaltar que os autores utilizaram um pequeno período de análise, o verão de 1998-1999 e 1999-2000, o que pode mascarar os resultados, sendo necessário ampliar o horizonte de análise. Porém a metodologia permitiu avaliar de forma segura a proposta inicial do estudo.

Starostin e Kneib (2002) também utilizaram imagens de radar para estudar o deslocamento de 30 casos de tempestades no sul do país. Os autores chegaram a conclusões interessantes como a análise da linha quebrada, ou seja, a tempestade acabar por tomar uma nova direção em função da evolução da mesma. Ainda nesse estudo, os autores analisaram o

tempo médio de deslocamento e a distância percorrida, estando de acordo com o conceito sobre tempestades severas, tempo médio de 2 horas e distância média de 25 km.

Reis (1994), pioneiramente, procurou identificar algumas trajetórias principais para a RMBH daquele ano. Hoje a região analisada é maior, diferente do período analisado pelo autor, totalizando 34 municípios. O autor utilizou dados de raios detectados pelo Sistema de Localização de Tempestade (SLT) para determinar caminhos das tempestades bem como utilizá-los de maneira mais eficiente na previsão de tempo de curto prazo. O estudo baseou-se em uma série de eventos ocorridos na RMBH. Dessa forma as primeiras trajetórias foram determinadas na região, bem como os principais fenômenos que as organizam. Esse estudo tem fundamental importância nesta tese pelo fato da fonte de dados utilizada ser a mesma, as descargas atmosféricas detectadas pelo sistema da CEMIG, e por se tratar da mesma área estudada, apesar do total de municípios envolvidos ser diferente do daquela época.

## **4 MÉTODOS E TÉCNICAS**

O capítulo atual ilustra os procedimentos utilizados na análise espacial para atingir os objetivos propostos, bem como todo o ferramental que possibilitou as análises desta tese. Dessa forma, esse estudo envolveu técnicas de computação e técnicas de análise espacial. O objetivo central da análise espacial é extrair novos resultados de propriedades e relacionamentos pré-existentes entre variáveis, inserindo a essa análise a sua localização, ou seja, a localização espacial do fenômeno em estudo de forma explícita. Portanto, a idéia central é incorporar o espaço à análise que se deseja fazer. Essa compreensão tem sido cada vez mais importante na tentativa de se elucidar algumas questões em diversas áreas de estudos. A análise tem sido cada vez mais comum em razão da disponibilidade de sistemas, como o GIS, de baixo custo e interfaces amigáveis. Mais detalhes podem ser consultados na bibliografia especializada que trata de diversas formas de análise espacial, Castro (2000).

Como software, utilizou-se o Mapinfo para manuseio de banco de dados e visualização das descargas em animação através de um aplicativo MBX, desenvolvido exclusivamente para a tese. O Arc Gis foi utilizado para análise geoestatística, interpolação e criação dos vetores de trajetórias das tempestades. As análises estatísticas de trajetórias das tempestades também foram desenvolvidas no Matlab utilizando o método K-means, que possibilitou cruzar os dados com os deslocamentos desenvolvidos e analisados no Mapinfo. Ainda de verificou qual o fenômeno ENOS (fase positiva, negativa ou normal) no oceano Pacífico, a fim de se averiguar alguma relação entre a atuação do El Niño ou do La Niña com o tipo de deslocamento das tempestades. Utilizou-se o histórico de atuação do ENOS do National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

### **4.1 O papel do GIS no auxílio à tomada de decisão**

O GIS pode ser considerado como um conjunto de técnicas sofisticadas para compreensão do ambiente e para a tomada de decisão. Os formuladores de políticas, planejadores, cientistas e muitos outros profissionais em todo o mundo passaram a confiar no potencial do GIS para gestão de dados e análise científica, Paul e Baty (1996). Usuários diversos formam uma classe com conhecimento, experiência e melhores práticas na aplicação dessa tecnologia fundamental para a gestão das cidades, energia, sustentabilidade, gestão de desastres e ciência do clima. O nome Sistemas de Informações Geográficas ou Geographic



Information System (GIS) é muito utilizado e em muitos casos é confundido com o Geoprocessamento.

O Geoprocessamento é o conceito mais abrangente envolvendo outras áreas afins, enquanto um GIS tem ênfase em análises espaciais e modelagens de superfícies. Existe uma quantidade de definições para GIS e para o Geoprocessamento, cada uma refletindo uma perspectiva sobre sua aplicação, Rapper (1993), Rocha (2000) e Abreu (1995).

Segundo Moura (2003) o termo Geoprocessamento, do sufixo “processamento” vem de processo, em Latim *processus*, “andar avante”, surgido do sentido de processamento de dados georreferenciados, que significa implantar um processo que traga um progresso, um andar avante, na grafia ou na representação da Terra. Segundo Eastman (1997).

Sabe-se que o GIS vem ganhando muito espaço na ciência como uma poderosa ferramenta de análise espacial, proporcionando uma leitura do espaço com mais rigor e melhores resultados. Não seria diferente nos estudos sobre tempestades na RMBH, onde o GIS entra como um poderoso ferramental de análise do espaço.

## 4.2 Sistema de Localização de Tempestades

Os dados de descargas atmosféricas utilizados nesta tese, para produção de mapa de densidade e vetores de deslocamentos de tempestades severas, são provenientes do sistema denominado Sistema de Localização de Tempestades (SLT) implantado pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), no ano de 1988, sendo a primeira empresa na América Latina a instalar um sistema dessa natureza. Entretanto, esse fenômeno já era monitorado antes da instalação dessa rede de detectores, desde a década de 70, com instrumentos chamados de contadores de raios, instalados na rede de transmissão da concessionária.

As estações, espalhadas em superfície, detectam as descargas que ocorrem entre a nuvem e a terra e transmitem as suas informações (data, horário, longitude, latitude) para uma estação central que as repassa em tempo real para os diversos usuários, onde são visualizadas através de terminais de vídeo em mapas (layers) diversos, conforme o interesse. Essas informações são armazenadas em bancos de dados que permitem o desenvolvimento de diversos trabalhos.

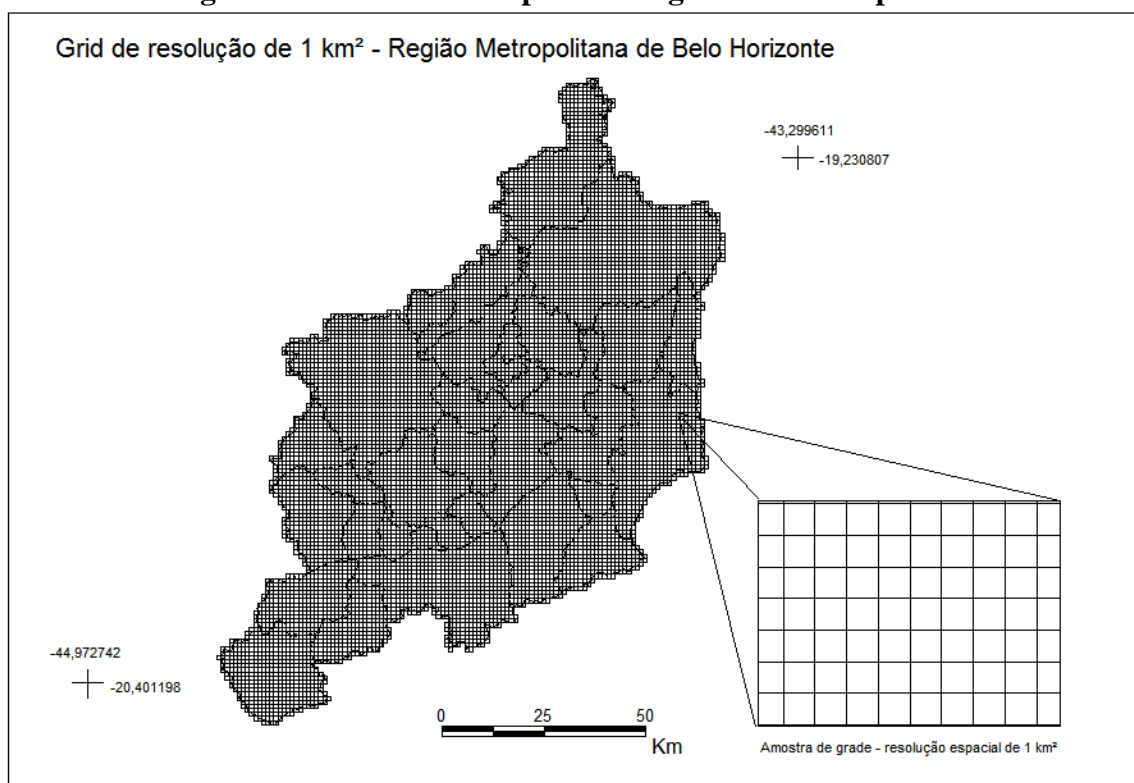
Atualmente a rede está integrada com outras empresas no Brasil, perfazendo um sistema único. Esse convênio permitiu um melhor índice de detecção, maior precisão e confiabilidade na detecção das descargas e também uma maior visualização do sistema,

cobrindo toda a região Sul/Sudeste e Centro Oeste do Brasil. Os dados podem ser acompanhados pela WEB através do site da rede integrada – [www.rindat.com.br](http://www.rindat.com.br). Informações técnicas sobre o sistema como acurácia na detecção, tipo de instrumentação e aplicações podem ser adquiridas em Global Atmospheric, Inc. (1994, 1995, 1997 e 1999); Naccarato (2001 e 2002), Mesquita (2001) e Reis (2006).

#### **4.3 Organização dos dados para geração do mapa de densidade**

Para determinar a densidade média espacial das descargas atmosféricas na RMBH, utilizou-se mais de 700 mil dados de raios coletados pelo SLT entre os anos de 1989 e 2007. Os dados pontuais com informações de longitude e latitude, horário e data de ocorrência, foram mapeados no software Mapinfo de tal forma que permitisse uma visão preliminar. Para a contagem dos dados por km<sup>2</sup> utilizou-se uma metodologia denominada de grid sobre a região de estudo, com dimensões pré-determinadas de 1km<sup>2</sup>. Essa técnica, aqui determinada de Geografia Celular, permitiu contar o número de ocorrências ano a ano dentro de cada célula, representada na FIG. 4, e posterior extração da densidade média dos raios por km<sup>2</sup>. Em seguida extraiu-se o centróide de cada célula, o que permitiu o desenvolvimento de mapa isoplético no Arc Gis. Maiores informações podem ser consultadas nos autores Reis (2005) e Coelho *et al* (2007).

**Figura 4 – Grid utilizado para contagem dos dados por km<sup>2</sup>**



Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

#### 4.4 Correlação espacial entre variáveis

Foram desenvolvidos ainda mapas de altitude, temperatura média anual e precipitação média anual, a fim de se verificar correlações existentes entre esses elementos e fatores climáticos na distribuição espacial das descargas atmosféricas encontradas no mapa de densidade. Todos os mapas foram condicionados em software GIS com utilização de técnicas de interpolação, mais especificamente o IDW conforme sugere Coelho (2006). Ainda no Arc Gis, desenvolveram-se perfis, tanto na altimetria quanto no mapa de densidade, com o intuito de se aprofundar o conhecimento da interação da topografia com a ocorrência de raios.

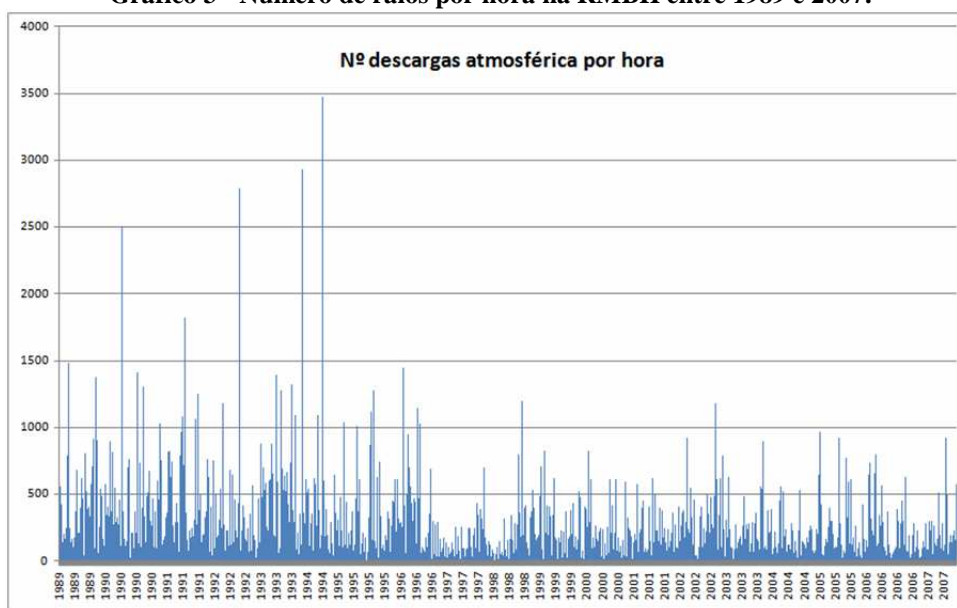
#### 4.5 Definição dos eventos de tempestades severas

A escolha dos eventos considerados como tempestades severas na RMBH seguiu um critério empírico, baseado nas ocorrências de descargas atmosféricas registradas. As perguntas que surgiram no início do trabalho foram: Como trabalhar com todos os eventos? Como definir um evento de chuva como tempestade severa? Nesta tese, como se pretendeu

trabalhar apenas com dados de raios, acredita-se que vários outros eventos devem ter sido suprimido das análises.

Uma chuva considerada como tempestade severa, produz totais de precipitação significativos em pouco tempo de duração, rajadas de ventos, por vezes superiores a 70 km/h, granizos e raios, além do potencial destrutivo inserido em uma determinada sociedade. Na presente tese, optou-se por selecionar, primeiramente, casos acima de 500 raios por hora. Nessa primeira seleção, encontraram-se centenas de casos, GRAF. 3 abaixo. Os cem primeiros casos foram selecionados, tratados, averiguados de sua real ocorrência e verificação de possíveis falhas. Na consistência desenvolvida constatou-se que apenas 74 casos de tempestades eram reais, pois algumas horas sequenciais tratavam da mesma ocorrência de chuva, ou seja, tempestades com duração maior que uma hora. Portanto, optou-se por analisar esses 74 casos de tempestades severas na região baseados apenas nas ocorrências de raios. O fato é que acredita-se que esses raios possibilitaram identificar os chamados storm track.

**Gráfico 3 - Número de raios por hora na RMBH entre 1989 e 2007.**



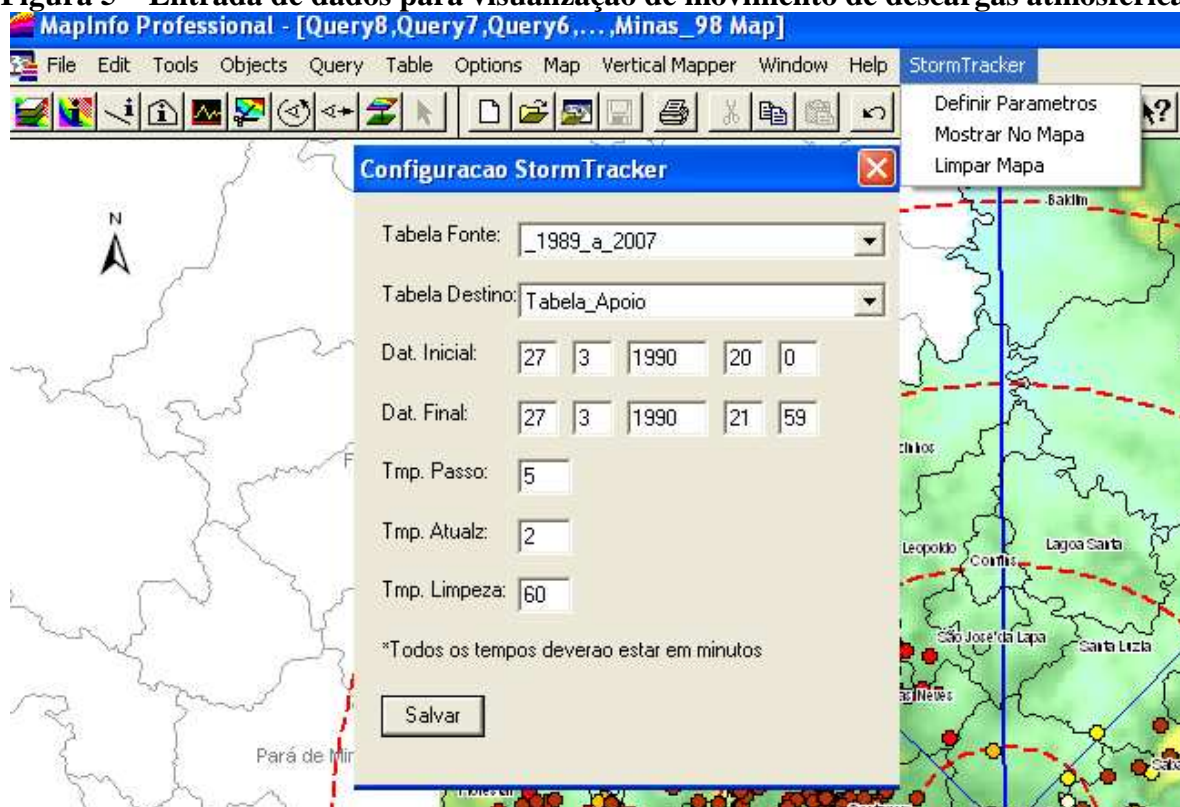
**Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)**

#### **4.6 Mapeamento dos deslocamentos das tempestades**

Para o objetivo central desta tese, de se identificar as trajetórias preferenciais das tempestades juntamente com outras informações do tipo, tempo de duração e distância de deslocamento, foi desenvolvido um aplicativo (script) dentro do Mapinfo que possibilitou automatizar, a partir de definição de parâmetros, o movimento das descargas atmosféricas. Dentro do aplicativo, de forma simples e objetiva, é definido o evento a ser verificado, data de

início e data de fim de uma tempestade, inclusive o horário inicial e final. Define-se de quanto em quanto tempo se deseja plotar as descargas, o tempo de atualização na tela e se deseja limpar a tela. Em seguida pede-se para mostrar no mapa essa visualização, FIG. 5 abaixo. O algoritmo completo se encontra no anexo dessa tese.

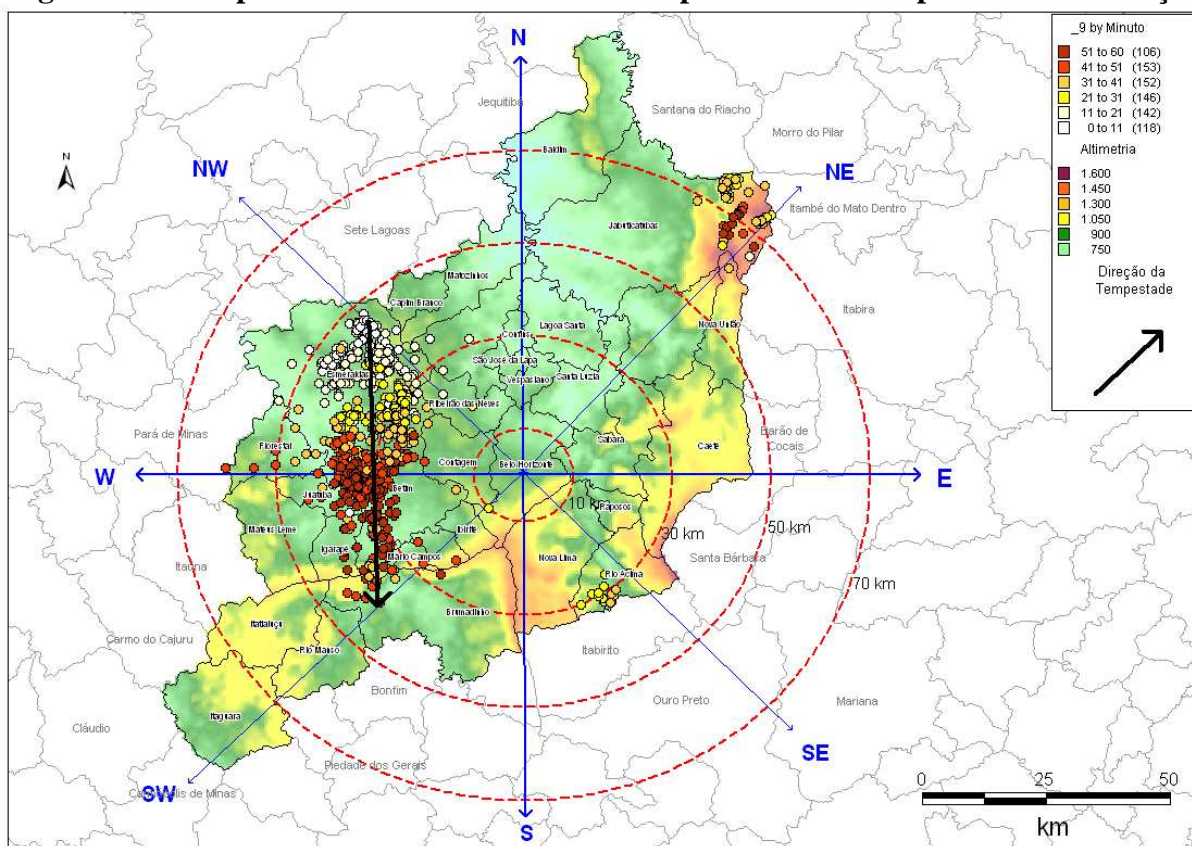
**Figura 5 – Entrada de dados para visualização de movimento de descargas atmosféricas**



Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

Com essa definição dos parâmetros, a visualização das trajetórias dos raios, foi possível desenvolver os vetores demonstrando a orientação das tempestades, sua dimensão espacial e distâncias percorridas. As trajetórias foram vetorizadas de tal forma que permitiu correlacioná-las com a própria tempestade identificada nos conjuntos de raios em mapa temático, definido por tempo de ocorrência de 10 em 10 minutos para as tempestades de uma hora, de 20 em 20 minutos para as tempestades de 2 horas e 30 em 30 minutos para as ocorrências de três ou mais horas de duração. A FIG. 6 abaixo demonstra um evento de uma hora de duração. Percebe-se pelas cores dos raios o início e o fim da tempestade, bem como seu deslocamento na superfície. O vetor foi digitalizado como uma layer separada. Foi sobreposto ao evento juntamente com altimetria da região, de tal forma que possibilitou analisar toda a dinâmica envolvida em um evento meteorológico.

**Figura 6 – Exemplo de deslocamento de uma tempestade indicada pelo vetor de direção**



Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

#### 4.7 Método de clusterização k-means

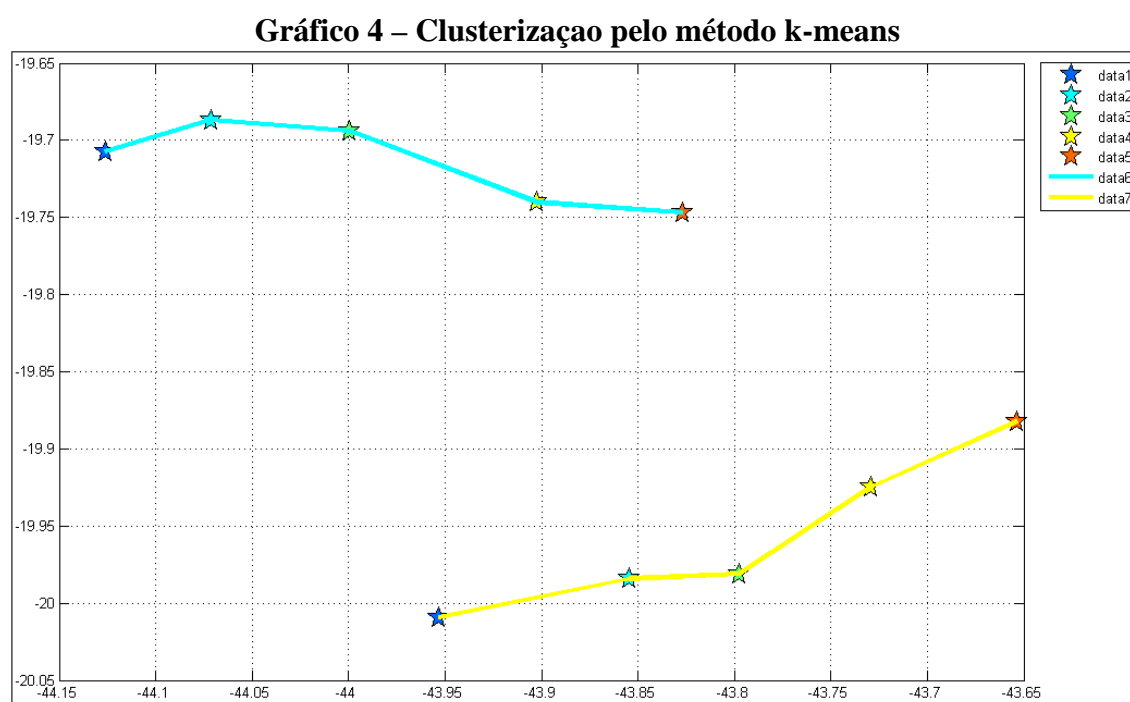
Uma discussão importante sobre métodos na ciência é a real necessidade de se trabalhar com modelos matemáticos complexos ou não, que viabilizem o alcance dos objetivos. Sem dúvida, o velho método empírico serviu de base nessas análises, entretanto, optou-se por utilizar um método de cluster que permitisse identificar os núcleos de descargas atmosféricas e posterior deslocamento. Análise de agrupamentos (cluster analysis) é a expressão utilizada para descrever as técnicas que têm o objetivo central de classificar os valores de uma matriz de dados em grupos discretos. Essa técnica de análise de agrupamentos pode ser utilizada em diversas situações, quando o objetivo é encontrar as similaridades entre indivíduos ou mesmo entre variáveis. Os diversos métodos existentes podem ser mais detalhados em Davis (1986).

A técnica de clusterização, já muito difundida nas ciências de maneira geral, identifica núcleos semelhantes, ou seja, particiona um conjunto de observações em grupos distintos, Romesburg (2004). Essa técnica, aqui aplicada, foi o k-means. K-means é um algoritmo de



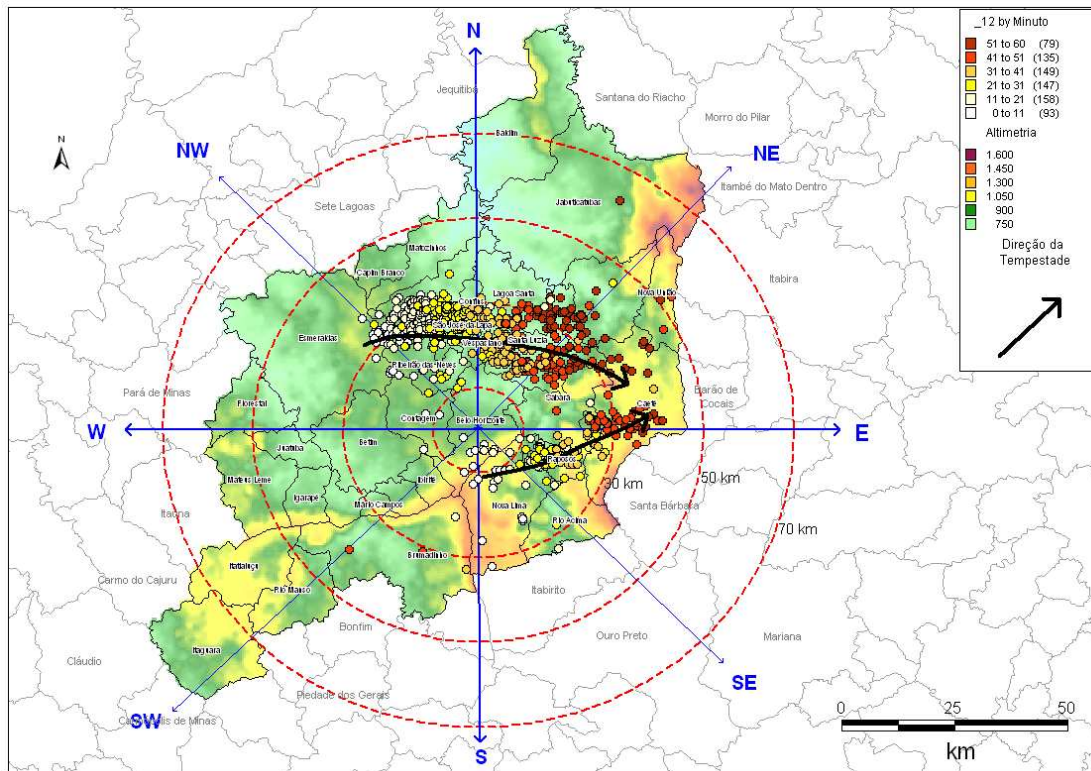
agrupamento que visa particionar o conjunto analisado de pontos de observação com um centro médio e com o poder de posteriormente identificar as trajetórias de um cluster para outro. Esse algoritmo foi implementado no Matlab de tal forma que gerou os aglomerados semelhantes, baseados na posição espacial e na hora de ocorrência com posterior vetor de deslocamento. Os resultados foram utilizados como forma de balizar as análises desenvolvidas no aplicativo do Mapinfo. Ainda sobre os resultados encontrados, alguns casos destoaram da realidade ao passo que a grande maioria aderiu bem às trajetórias encontradas no Mapinfo.

O GRAF. 4 e a FIG. 7 demonstram um exemplo de um evento de tempestade severa correlacionado com os resultados do GIS. Ressalta-se que essas figuras entraram como poder de análise e não foram dispostas nos resultados, e sim somente como métodos. Percebe-se o alinhamento do k-means bem aderente a orientação dos vetores no Mapinfo, demonstrando que o método de clusterização contribuiu para a identificação dos storm track. O algoritmo dessa aplicação se encontra no anexo desta tese



Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

**Figura 7 – Mapa de trajetória de um evento de tempestade na RMBH - Exemplo do dia 20/11/1990**



**Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)**



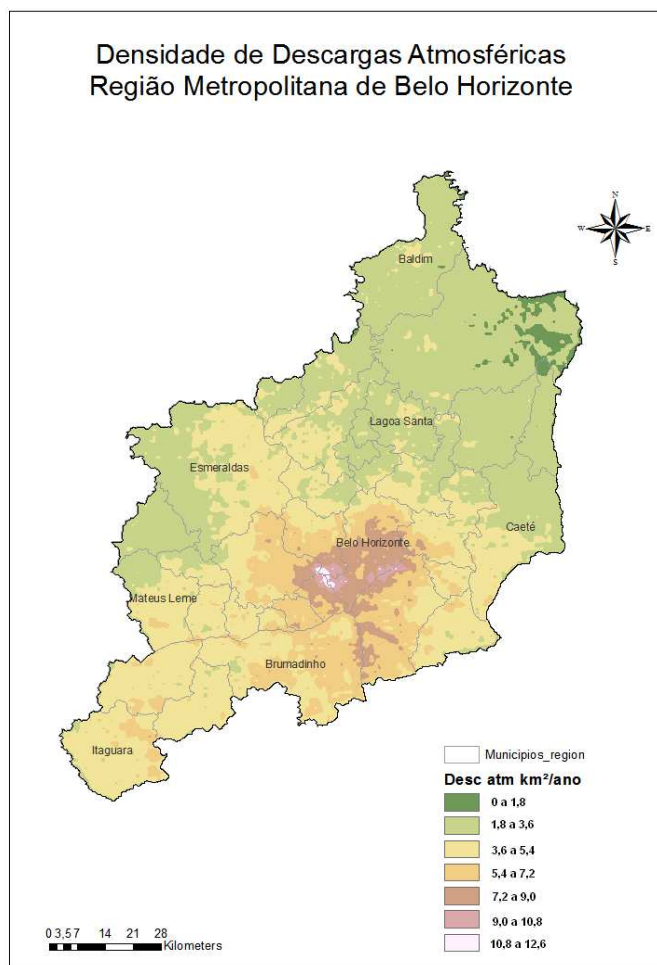
## **5 ANÁLISES DOS RESULTADOS**

As análises desenvolvidas com os dados de descargas atmosféricas, para subsidiar o estudo sobre as tempestades na RMBH, estão descritas nesse capítulo. Os eventos estudados apresentam diferentes escalas espaço-temporais e estão associados a diferentes fenômenos meteorológicos como frentes frias, formações convectivas e linhas de instabilidades. Todos os eventos ainda se inter-relacionam fortemente com a circulação e a precipitação da região de análise. Entretanto, vale ressaltar que o objetivo central desta tese é analisar as trajetórias das tempestades através das descargas atmosféricas detectadas pelo Sistema de Localização de Tempestades (SLT). Aspectos como fatores climáticos, elementos climáticos, fenômenos meteorológicos de escala local, regional e sinótica fizeram parte das análises, entretanto, essa correlação deverá ser aprofundada em estudos futuros.

### **5.1 Densidade das descargas atmosféricas na RMBH**

Para um melhor entendimento do comportamento das tempestades na RMBH, no que tange à discussão sobre suas características de trajetórias, principais vias de deslocamentos, tempo de duração, direção e distância percorrida, desenvolveu-se primeiramente a distribuição espacial média dos raios ocorridos entre os anos de 1989 e 2007. Através da compilação de mais de 700 mil raios foi possível desenvolver uma densidade das descargas atmosféricas na RMBH, FIG. 8, que permitiu relacionar a sua distribuição média espacial com outros fatores e elementos climáticos potencialmente influenciadores no surgimento ou não dos raios. Essa primeira intervenção se justifica pelo fato de serem elas, as descargas atmosféricas, o insumo para a análise climatológica dos storm track na área de estudo.

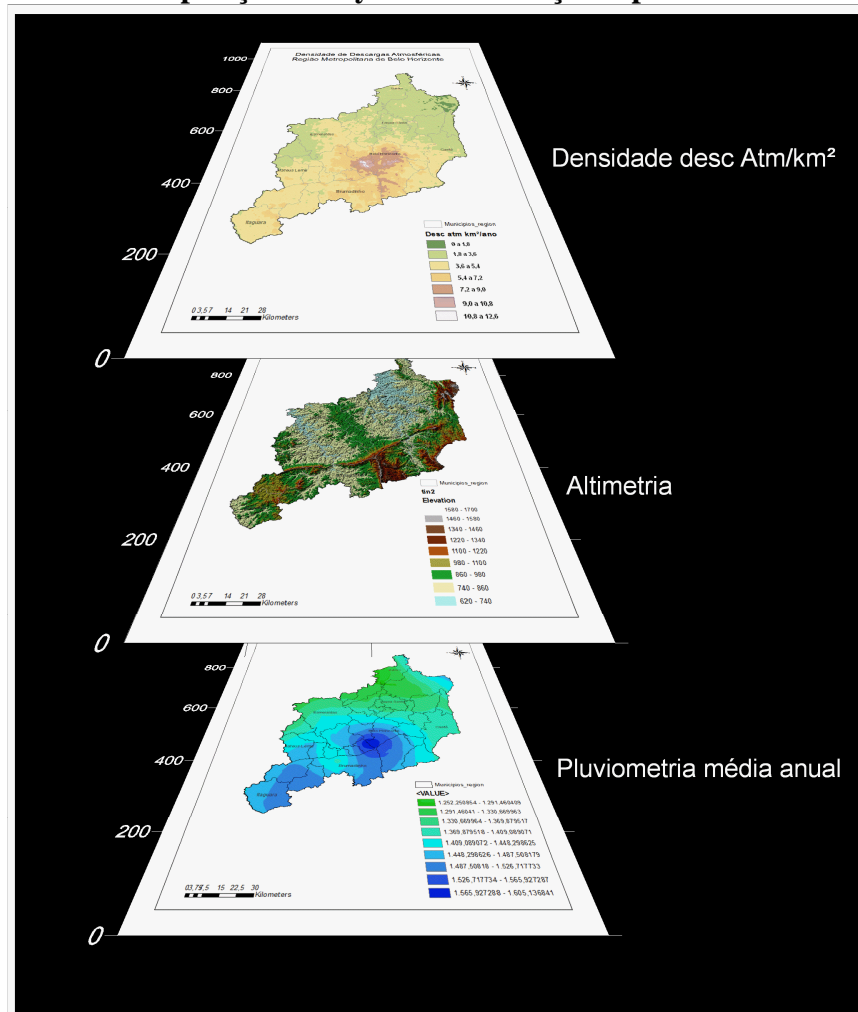
**Figura 8 – Densidade de descargas atmosféricas na RMBH**



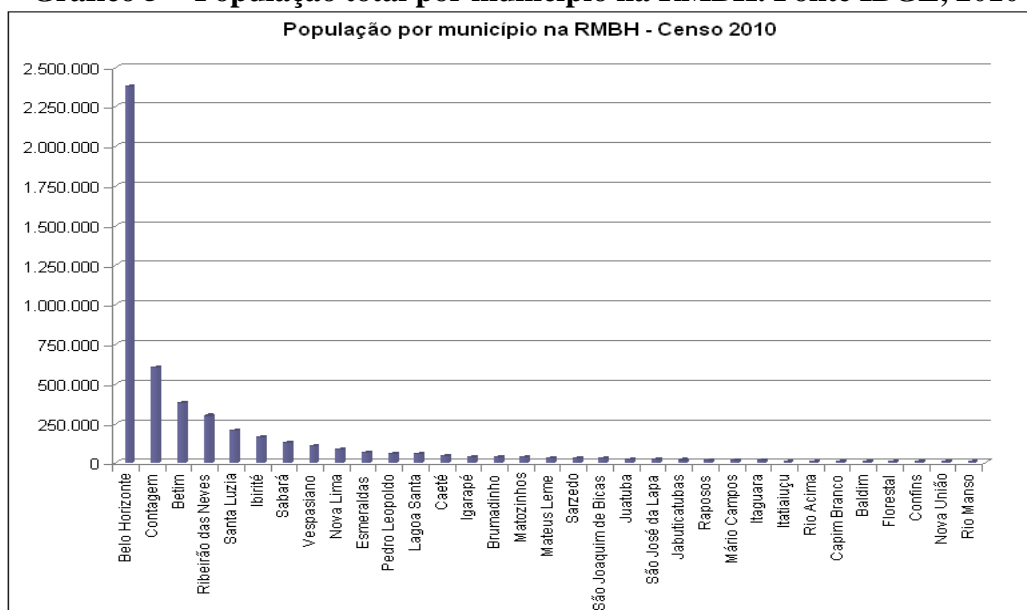
**Fonte: . Coelho C. W. G.A. (2011)**

Com esse mapa foi possível averiguar as principais áreas de ocorrência dos raios bem como sua correlação com alguns fatores como a topografia, a urbanização e a distribuição pluviométrica média anual. Dessa forma, possibilitou-se ampliar o entendimento das tempestades na RMBH, FIG. 9, uma vez que as maiores densidades são encontradas nas regiões de maior concentração populacional, justamente nos municípios de Belo Horizonte, Contagem, Nova Lima, Sabará, Betim e Ibirité, GRAF. 5, em conjunto com uma topografia marcante. Ou seja, ao longo de um complexo de serras (Curral, Rola Moça, Moeda, etc), deixando a entender a influência tanto da topografia, como fator forçante na formação e atuação das tempestades, como no fator urbano, alteração do uso do solo, concentração de energia, alteração da dinâmica dos ventos e ilha de calor.

**Figura 9 – Sobreposição de layers – Correlação espacial entre variáveis**



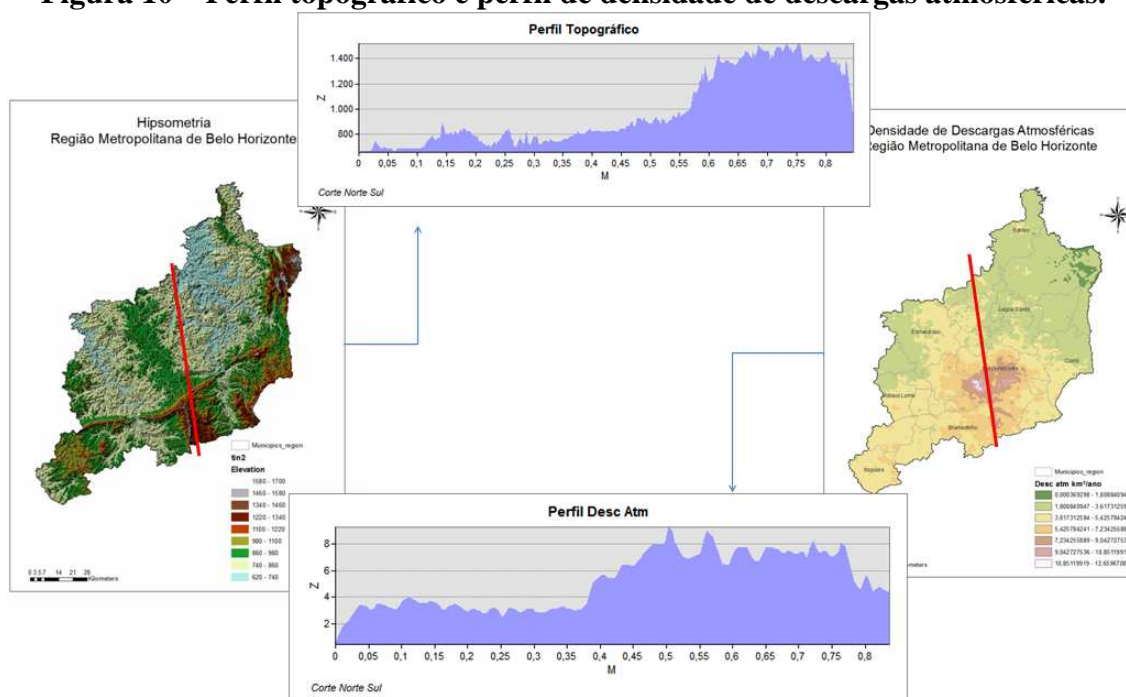
**Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)**

**Gráfico 5 - População total por município na RMBH. Fonte IBGE, 2010**

Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

Os perfis da FIG. 10 demonstram uma forte relação entre as ocorrências de descargas atmosféricas e a altitude. O “corte” norte-sul na RMBH apresentou a mesma formação tanto para a variação altimétrica como para a variação na densidade dos raios, passando justamente pela região mais habitada, com total pluviométrico anual mais elevado. Entretanto, essas análises deverão ser mais aprofundadas em estudos futuros, mas já sinalizam com certa clareza as possíveis correlações entre essas variáveis.

**Figura 10 – Perfil topográfico e perfil de densidade de descargas atmosféricas.**



Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

## 5.2 Storm track na RMBH, uma análise exploratória

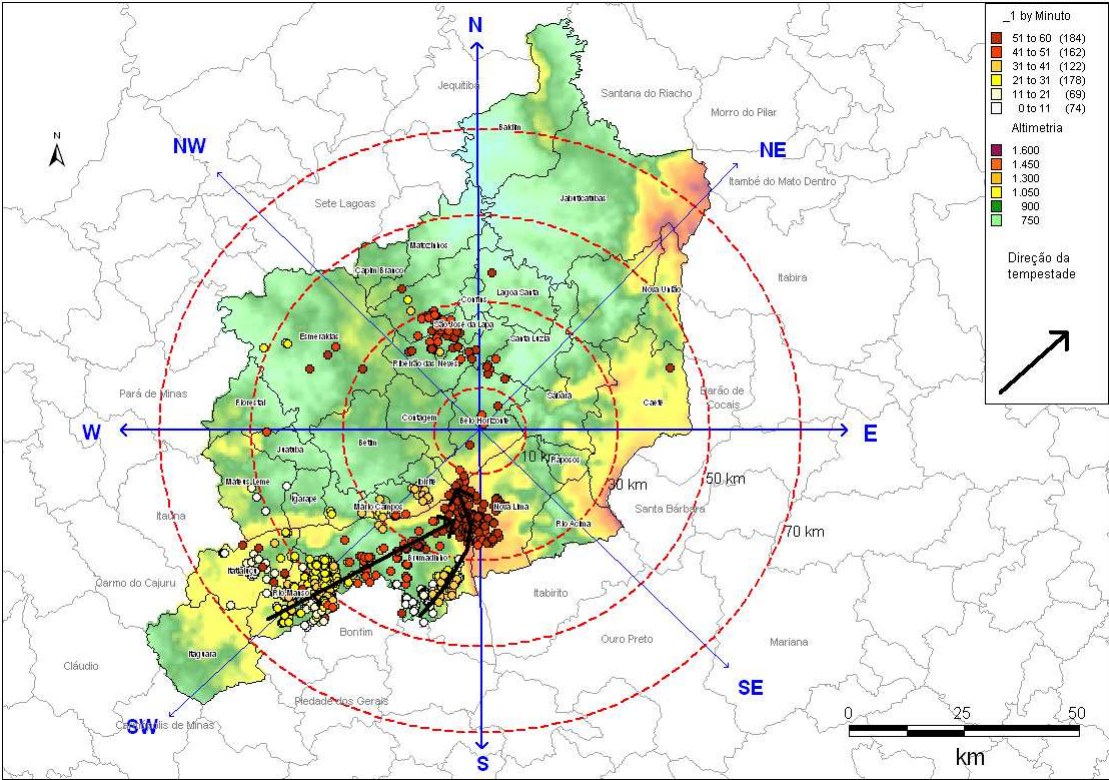
Nessa seção serão analisados os 74 casos de tempestades que compõem esta tese. Alguns eventos podem ser considerados como dois ou mais eventos distintos em virtude dos vetores de deslocamentos encontrados. Mas as datas selecionadas perfazem os 74 eventos no período de 1989 a 2007. Os horários utilizados são os mesmos do sistema de detecção, horário GMT, não sendo atualizados para o horário local.

Ressalta-se o grande interesse desta tese, a busca por meios de monitoramento acessíveis e confiáveis da formação, evolução, deslocamento, dissipação e, porque não, de previsão de uma tempestade. Os materiais e métodos utilizados para evidenciar os storm track na RMBH permitiram essa busca central, e cabe enfatizar que o arcabouço para atingir tal finalidade é vasto, ora de fácil acesso, ora não. Mas que também solucionam tais situações. Entretanto, sem dúvida alguma as descargas atmosféricas, monitoradas e acompanhadas com intervalo de tempo satisfatório permitem monitorar de forma adequada a formação e o desenvolvimento de núcleos de tempestades, severas ou não.

### 5.3 Eventos de tempestades severas

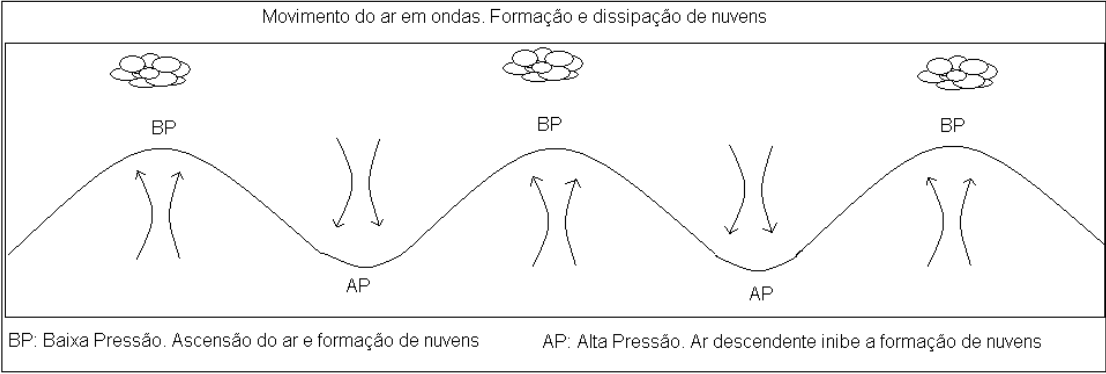
O primeiro caso de tempestade severa que compõe a análise ocorreu no dia 02/02/1989, às 22h (20 horas local). Pelas características encontradas, percebe-se um tipo de evento típico das chamadas chuvas de verão. Ocorreu em um curto espaço de tempo (1 hora) em um período do dia com máximo acúmulo de energia e saturação da atmosfera. O núcleo convectivo principal teve seu início próximo de 22 horas GMT, com pico máximo de ocorrência elétrica 30 minutos depois e assim iniciando sua dissipação. Os vetores de deslocamentos foram orientados de SW para NE com deslocamento médio de 30 km e uma faixa (largura) de atuação de 5 km aproximadamente, FIG. 11. A formação da tempestade se deu em dois municípios, o que resultou em dois vetores de deslocamento, sendo um em Rio Manso com deslocamento para Brumadinho, divisa com Nova Lima, e outro formado ao sul de Brumadinho com deslocamento para Nova Lima, culminado no mesmo destino do vetor anterior. Observou-se, nesse segundo núcleo convectivo, um vazio entre o início de formação e o final de atuação, próximo a curvatura do vetor. Esse vazio pode ser explicado pela alta pressão entre esses dois pontos, resultado da convergência dos ventos em altitude e consequentemente a formação de novos núcleos subsequentes, conforme FIG. 12. A interação da topografia local também explica essa intensificação nas proximidades de Brumadinho com o município de Nova Lima, uma vez que a circulação dos ventos em superfície é elevada a níveis mais altos em virtude da serra formando novos núcleos de precipitação. Nessa data, o ENOS estava em sua fase negativa e atuava no Pacífico Equatorial.

Figura 11 – 1º evento: Dia 02/02/1989, às 22h GMT



Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

Figura 12 – Circulação dos ventos na formação das nuvens.

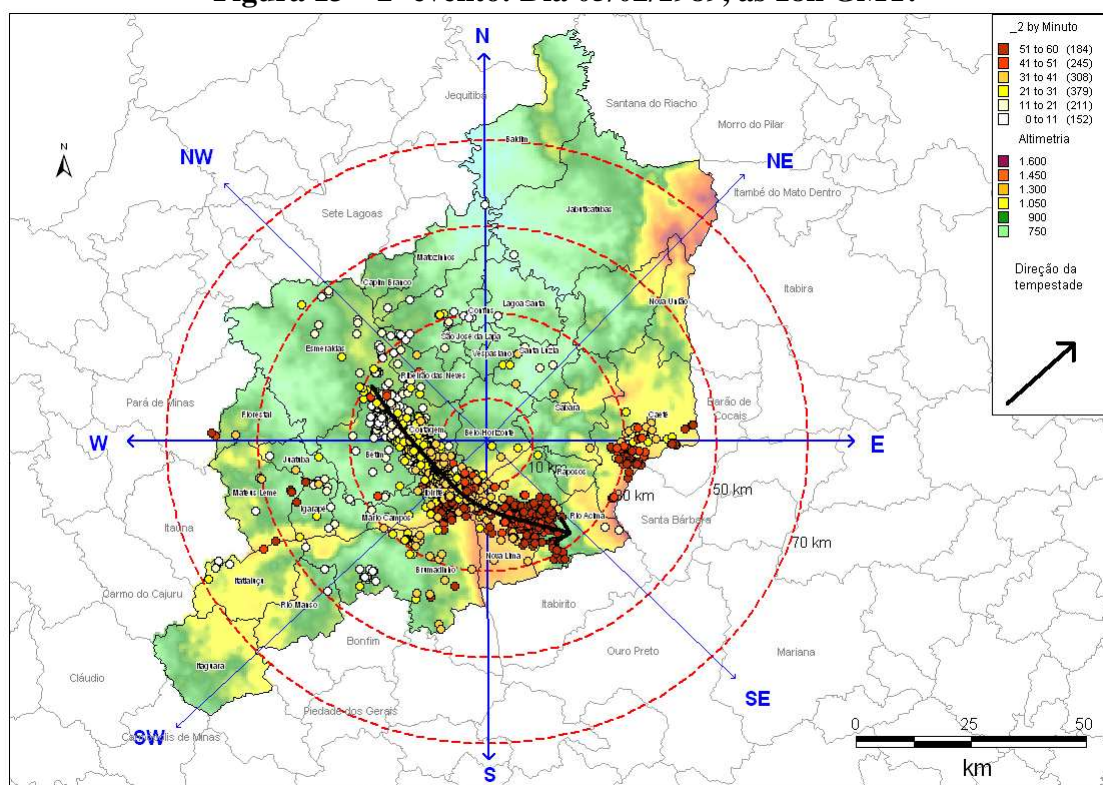


Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011).



O segundo evento analisado é o do dia 05/02/1989, às 18 horas GMT, três dias após o anterior. Pela respostada encontrada no vetor da trajetória da tempestade, percebe-se um evento com maior potencial de atividade atmosférica com deslocamento superior a 50 km, largura de 15 km médios, concentrado em uma hora de atuação, às 18 horas GMT. Sua formação ocorreu em Esmeraldas, com orientação NW a SE. Chuva de fim de tarde atingiu as regiões dos municípios de Betim, Ibirité, Barreiro em Belo Horizonte e Nova Lima, FIG. 13. Esse tipo de evento, nesse horário, tem capacidade de mudar por completo o cotidiano das pessoas, por impactar diretamente em algumas atividades da sociedade, sobretudo no trânsito. Nessa data o ENOS, em sua fase negativa, atuava no Pacífico Equatorial.

**Figura 13 – 2º evento: Dia 05/02/1989, às 18h GMT.**



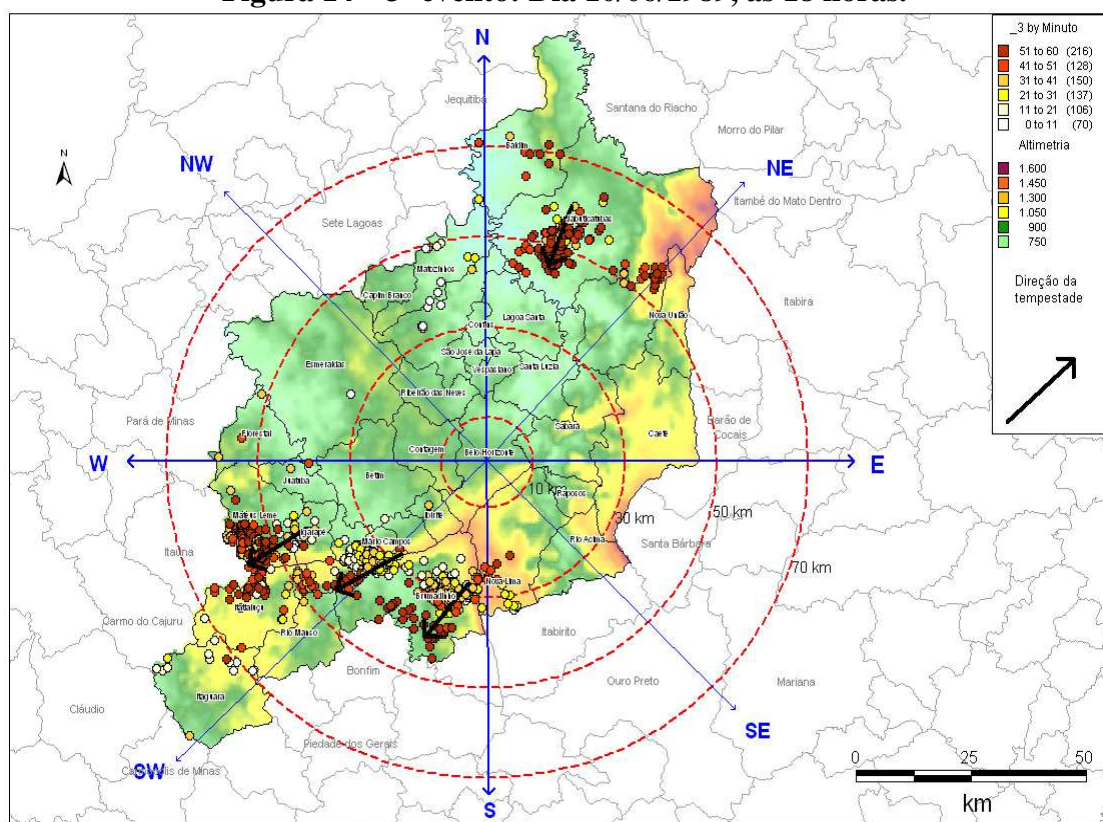
Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

O evento seguinte do dia 10/06/1989, às 18 horas GMT, se subdividiu em quatro núcleos, mesmo que os núcleos à SW da RMBH pudessem ser considerados como uma única linha de instabilidade. A FIG. 14 demonstra essa atuação, onde se percebe uma forte contribuição da topografia na formação e desenvolvimento dos núcleos no setor SW. Esse caso tem uma particularidade em relação aos demais casos estudados, pois o mês de ocorrência, junho, é um período com baixa probabilidade de registrar fenômenos dessa



magnitude, sobretudo com a formação de raios em função da baixa temperatura. Entretanto, linhas de instabilidades, por vezes, conseguem se formar causando consequentemente as precipitações. Fato é que houve um núcleo deslocado dos demais, NE, em Jaboticatubas, que explica essa instabilidade distribuída por toda a RMBH. Esse evento teve baixo deslocamento espacial, se concentrou em um período de tempo de aproximadamente 1 hora e largura de atuação média para cada núcleo de 5 km. Nessa data o ENOS, em sua fase negativa, atuava no Pacífico Equatorial.

**Figura 14 – 3º evento: Dia 10/06/1989, às 18 horas.**

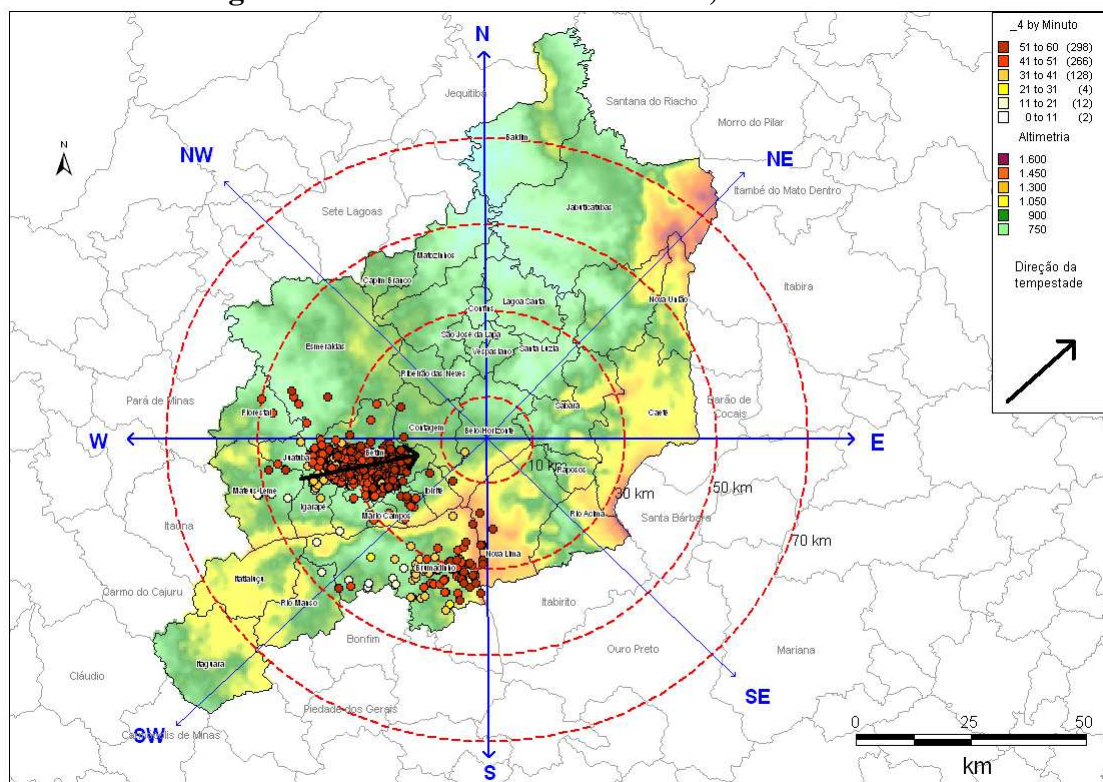


**Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)**

O quarto evento, do dia 29/09/1989, à 0 hora GMT, foi um evento considerado dentro dos padrões das tempestades. A distância percorrida pelo núcleo não passou de 25 km, com raio de ação de aproximadamente 10 km, FIG. 15. O tempo de permanência, como na maioria dos casos analisados, foi em média uma hora de duração, com localização de origem no município de Igarapé, a SW, com deslocamento para NE chegando ao município de Betim. Uma característica a destacar nesse evento foi o pico de atividade atmosférica ter ocorrido próximo do tempo de dissipação do núcleo, ou seja, as descargas atmosféricas se iniciaram próximo de zero hora e tiveram sua maior frequência depois de 40 minutos de chuva

atingindo a hora seguinte, quando entrou em dissipação. Esse evento poderia ter maiores impactos para a sociedade se não tivesse ocorrido à zero hora GMT, do dia 29/09/1989. Não havia nenhum fenômeno atuando no Pacífico Equatorial.

**Figura 15 – 4º evento: Dia 29/09/1989, à 0 hora GMT.**



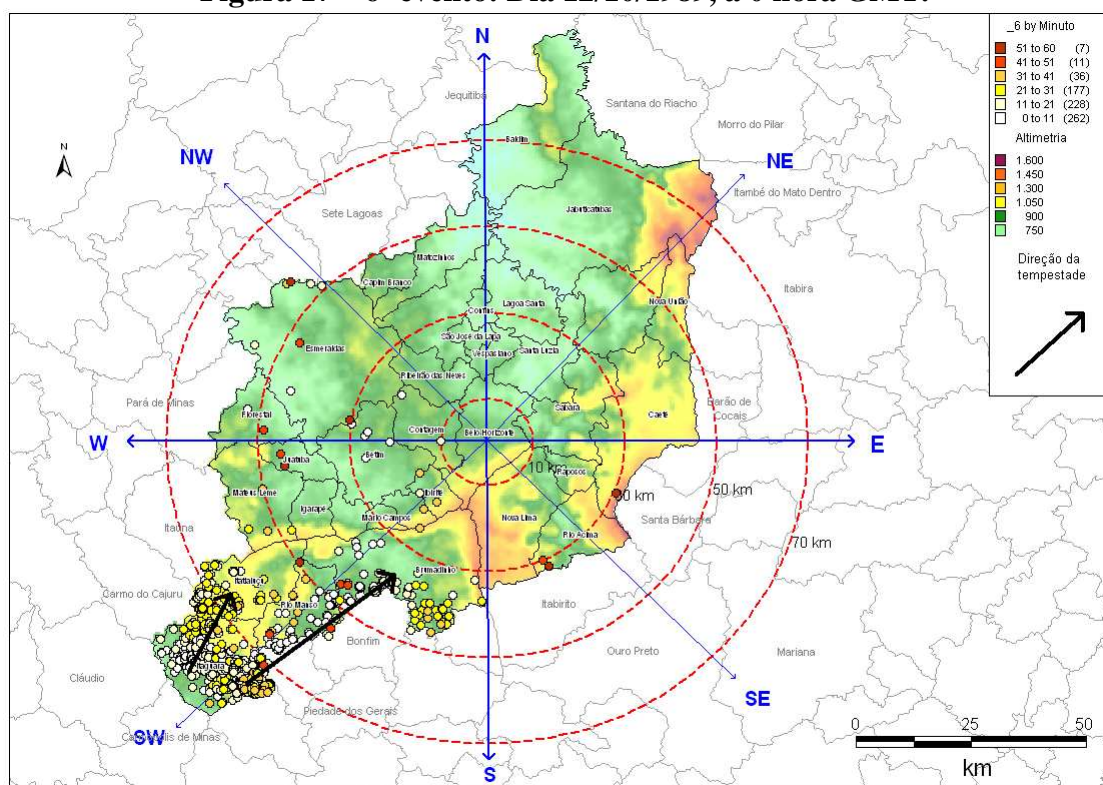
**Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)**

O evento do dia 09/10/1989, ocorrido entre 21 e 22 horas GMT, foi um evento típico da formação de uma linha de instabilidade com trajetória de linha quebrada, conforme Starostin e Kneib (2002), onde a tempestade tem alteração na sua trajetória em virtude da evolução de novos núcleos. Nesse caso, há uma direção predominante, mas percebe-se claramente que a tempestade se desloca para uma nova direção. Isso pode ser explicado por algumas razões: a circulação dos ventos pode ter sofrido um “ajuste” em função da própria formação da linha de instabilidade, ou o núcleo, ao atingir uma altitude mais elevada, ter sido influenciado pelo cisalhamento do vento, que tem direções e forças diferentes daquelas próximas à superfície. Esse evento teve sua formação no quadrante NE com deslocamento predominante de SW-NE. Deslocamento superior a 60 km, considerado superior para os padrões de uma tempestade severa local, e largura de atuação acima de 35 km aproximadamente, também considerada muito elevada, FIG. 16. O tempo de atuação superou uma hora com pico de atividade atmosférica justamente no seu início de formação, ou seja,

O sexto caso de tempestade severa analisado ocorreu à zero hora GMT do dia 12/10/1989. Um forte núcleo se formou a SW na cidade de Itaguara, cobrindo praticamente todo o município. Sua atividade atmosférica mais intensa ocorreu nos primeiros trinta minutos, registrando mais de quinhentos raios e entrando em dissipação no decorrer da segunda meia hora. Apesar da forte convecção nos primeiros minutos, seu deslocamento foi mais intenso justamente na fase de dissipação, atuando em dois vetores distintos com deslocamento predominante SW-NE percorrendo mais de 40 km de distância, FIG 17. Não havia nenhum fenômeno atuando no Pacífico Equatorial.



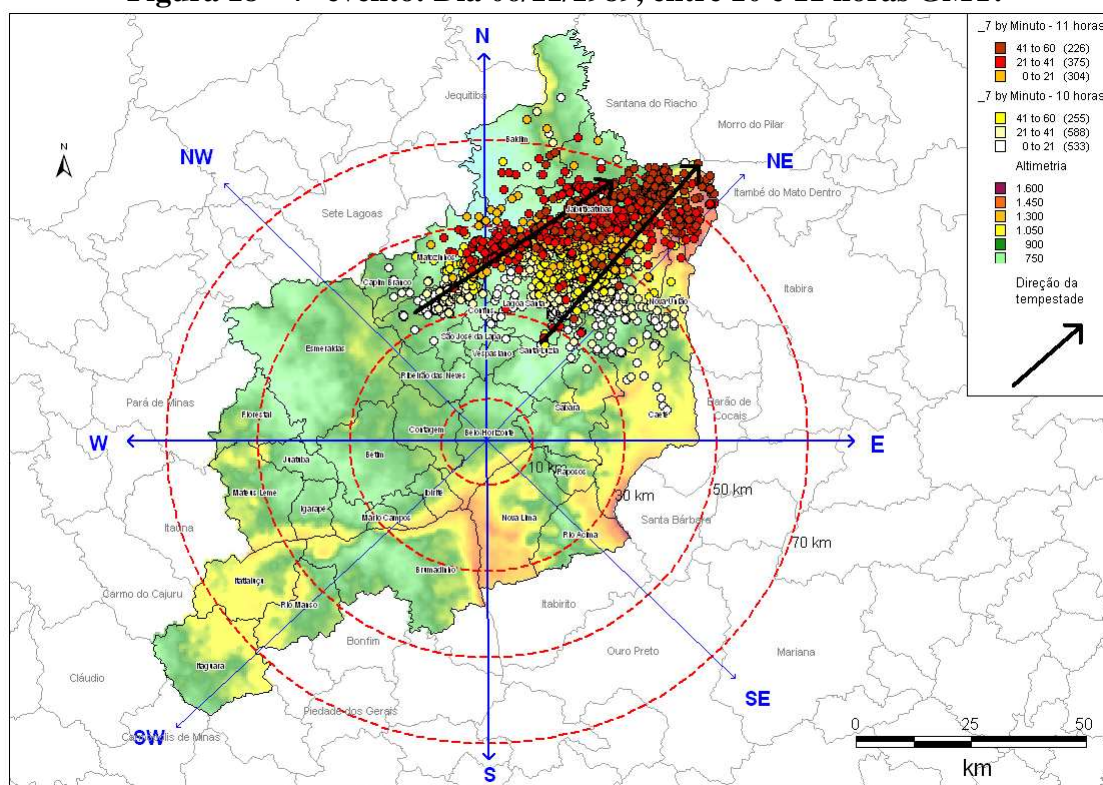
**Figura 17 – 6º evento: Dia 12/10/1989, à 0 hora GMT.**



**Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)**

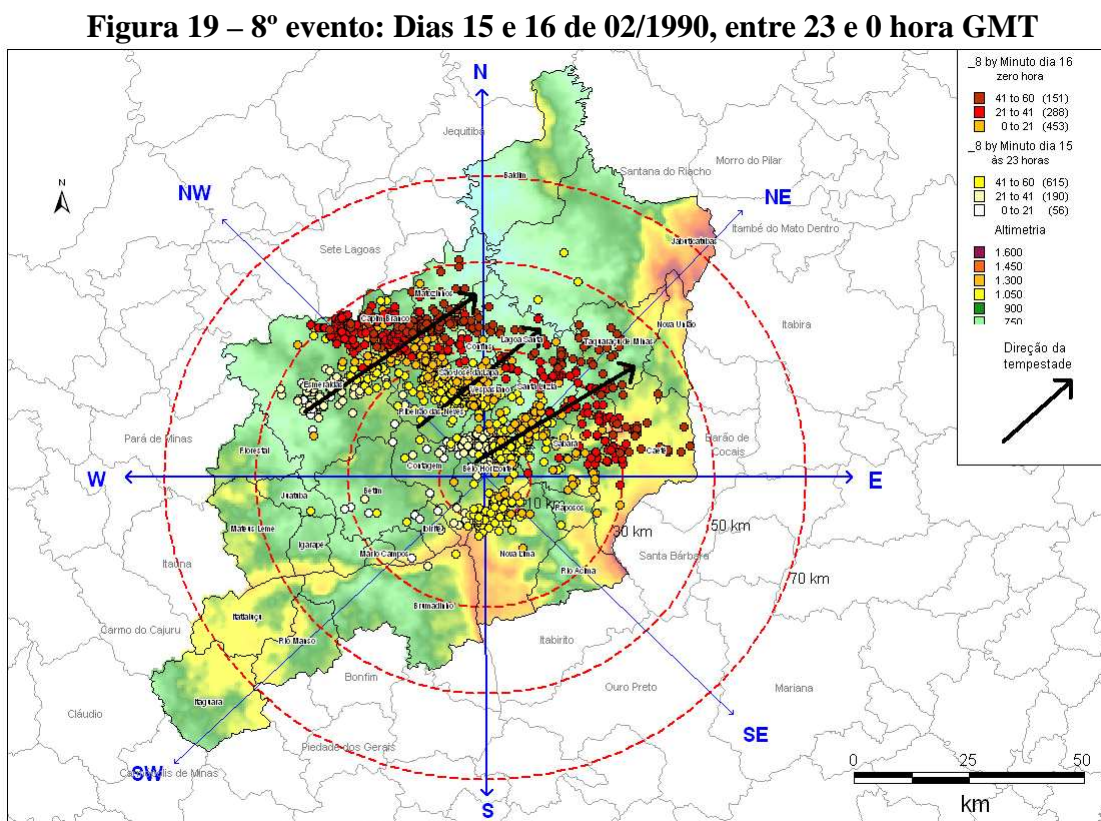
O evento de número 7 registra uma característica singular. Primeiro se caracteriza como um evento de magnitude forte atingindo vários municípios no quadrante NE da área de estudo. Formou-se entre os municípios de Pedro Leopoldo, Confins, Lagoa Santa e Santa Luzia, se deslocando no sentido SW-NE e atingindo os municípios Santana do Riacho e Itambé do Mato Dentro, fora da RMBH. Percorreu mais de 50 km de distância entre sua origem e seu destino e ocupou um raio superior a 45 km, com duração de duas horas aproximadamente, FIG. 18. Uma atividade atmosférica como essa causa diversos transtornos em uma sociedade, interrupção de energia, paralisação do sistema aeroviário e rodoviário, deslizamento de encostas e enchentes. Nesse evento eventualmente registrou-se pluviosidade acumulada superior a média da região, rajadas de ventos e por vezes granizos, além dos raios obviamente. Não havia nenhum fenômeno atuando no Pacífico Equatorial.

**Figura 18 – 7º evento: Dia 06/11/1989, entre 10 e 11 horas GMT.**



**Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)**

O evento ocorrido nos dias 15 e 16 de fevereiro de 1990, entre 23 e 0 hora GMT, teve uma distribuição espacial de larga escala. Uma forte linha de instabilidade se formou entre os quadrantes NW e NE, mais ao centro da RMBH e se deslocou para NE atingindo os municípios de Capim Branco, Lagoa Santa, Taquaraçu de Minas, Sabará e adjacências, atuando inclusive na cidade de Belo Horizonte, FIG. 19. Apesar de larga faixa atingida, mais de 60 km de largura, o deslocamento não foi superior a 40 km. Entretanto, um evento com essas características tem o potencial de descarregar totais pluviométricos significativos sobre uma superfície. O tempo de duração não ultrapassou duas horas médias, com pico de atividade elétrica atingido após 50 minutos aproximadamente, quando o núcleo convectivo começou a enfraquecer e a se dissipar. Não havia nenhum fenômeno atuando no Pacífico Equatorial.

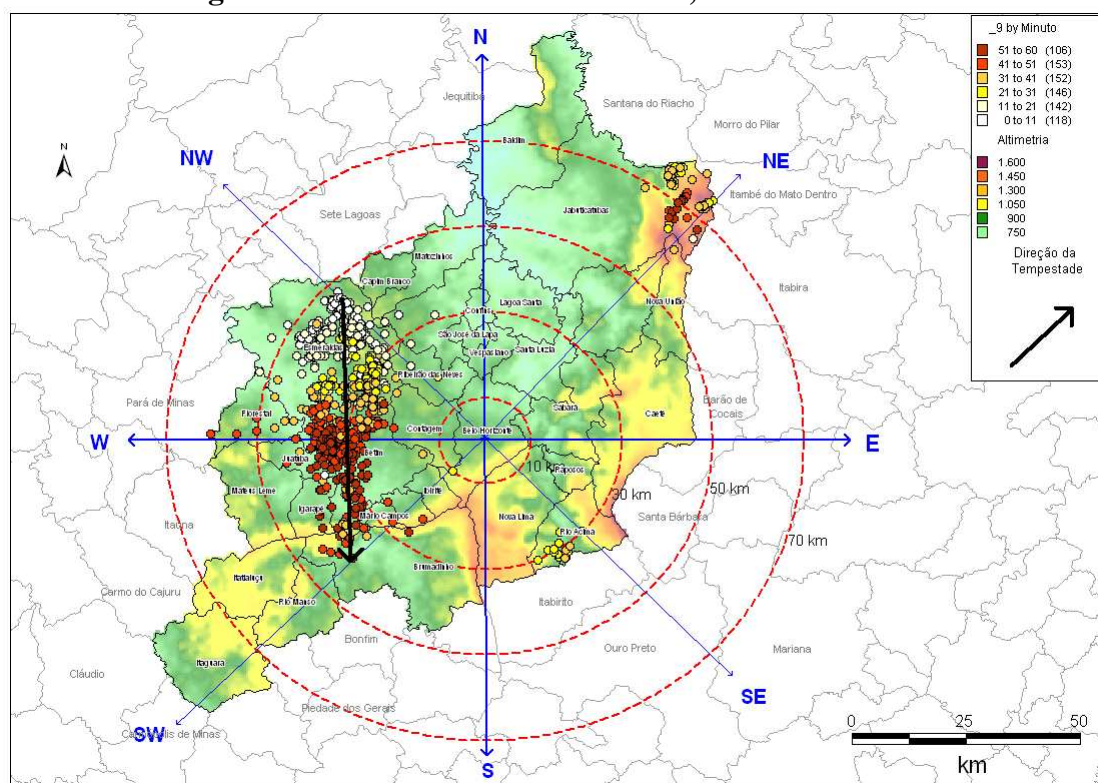


**Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)**

A FIG. 20 representa a tempestade do dia 27/02/1990, às 20 horas GMT. Mais um evento de curta duração, mas com magnitude de moderada a forte com uma distribuição de atividade elétrica homogênea durante toda a sua atuação. Essa tempestade se formou no município de Esmeraldas no quadrante NW e se deslocou sentido Sul para o quadrante SW, chegando até a encosta da serra do Rola Moça, vertente norte. Perceberam-se alguns raios na outra vertente da serra, entretanto, a chuva não conseguiu transpor essa barreira natural. Apesar da escala temporal rápida, a tempestade percorreu 60 km médios, com uma largura média de 15 km. Não havia nenhum fenômeno atuando no Pacífico Equatorial.



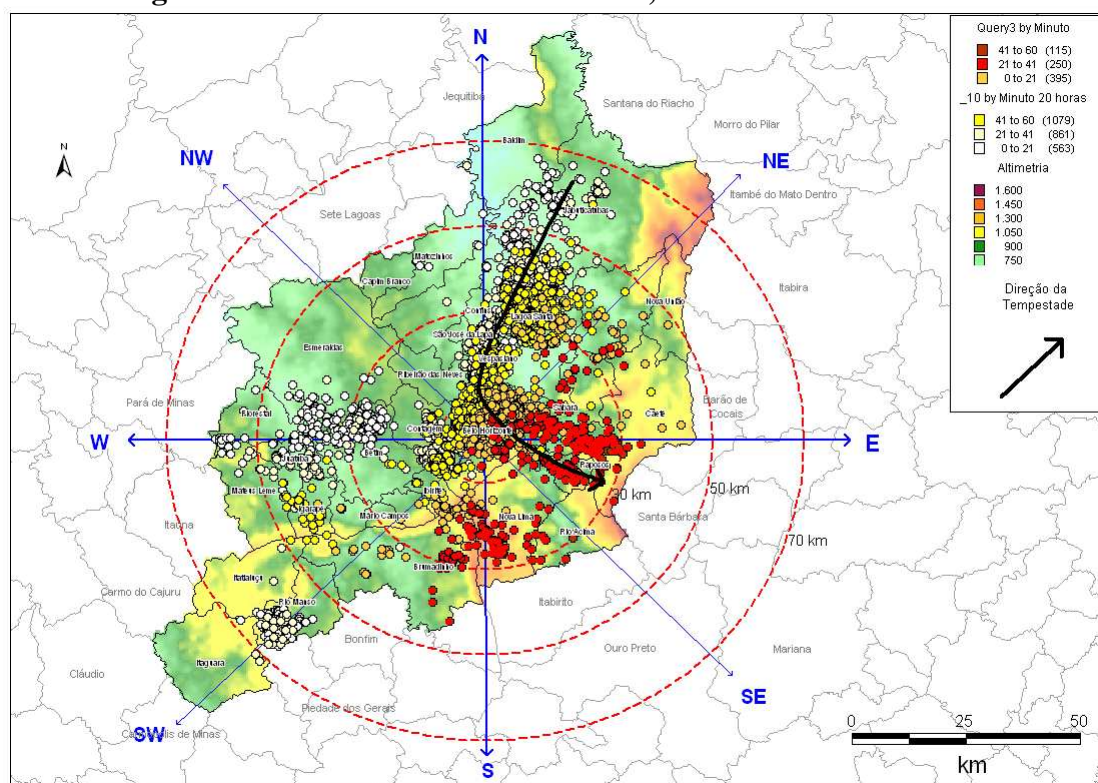
**Figura 20 – 9º evento: Dia 27/02/1990, às 20 horas GMT.**



**Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)**

O décimo evento analisado, no dia 27/03/1990, entre 20 e 21 horas GMT, teve um padrão espacial de escala regional, ou seja, foram registrados raios distribuídos por toda a RMBH. Entretanto, uma linha de instabilidade se destacou em relação aos demais núcleos. Uma forte linha se formou no quadrante NE no município de Jaboticatubas e Baldim com sentido de deslocamento inicial para o SW. Essa trajetória foi quebrada ao atingir a capital mineira, FIG. 21. Destaca-se a alteração de sentido, pois ao chegar a Belo Horizonte a tempestade atingiu pico máximo de ocorrência de raios ( $\pm 1000$  raios) e acabou por seguir outro rumo, em direção ao município de Raposos. Fato é que a tempestade se encaixou justamente em uma depressão existente na serra do Curral, vale do rio das Velhas, demonstrando uma forte influência topográfica associada à circulação dos ventos. Essa tempestade ainda se destacou por percorrer 90 km aproximadamente, com 20 km médios de largura, um evento de magnitude forte. Não havia nenhum fenômeno atuando no Pacífico Equatorial.

**Figura 21 – 10º evento: Dia 27/03/1990, entre 20 e 21 horas GMT**



**Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)**

A tempestade do dia primeiro de maio de 1990, ocorrida às 18 horas GMT, foi um evento de magnitude moderada com dois núcleos distintos. Um núcleo se formou no centro da área de estudo, em Belo Horizonte, e outro surgiu mais a SE entre os municípios de Nova Lima e Rio Acima. Ambos os vetores encontrados se deslocaram na mesma direção, com orientação SW-NE, percorreram uma distância média de 45 e 35 km respectivamente, com largura média de 15 km, FIG. 22. Esse evento ainda tem como particularidade a época de ocorrência, início de maio, incomum para o mês, já que o dito período seco já se iniciou. Não havia nenhum fenômeno atuando no Pacífico Equatorial.





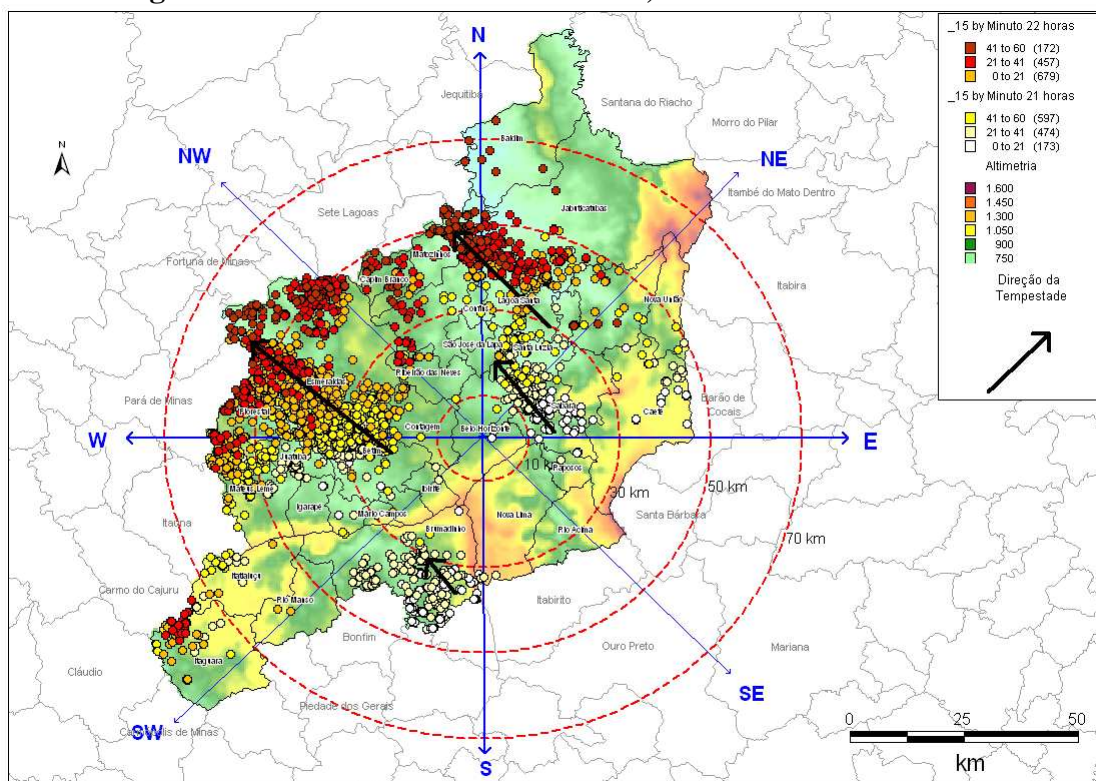








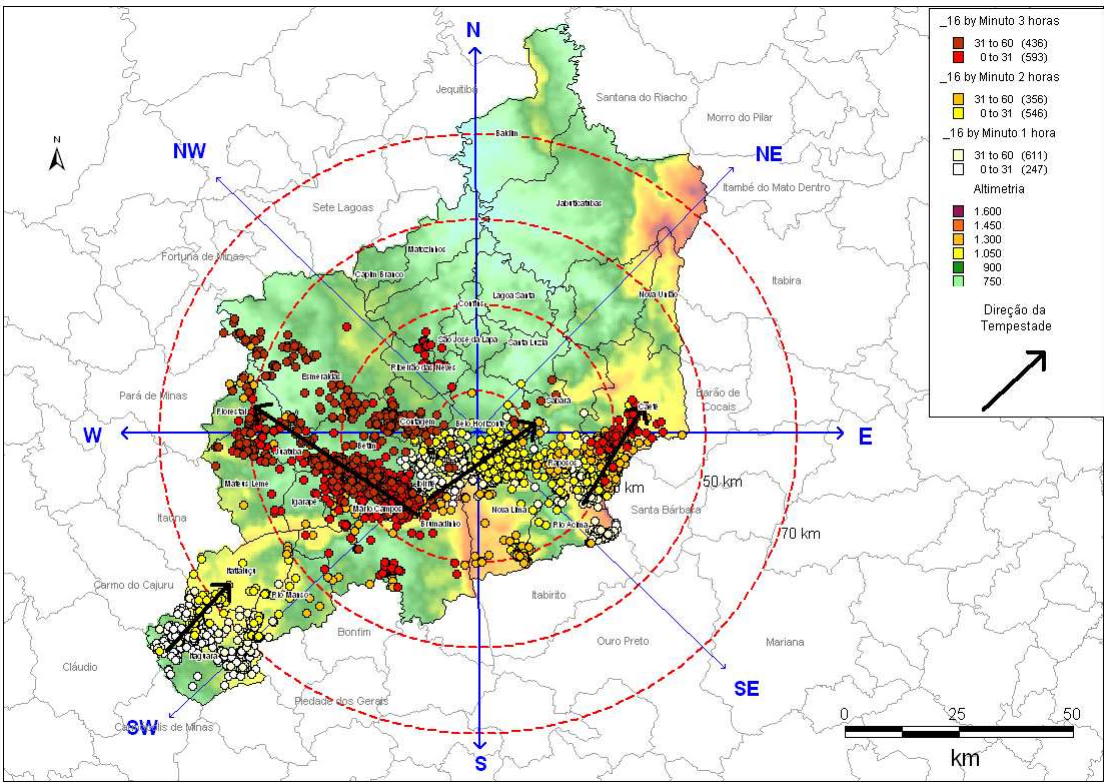
**Figura 26 – 15º evento: Dia 20/11/1990, entre 21 e 22 horas GMT**



**Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)**

O evento seguinte analisado, também apresentou suas peculiaridades. Essa tempestade ocorrida no dia 23/01/1991, entre 1 e 3 horas GMT, formou uma linha de instabilidade no centro da RMBH juntamente com um outro núcleo a sudoeste. Todos eles apresentaram atividade atmosférica bem elevada com vetores orientados de SW para NE, FIG. 27. Três núcleos apresentaram esse padrão sendo um que se formou em Rio Acima, outro em Brumadinho na divisa com Belo Horizonte e Igarapé e um terceiro, mais a sudoeste da região no município de Itaguara. Todos eles percorreram uma distância entre 20 e 30 km médios. Na terceira hora de duração desse evento, incomum até o momento nesse estudo, um novo núcleo evoluiu próximo a Belo Horizonte, Contagem e Ibirité. Acentuou-se, desenvolveu-se e se deslocou no sentido NE-NW atingindo os municípios de Florestal e Esmeraldas, percorrendo uma distância de 45 km aproximadamente. A explicação dessa alteração de trajetória pode estar associada à circulação dos ventos e em virtude da própria evolução da célula convectiva, que, ao atingir níveis superiores em altitude, sofre interferência de um padrão de circulação diferente daquele próximo à superfície. Não havia nenhum fenômeno atuando no Pacífico Equatorial.

**Figura 27 – 16º evento: Dia 23/01/1991, entre 1 e 3 horas GMT.**

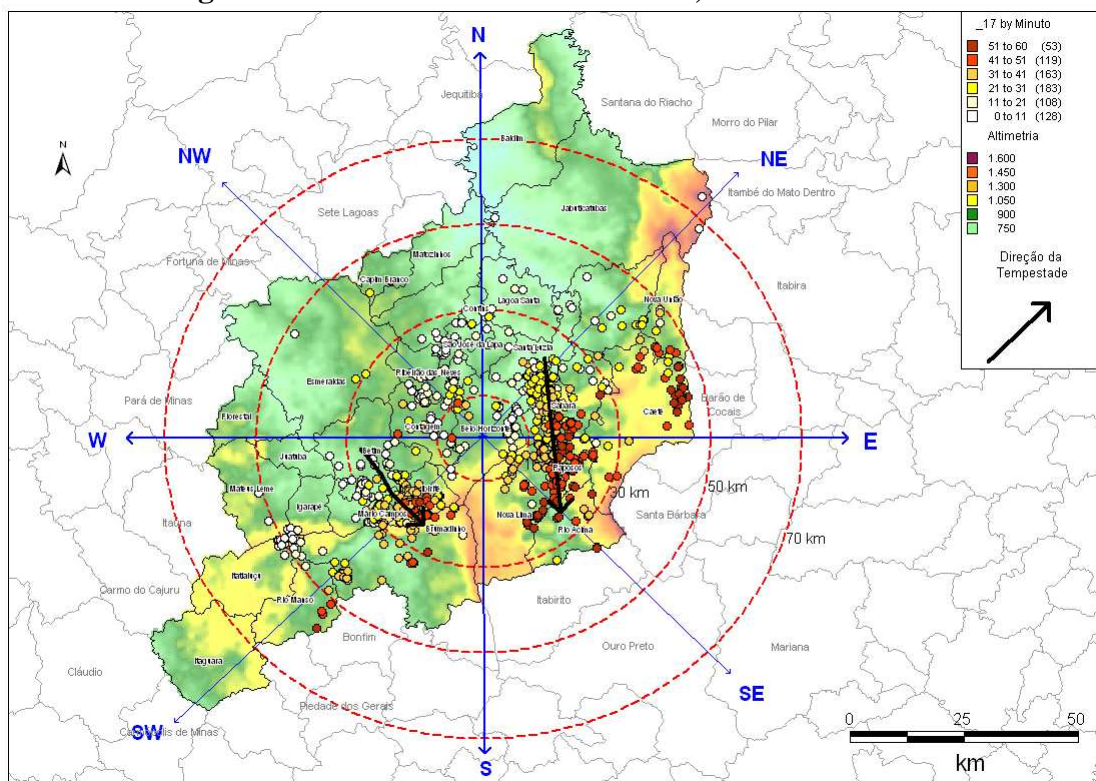


**Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)**

O padrão de circulação na tempestade do dia 25/01/1991, às 14 horas GMT, teve orientação no deslocamento das chuvas de norte para sul (N-S), FIG. 28. As chuvas se formaram bem distribuídas em vários pontos da região e dois núcleos mais intensos se desenvolveram, sendo um em Santa Luzia e outro no município de Betim. O núcleo do quadrante NE percorreu uma distância média de 32 km atingindo os municípios de Raposos e Rio Acima. Vale destacar que esse deslocamento pode ter sido influenciado sobremaneira pela topografia, no caso a serra do Curral, pois a linha se deslocou na depressão existente na serra dando uma espécie de “canal” para as chuvas. O evento do quadrante SW se deslocou por 22 km médios em direção à serra do Rola Moça, em Ibitité. Aqui, nesse caso, a serra bloqueou a evolução espacial da tempestade, que pela distribuição dos raios não conseguiu transpor a barreira. Não havia nenhum fenômeno atuando no pacífico Equatorial.



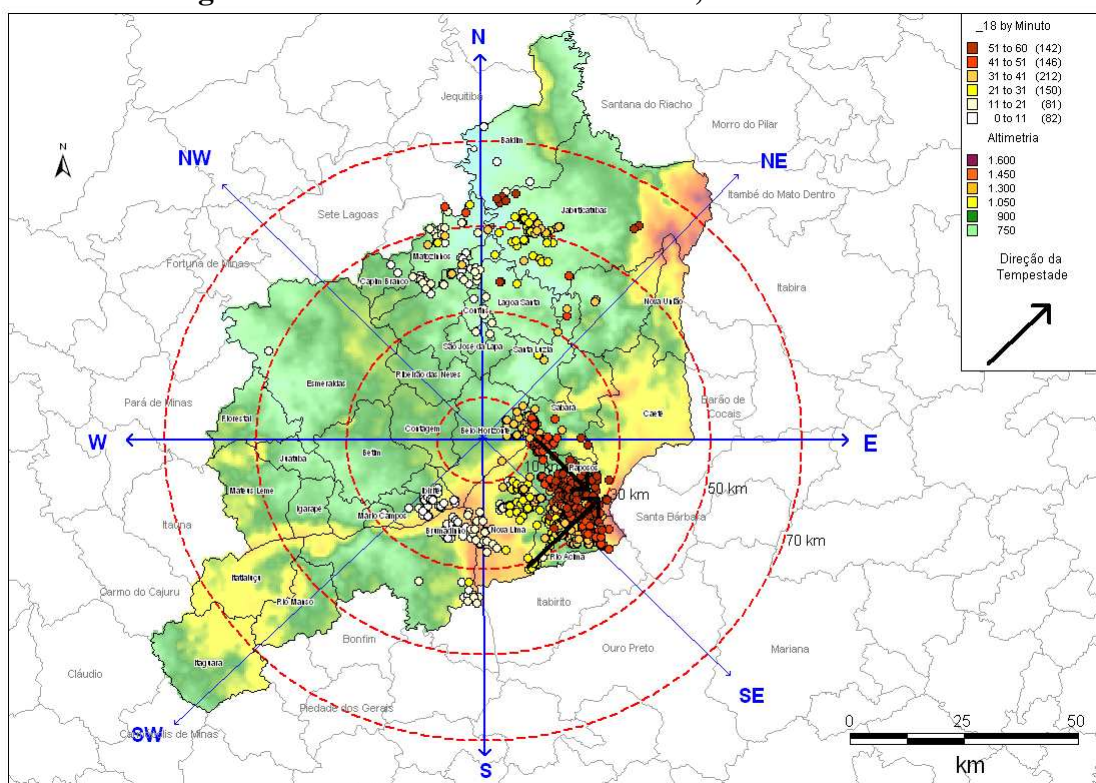
**Figura 28 – 17º evento: Dia 25/01/1991, às 14 horas GMT.**



**Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)**

O 18º evento do dia 12/02/1991, às 22 horas GMT, FIG. 29 abaixo, teve padrões de circulação aleatórios dentro da região. Alguns núcleos mais fracos foram observados na faixa norte e núcleos mais intensos no quadrante SE. O núcleo convectivo desenvolvido no quadrante SE destacou dos demais por sua atividade atmosférica mais forte. Sua orientação de trajetória foi de SW-NE com deslocamento médio de 20 km. O núcleo ficou localizado entre os municípios de Nova Lima, Raposos e Rio Acima, com uma possibilidade de ter sua origem no município de Brumadinho, onde se observaram as primeiras descargas atmosféricas. Outra característica nesse evento foi um núcleo que se desenvolveu na divisa de Belo Horizonte com o município de Sabará com orientação de deslocamento NW-SE. Esse núcleo, apesar de orientação de circulação divergente do núcleo anterior, teve o mesmo destino, ou seja, se desenvolveu em outra região, mas teve o mesmo lugar de dissipação. Não havia nenhum fenômeno atuando no pacífico Equatorial.

**Figura 29 – 18º evento: Dia 12/02/1991, às 22 horas GMT.**

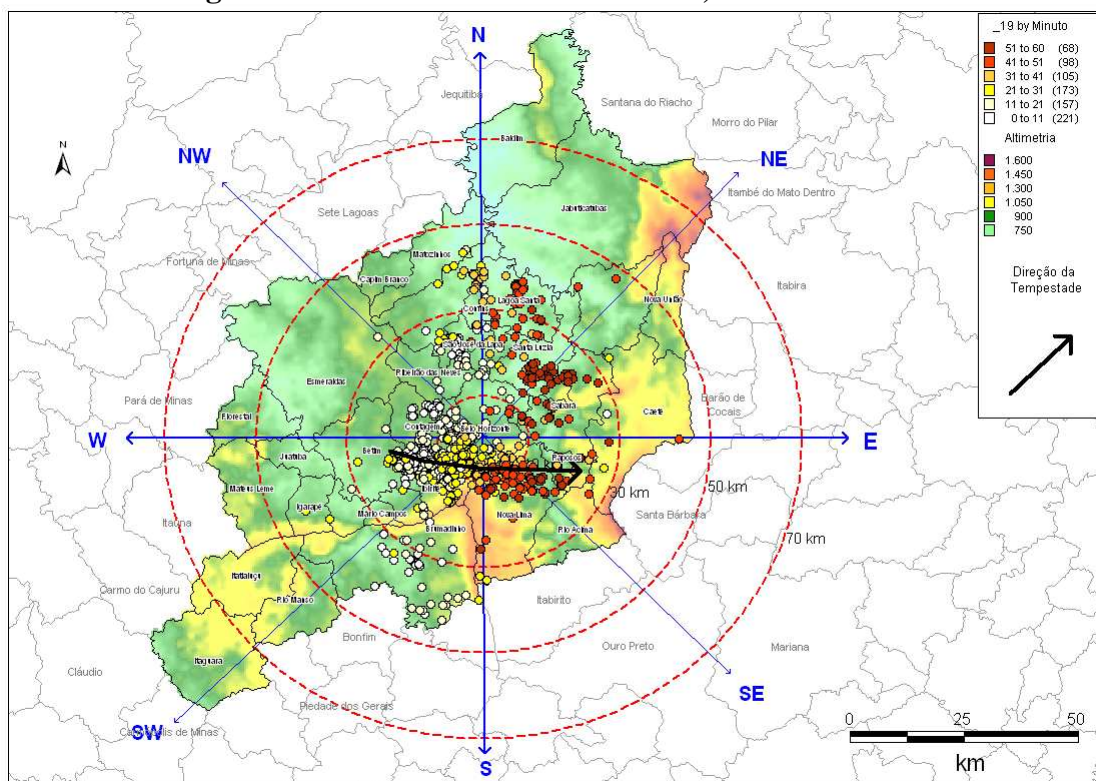


**Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)**

A tempestade do dia 16 de fevereiro de 1991, registrada às 3 horas da madrugada, FIG. 30 abaixo, formou-se na faixa oeste da RMBH. Um núcleo mais ativo se intensificou deslocando-se em direção à regional do Barreiro em Belo Horizonte, atravessando a serra do Curral e se dissipando entre as cidades de Nova Lima e Raposos. Esse deslocamento W-E, percorreu 40 km médios com uma largura de 25 km aproximadamente. Esse evento foi caracterizado por diversos outros núcleos na RMBH com atividade atmosférica mais forte ao centro. Não havia nenhum fenômeno atuando no Pacífico Equatorial.



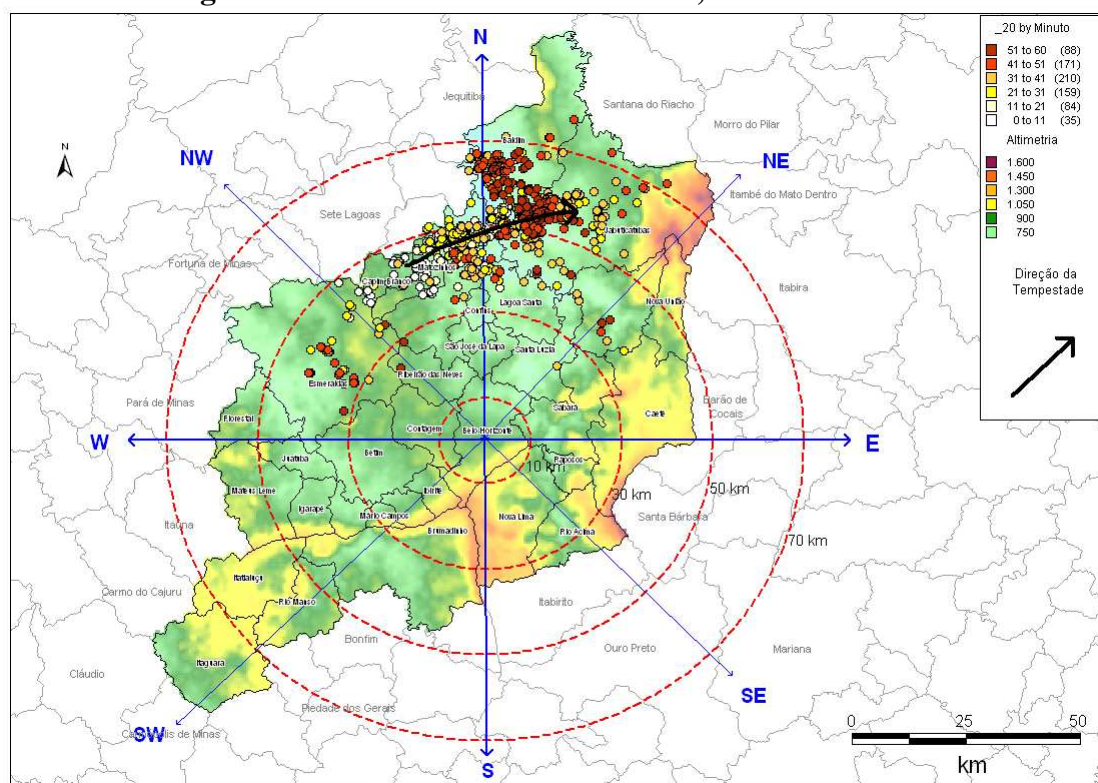
**Figura 30 – 19º evento: Dia 16/02/1991, às 3 horas GMT.**



**Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)**

A tempestade na FIG. 31 abaixo, ocorrida no dia 24/02/1991, às 19 horas GMT, foi um evento isolado ao norte da RMBH. A direção predominante desse núcleo convectivo foi de W-E com uma inclinação de SW-NE. Mesmo sendo um evento isolado percorreu 4 km médios, com duração de uma hora e pico de atividade atmosférica entre 20 e 40 minutos de seu tempo total de duração. Esse fenômeno traz características típicas das chamadas chuvas de verão, ou seja, núcleo isolado com rápida formação e dissipação com formação no período do dia de maior acúmulo de energia, às 17 horas local. Nessa data não havia a atuação do fenômeno ENOS.

**Figura 31 – 20º evento: Dia 24/02/1991, às 19 horas GMT.**



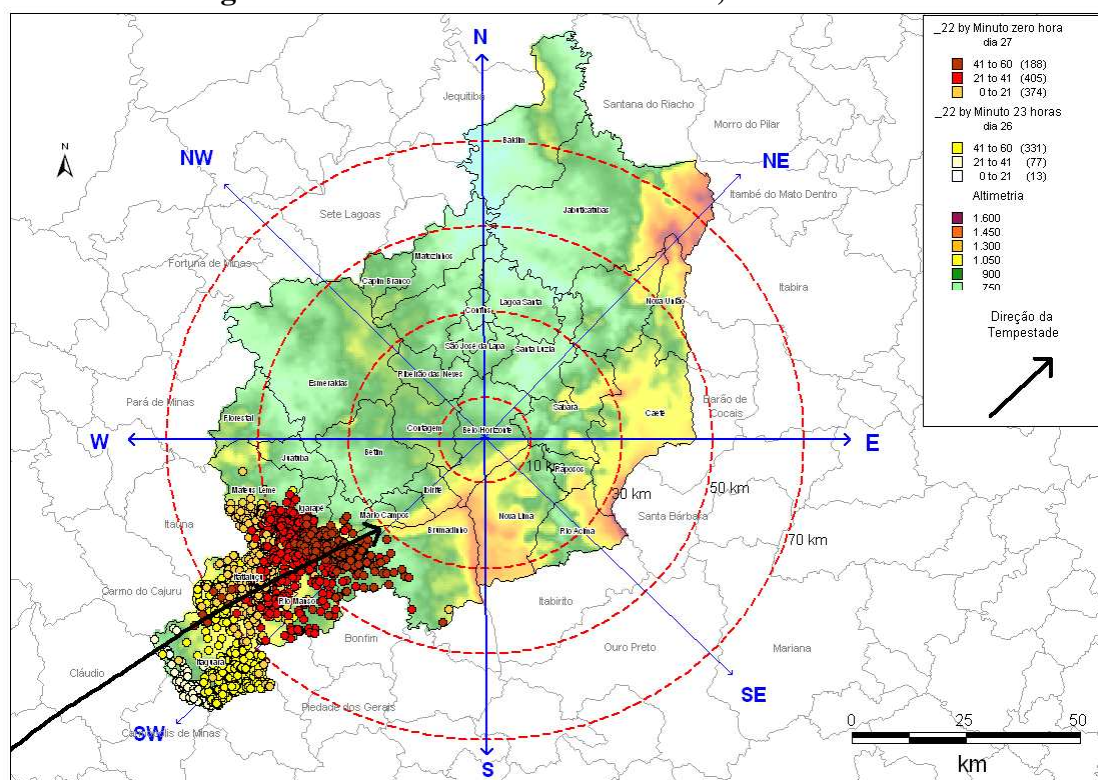
**Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)**

O 21º evento analisado, ocorrido dia 02/04/1991, às 15 horas GMT, exemplifica as chuvas de final de período chuvoso na RMBH. Alguns núcleos de fraca intensidade foram registrados com relevância e com sinais de tempestade severa, uma atividade que se formou e evoluiu entre Belo Horizonte, na região do Barreiro, e o município de Nova Lima. A serra do Curral pode ter contribuído na formação desse evento aliado à circulação sinótica do dia, fato é que, o núcleo mais a oeste pode ser a gênese desse evento de maior intensidade. A orientação de deslocamento foi de W-E percorrendo uma distância de total de 30 km aproximadamente e uma largura de 10 km, FIG, 32. Essa tempestade chegou a atingir municípios fora da RMBH. Ressalta-se que nesse mês, a TSM do Pacífico sinalizava o início do fenômeno ENOS na sua fase positiva, o El Niño.





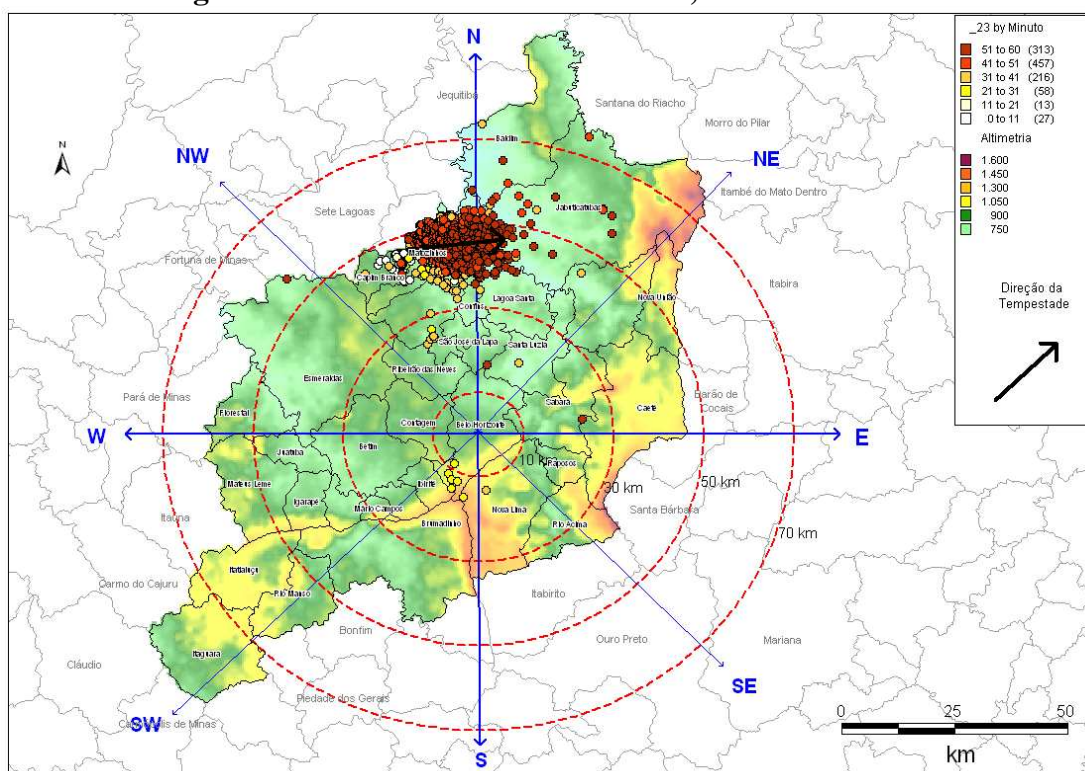
**Figura 33 – 22º evento: Dia 27/04/1991, à 0 hora GMT.**



Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

No mesmo dia do evento anterior, porém ocorrido às 16 horas GMT, formou-se um núcleo isolado ao norte da RMBH, FIG. 34 abaixo. Apesar de ser um evento isolado, bem característico de chuvas convectivas, teve deslocamento próximo a 20 km com orientação de W-E. Essa tempestade ocorreu em virtude do acúmulo de calor no decorrer do dia com muita umidade relativa disponível, pois um evento de escala maior ocorreu deixando essas características na atmosfera.

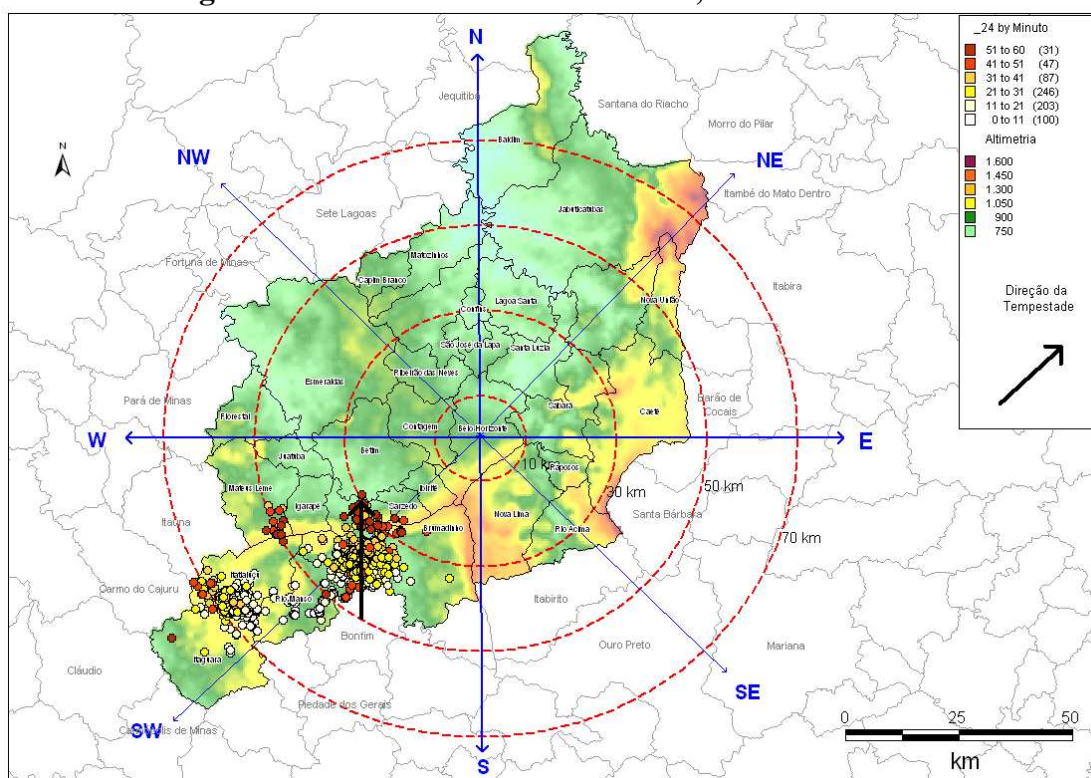
**Figura 34 – 23º evento: Dia 27/04/1991, às 16 horas GMT.**



**Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)**

A FIG. 35 abaixo se refere ao evento ocorrido no dia 17/09/1991, às 19 horas GMT. Essa tempestade se formou no município de Bonfim e entrou na RMBH pelo município de Brumadinho, no quadrante SW. Deslocou-se por 25 km com orientação S-N, se dissipando na encosta sul da serra do Rola Moça. Para os padrões de horário de ocorrência essa tempestade tem características convectivas, quando ocorre no final do dia com maior acúmulo de energia e saturação atmosférica de umidade. Alguns outros núcleos se formaram mais a oeste deste, porém sem nenhuma relevância com o propósito desta tese. Nessa data o fenômeno ENOS, na sua fase positiva, atuava de forma moderada no Pacífico Equatorial.

**Figura 35 – 24º evento: Dia 17/09/1991, às 19 horas GMT**

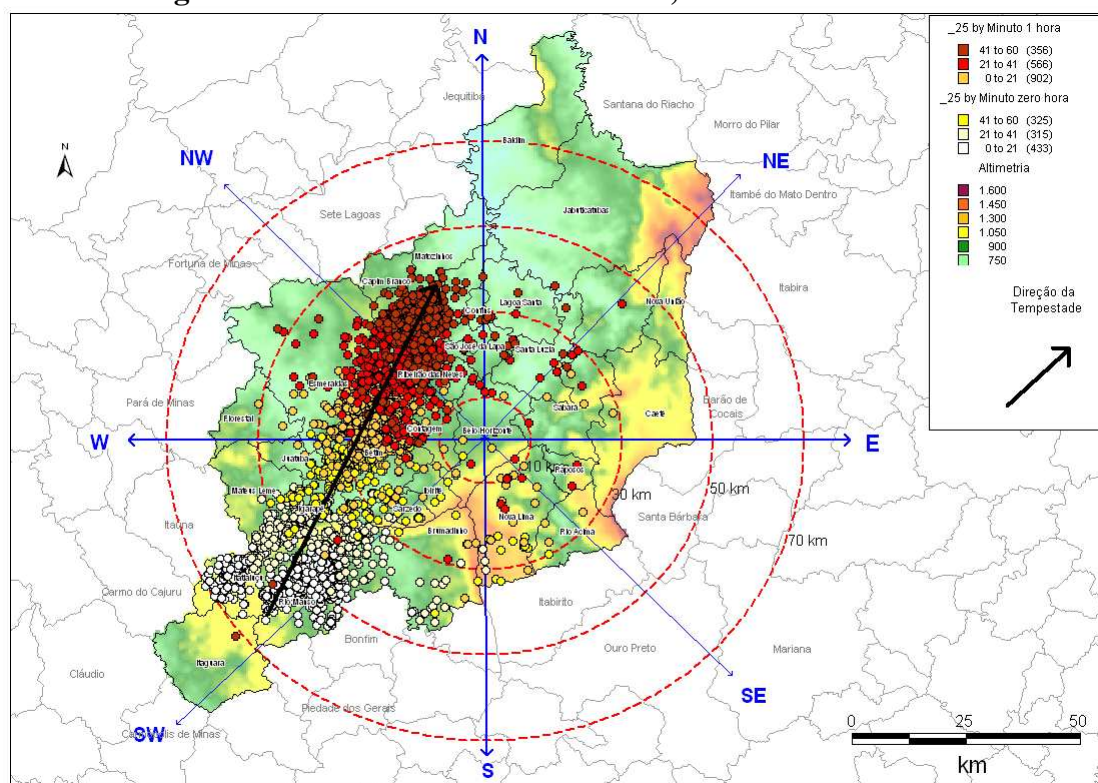


**Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)**

A tempestade do dia 25/09/1991, ocorrida entre 0 e 1 hora GMT, FIG. 36 abaixo, pode ser considerada como uma legítima tempestade severa, com todos os ingredientes que caracterizam um fenômeno dessa magnitude. Está relacionada à linha de instabilidade, formação convectiva profunda, deslocamento superior a 50 km, 85 km no caso, largura de mais de 20 km de atuação, atingiu vários municípios da RMBH e, provavelmente, não registrado nesta tese, acumulado pluviométrico acima da média para a região. Esse evento ainda demonstra uma força de atuação na ocorrência das descargas atmosféricas, pois, em vinte minutos foram registrados pelo sistema de localização de tempestades mais de 900 raios. Esse dado pode ser considerado como um dos maiores para a região. Sua formação e sua evolução estão no quadrante SW com deslocamento para o quadrante NW com inclinação SW-NE. Apesar de a sua representação estar dentro da RMBH, sua origem está relacionada para fora da região. Nessa data o fenômeno ENOS em sua fase positiva atuava de forma moderada a forte.



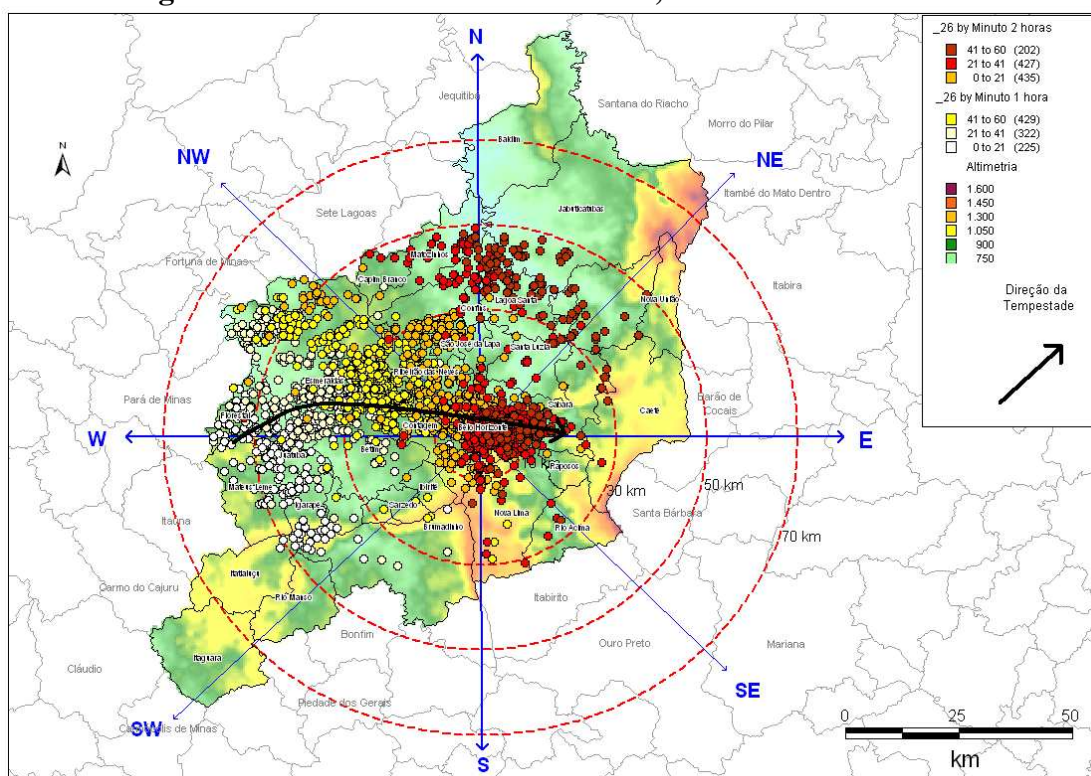
**Figura 36 – 25º evento: Dia 25/09/1991, entre 0 e 1 hora GMT**



**Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)**

O 26º evento do dia 18/11/1991 entre 1 e 2 horas GMT, também se caracteriza como uma forte tempestade. Sua origem está associada a núcleos que se formaram fora da RMBH entre os quadrantes NW e SW, próximo a Esmeralda e Mateus Leme, com deslocamento para leste, FIG. 37 abaixo. A dinâmica encontrada na “animação” das descargas tornou possível desenvolver um vetor com uma leve quebra na sua direção. Esse efeito se dá por algumas razões como alteração dos padrões de circulação, ou mesmo na evolução da tempestade associada à topografia. Outros núcleos foram observados ao norte da região, mas com destaque a atividade ao centro. Essa tempestade percorreu 75 km médios com dissipação nos municípios de Sabará, Raposos e Nova Lima. A serra do Curral pode ter trabalhado como obstáculo nesse evento já que, quando a tempestade a atingiu, sua intensidade já estava em dissipação. Nessa data o El Niño atuava com força moderada a forte no Pacífico Equatorial.

**Figura 37 – 26º evento: Dia 18/11/1991, entre 1 e 2 horas GMT.**

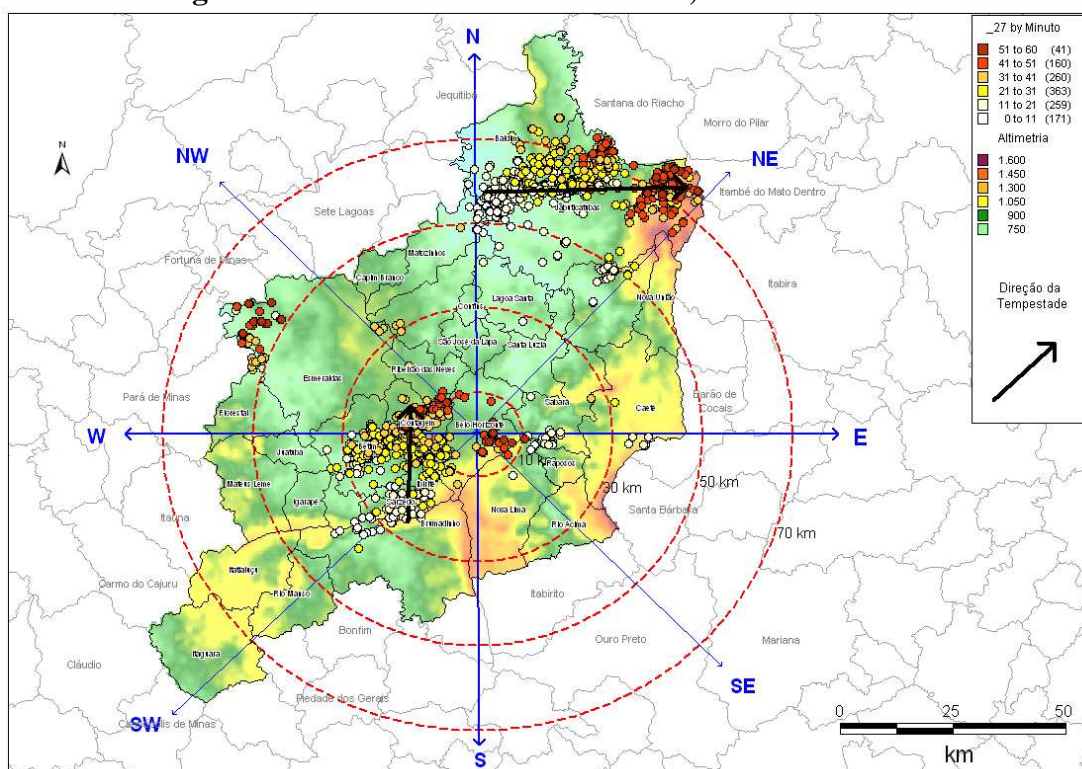


**Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)**

O 27º evento do dia 20/11/1991, às 18 horas GMT, dois dias após o anterior, foi marcado por chuvas convectivas, núcleos esparsos sobre a RMBH, FIG. 38. Dois núcleos se destacaram com chuvas intensas, sendo um ao norte com formação em Baldim, se deslocando 25 km aproximadamente de W para E, e um outro núcleo no quadrante SW com formação na encosta norte da serra do Rola Moça com deslocamento de S para N e distância percorrida de 20 km médios. O horário de ocorrência tem característica de chuvas convectivas rápidas e isoladas, típicas do verão local. O fenômeno ENOS, em sua fase positiva, atuava de forma moderada a forte no oceano Pacífico Equatorial.



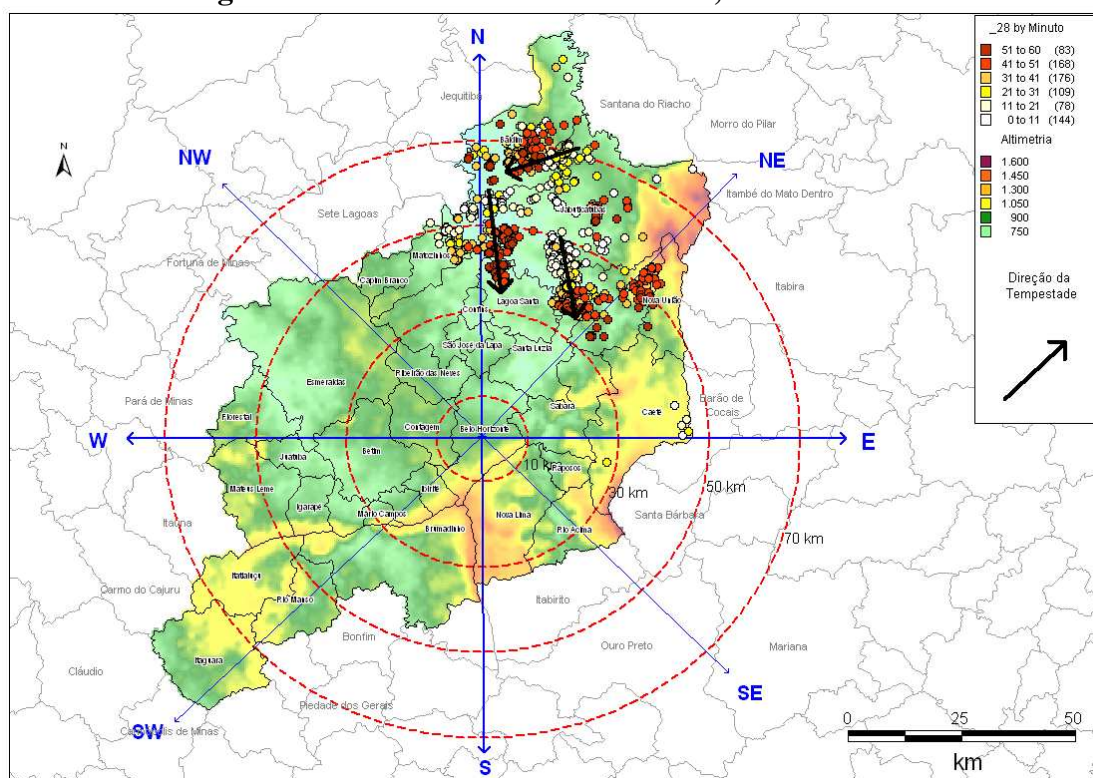
**Figura 38 – 27º evento: Dia 20/11/1991, às 18 horas GMT.**



Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

A análise a seguir corresponde ao evento de tempestade do dia 27/12/1991, à 0 hora GMT. Os núcleos registrados ao norte da região de estudo, no quadrante NE, são núcleos pequenos, mas não totalmente isolados. Tem deslocamento médio superior a 20 km. A orientação chama a atenção, pois, o vetor localizado mais a norte se orienta de E-W com leve inclinação para SW diferentemente dos dois vetores mais ao sul, onde se observa um sentido dos dois núcleos de N-S (leve declinação NW-NE), FIG. 39. Isso demonstra uma instabilidade local causando circulação dos ventos aleatória sem direção predominante. Nessa data o El Niño continuava a atuar no Pacífico com incremento na sua intensidade, ou seja, a TSM mantinha sua anomalia com intensidade moderada a forte.

**Figura 39 – 28º evento: Dia 27/12/1991, à 0 hora GMT.**



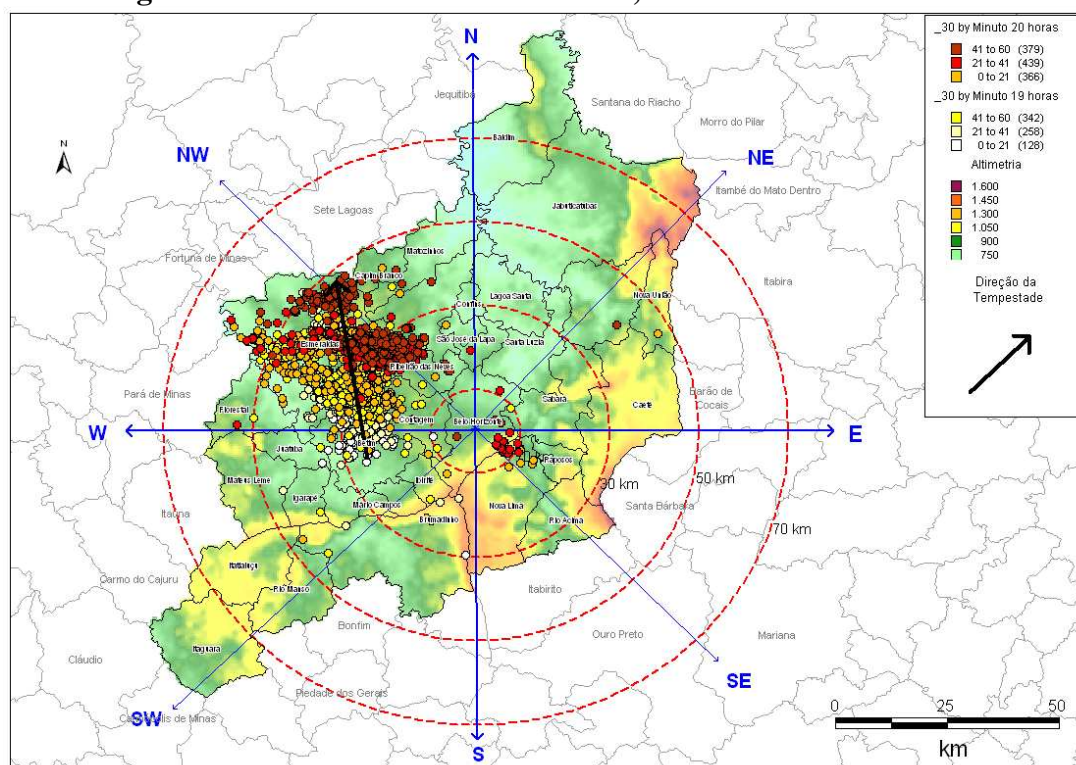
**Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)**

A FIG. 40 representa a tempestade ocorrida no dia 27/01/1992, às 22 horas GMT. Uma linha de instabilidade se formou entre os municípios de Mateus Leme, Betim, Contagem e Belo Horizonte. Em suma, um núcleo se intensificou no município de Betim com deslocamento de NE-NW raramente observado até o momento nesta tese. Essa tempestade percorreu 30 km aproximadamente e teve sua atividade elétrica máxima no início de sua evolução. Núcleos menores foram registrados em Belo Horizonte sem atingir um nível de severidade moderada. Nessa data o fenômeno ENOS continuava atuando no Pacífico equatorial, com intensidade moderada a forte.





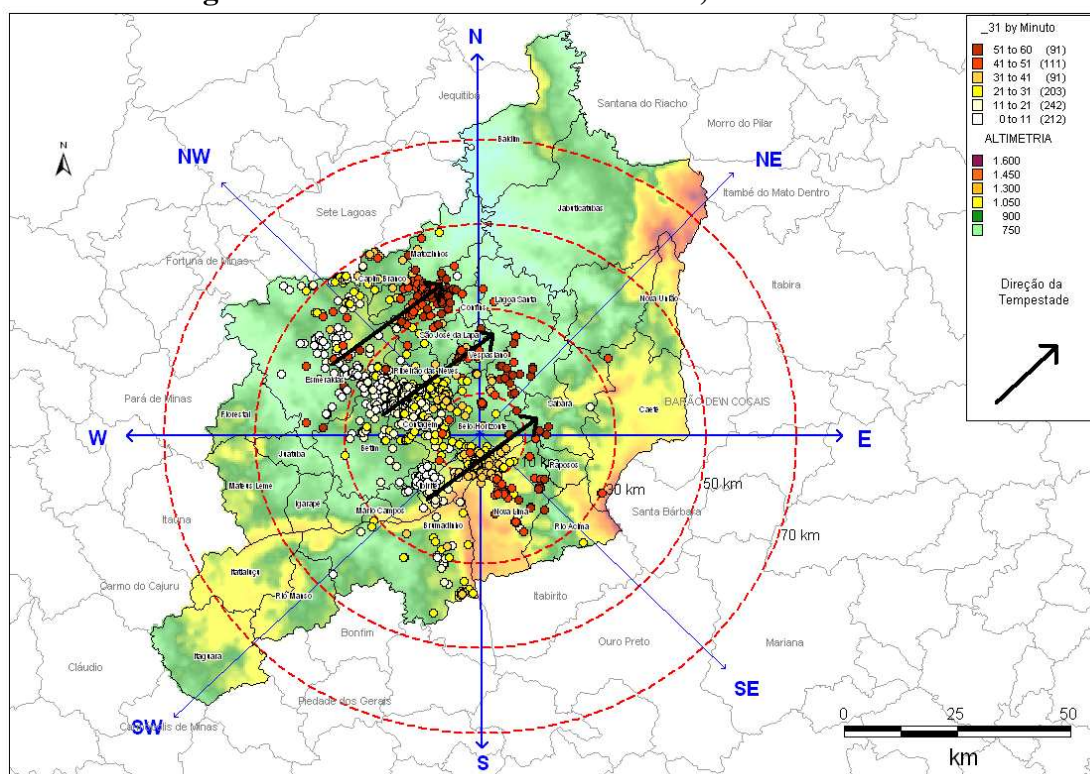
**Figura 41 – 30º evento: Dia 09/04/1992, entre 19 e 20 horas GMT.**



Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

No dia 16/04/1992, às 2 horas GMT, uma nova linha de instabilidade se formou na RMBH com uma largura de aproximadamente 60 km. Formou-se nos municípios de Esmeraldas, Betim e Ibirité se deslocando em direção aos municípios de Matozinhos, Lagoa Santa, Santa Luzia e Sabará, orientação SW-NE. Essa linha de instabilidade destacou três núcleos mais intensos com deslocamento médio de 30 km. A formação de novos núcleos posteriores, em relação à origem da tempestade, demonstra claramente o fenômeno da onda de instabilidade, FIG 42, onde se comprova a ação dos centros de alta e baixa pressão na formação e intensificação de novos núcleos convectivos. Ressalta-se ainda para a continuidade da atuação da fase positiva do fenômeno ENOS no Pacífico Equatorial.

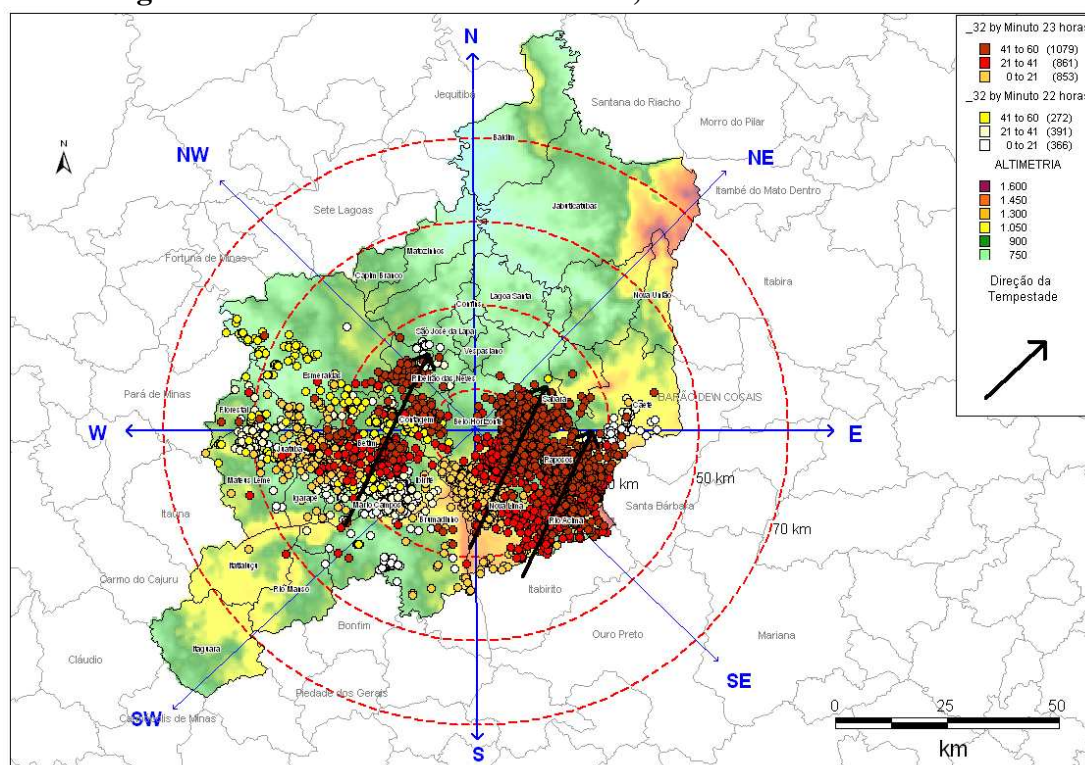
**Figura 42 – 31º evento: Dia 16/04/1992, às 2 horas GMT.**



Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

No 32º evento ocorrido no dia 18/11/1992, entre 22 e 23 horas GMT, uma extensa linha se formou e evoluiu desde o município de Florestal até Rio Acima, atingindo vários outros municípios. Alguns núcleos tiveram sua origem fora da RMBH como os vetores próximos à Nova Lima e Raposos. Percebe-se também que a topografia teve papel atuante na formação e deslocamento dos núcleos, ora intensificando o sistema, ora apenas convergindo-o para uma determinada direção. A direção predominante foi de SW-NE com deslocamento superficial acima de 40 km. Ressalta-se nessa tempestade o pico máximo de ocorrência de raios já na dissipação dos núcleos, mas com registro acima de 800 raios a cada vinte minutos, muito elevado em relação aos observados até o momento. Nessa data não havia nenhum fenômeno atuando sobre a TSM do Pacífico Equatorial. (FIG.43)

**Figura 43 – 32º evento: Dia 18/11/1992, entre 22 e 23 horas GMT.**

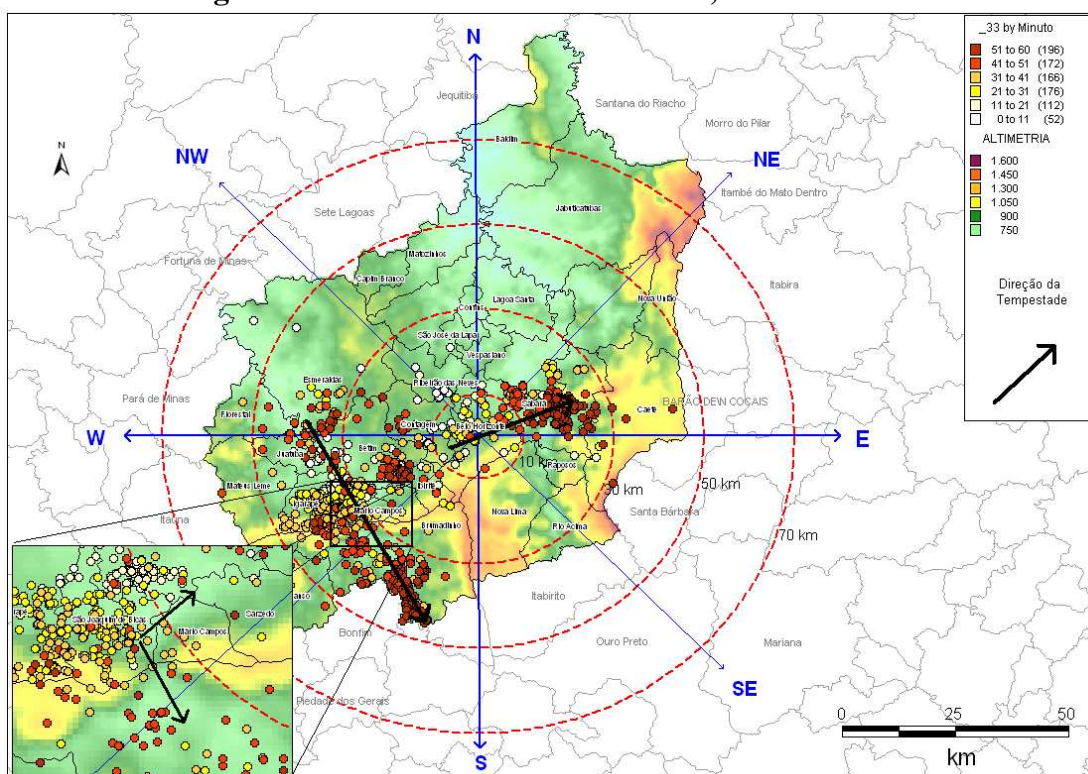


Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

O 33º evento de tempestade registrada na RMBH, ocorreu no dia 22/02/1993, à 1 hora GMT. Os núcleos se formaram a princípio de forma aleatória, entretanto, houve intensificação e deslocamento de uma linha entre Esmeraldas e Betim que, ao encontrar a topografia local, de dividiu em dois vetores, FIG. 44. Uma linha persistiu na direção sul no quadrante SW, onde encontrou uma passagem causada pelo rebaixamento da topografia (vide anexo da figura) e outro vetor seguiu por Belo Horizonte até Sabará percorrendo a encosta norte das serras do Rola Moça e do Curral, com orientação W-E (inclinação SW-NE). O deslocamento mais longo do vetor do quadrante SW percorreu 55 km aproximadamente ao passo que o outro núcleo teve deslocamento médio de 30 km. Nessa data não havia nenhum fenômeno atuando sobre a TSM do Pacífico Equatorial.



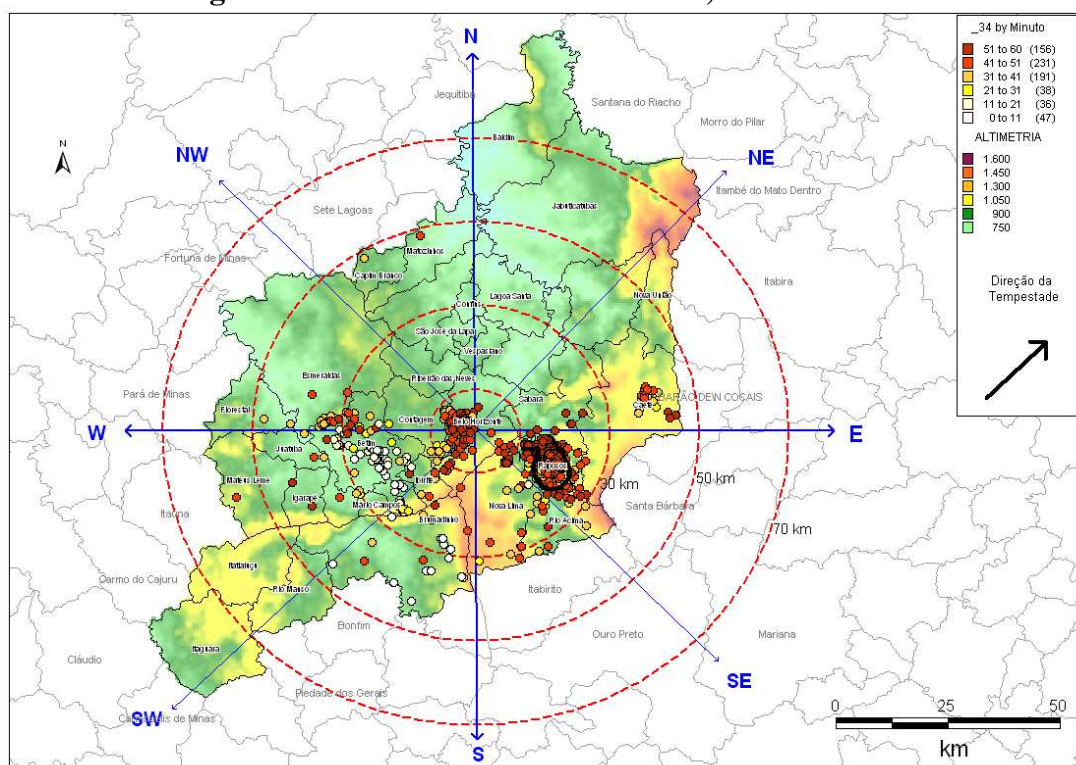
**Figura 44 – 33º evento: Dia 22/03/1993, à 1 hora GMT.**



Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

O evento seguinte do dia 01/03/1993, à 0 hora GMT, foi caracterizado por núcleos mais concentrados e esparsos. Porém um núcleo mais intenso no quadrante NE, na divisa entre os municípios de Nova Lima e Raposos, se destacou como uma tempestade mais forte. As características de evolução e desenvolvimento dessa tempestade deixam a entender que houve uma formação convectiva muito bem localizada com expansão radial, sem deslocamento propriamente dito. Também se observou um núcleo com essas características na cidade de Belo Horizonte, com formação localizada e sem deslocamento expressivo, FIG. 45 abaixo. Nessa data não havia nenhum fenômeno atuando sobre a TSM do Pacífico Equatorial.

**Figura 45 – 34º evento: Dia 01/03/1993, à 0 hora GMT.**



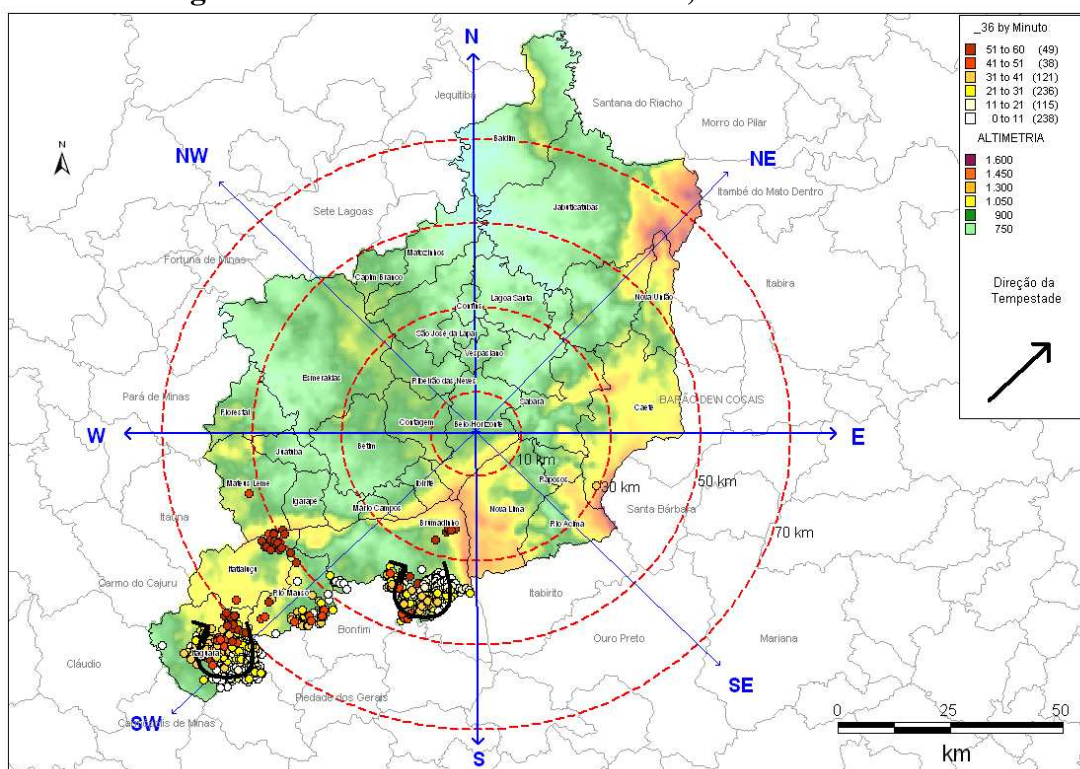
Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

Exatamente um mês após a última tempestade analisada, em 01/04/1993, às 18 horas GMT, um novo núcleo formou-se entre Belo horizonte, Nova Lima, Sabará e Raposos. Apesar das dimensões desse núcleo (raio de 15 km aproximadamente), sua atuação também foi localizada sem deslocamento mais expressivo. Pode-se considerar que seu desenvolvimento se deu radialmente, ou seja, um núcleo central com crescimento para todos os lados, FIG. 46. Núcleos esparsos de fraca intensidade foram observados em outras localidades da RMBH. Nessa data não havia nenhum fenômeno atuando sobre a TSM do Pacífico Equatorial.





**Figura 47 – 36º evento: Dia 15/04/1993, às 23 horas GMT.**



**Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)**

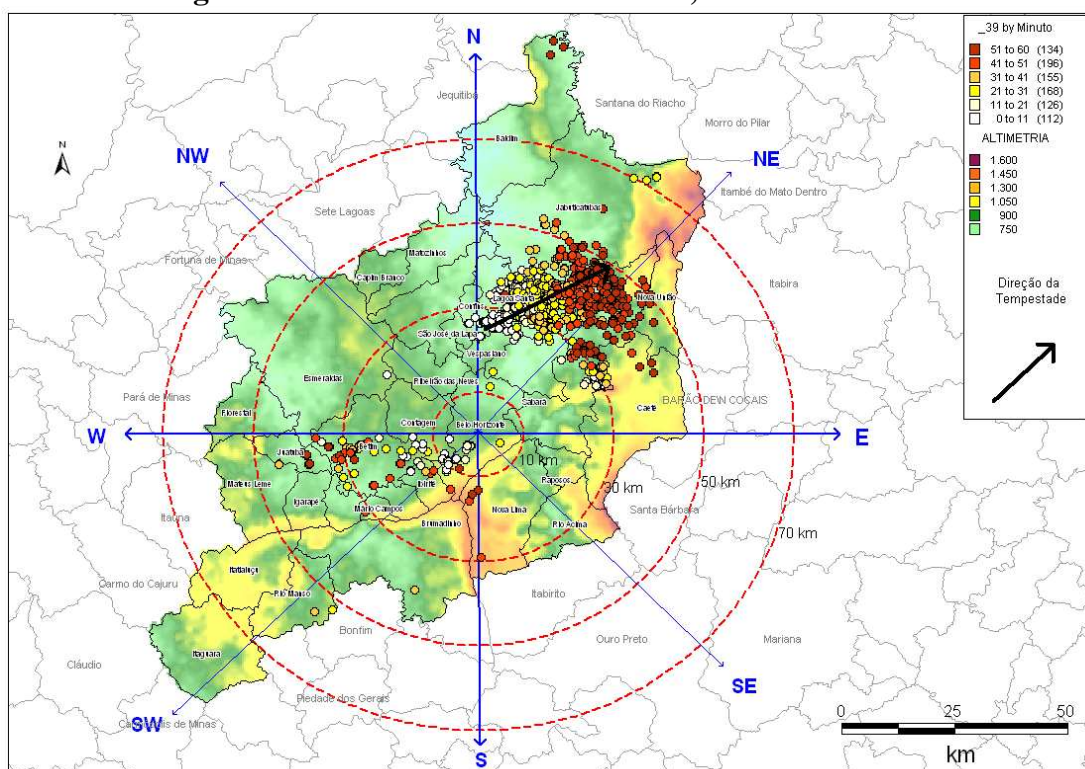
Algumas horas após o evento anterior, dia 16/04/1993, às 2 horas GMT, uma linha de instabilidade se formou no município de Esmeraldas, com intensificação na divisa de Contagem e Betim se deslocando em direção a capital, quando a atingiu por volta de 3 horas GMT, FIG. 48. Sua dissipação se deu próximo à serra do Curral, mais precisamente na encosta norte. Essa tempestade percorreu aproximadamente 35 km com uma largura média de 10 km e teve sua orientação de trajetória de NW-NE. Nessa data não havia nenhum fenômeno atuando sobre a TSM do Pacífico Equatorial.







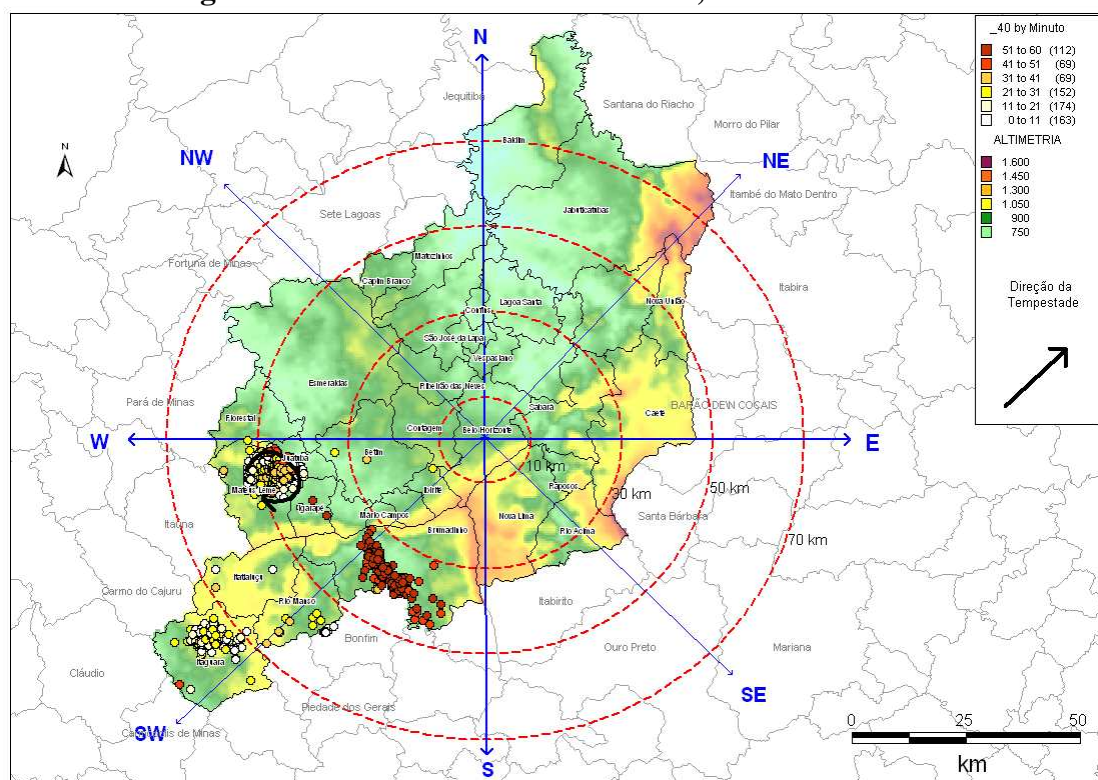
**Figura 50 – 39º evento: Dia 23/09/1993, às 19 horas GMT.**



Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

O 40º evento da FIG. 51, ocorrido no dia 09/11/1993, apesar de atender ao pré-requisito desta tese, atuou muito bem localizado, sem deslocamento aparente considerável com atuação de três núcleos distintos, todos no quadrante SW, sendo que, o núcleo formado entre Mateus Leme e Igarapé se destacou por sua magnitude superior aos demais. Nessa data não havia nenhum fenômeno atuando sobre a TSM do Pacífico Equatorial.

**Figura 51 – 40º evento: Dia 09/11/1993, às 20 horas GMT.**

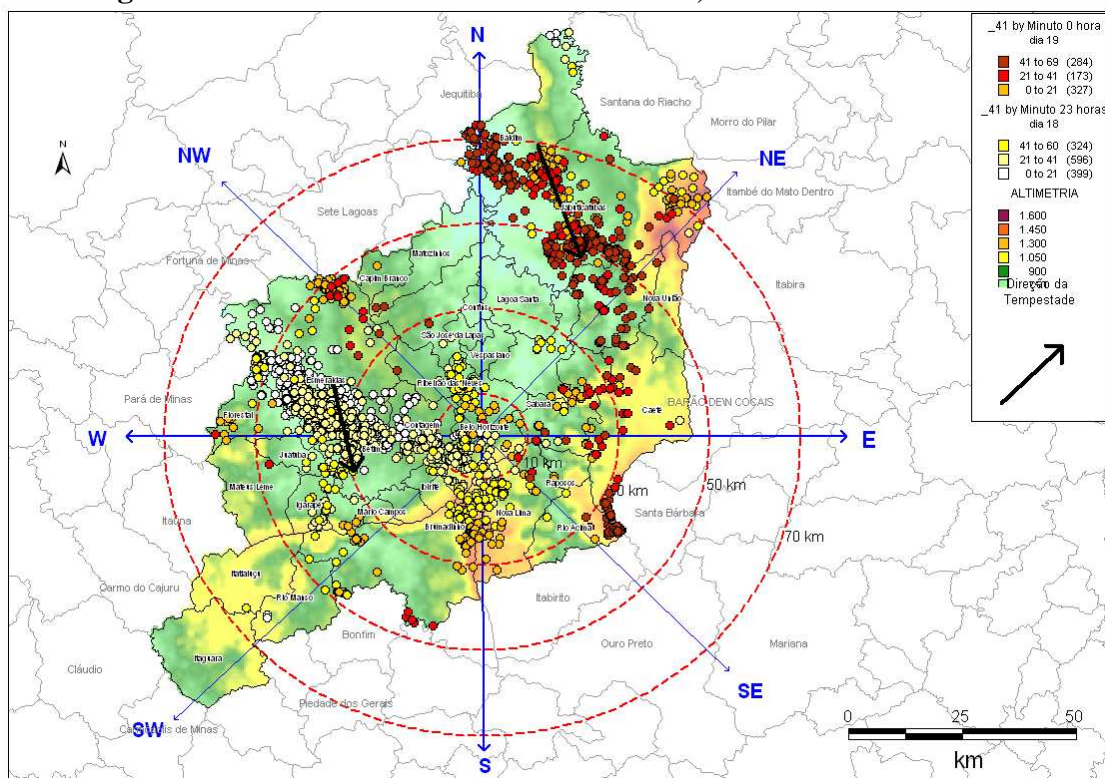


**Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)**

Entre os dias de 18 e 19 de novembro de 1993, entre 23 e 0 hora GMT, várias linhas de instabilidade se formaram ao longo de toda a RMBH. Uma extensa formação convectiva começou a surgir entre Esmeraldas, Betim, Contagem, Belo Horizonte e Nova Lima, FIG. 52. A direção de sua trajetória foi orientada de N-S (leve inclinação NW-NE) com distância média percorrida de 20 km. Outro núcleo se destacou mais ao norte da RMBH, formando-se nos municípios de Baldim e Jaboticatubas, percorrendo 25 km médios e se deslocando de N-S também. Nessa data não havia nenhum fenômeno atuando sobre a TSM do Pacífico Equatorial.



**Figura 52 – 41º evento: Dias 18 e 19 /11/1993, entre 23 e o hora GMT.**



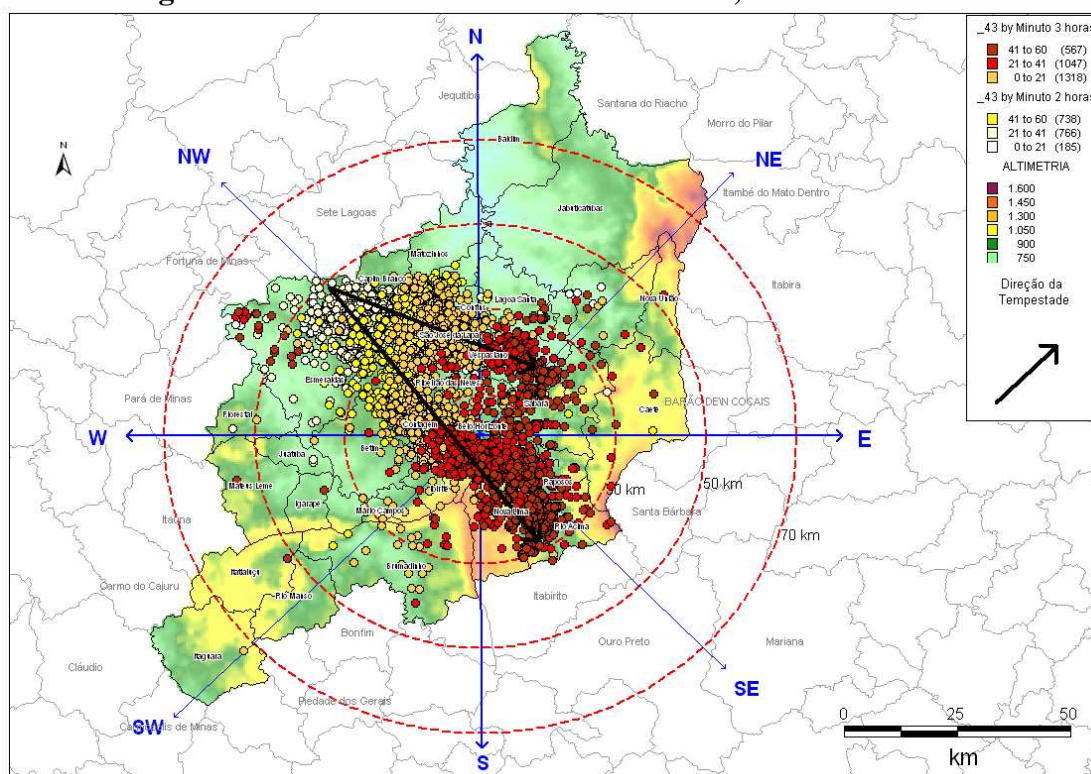
Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

Os eventos ocorridos no dia 02/12/1993, às 15 horas GMT, FIG. 53 (observou-se duas formações distintas) representam tempestades isoladas com formação convectiva de curta duração, mas com magnitude alta. Na figura abaixo se observa um núcleo que se formou ao norte da RMBH com largura média de 15 km e trajetória de mais de 50 km de distância percorrida. Esse evento teve sua direção inicial de NE-SW alterada em seu percurso para E-W justamente no momento de elevação da atividade elétrica. Esse fato, segundo alguns autores, pode estar relacionado à própria evolução do sistema convectivo, à influência de algum fator climático ou mesmo à alteração nos padrões de vento, associados à circulação geral da atmosfera. O evento localizado no quadrante SW tem sua orientação de SE-NW, indicando a provável alteração na circulação dos ventos naquele dia e horário. Esse evento teve distância percorrida inferior a 25 km e, em relação a topografia local, rompeu essa barreira indicando uma acentuação na sua atividade atmosférica, ou seja, a serra do Curral influenciou na intensificação desse sistema e não na sua dissipação ou mesmo alteração de sua trajetória. Nessa data não havia nenhum fenômeno atuando sobre a TSM do Pacífico Equatorial.





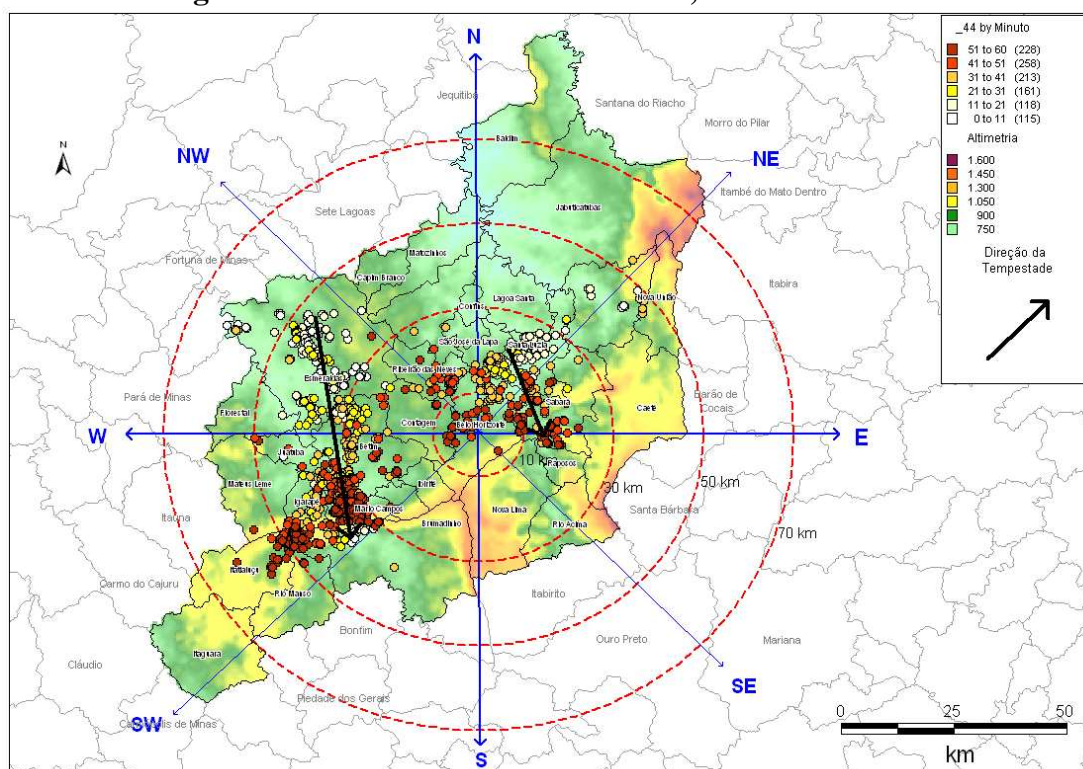
**Figura 54 – 43º evento: Dia 31/12/1993 entre, 2 e 3 horas GMT.**



Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

O 44º evento de tempestade ocorreu dia 24/03/1994, às 18 horas GMT. Alguns núcleos foram observados em várias localidades da RMBH com destaque para dois sistemas, sendo um a leste no quadrante NE, distância média percorrida de 20 km, formando-se no município de Santa Luzia e se dissipando na divisa dos municípios de Sabará e Raposos, orientado de N-S, FIG. 55. Outro núcleo a oeste com formação no quadrante NW e dissipação no quadrante SW, percorreu uma trajetória de mais de 45 km orientada N-S, tendo a topografia do sistema de serras no centro da RMBH como fator de obstáculo. Nessa data não havia nenhum fenômeno atuando sobre a TSM do Pacífico Equatorial.

**Figura 55 – 44º evento: Dia 24/03/1994, às 18 horas GMT.**

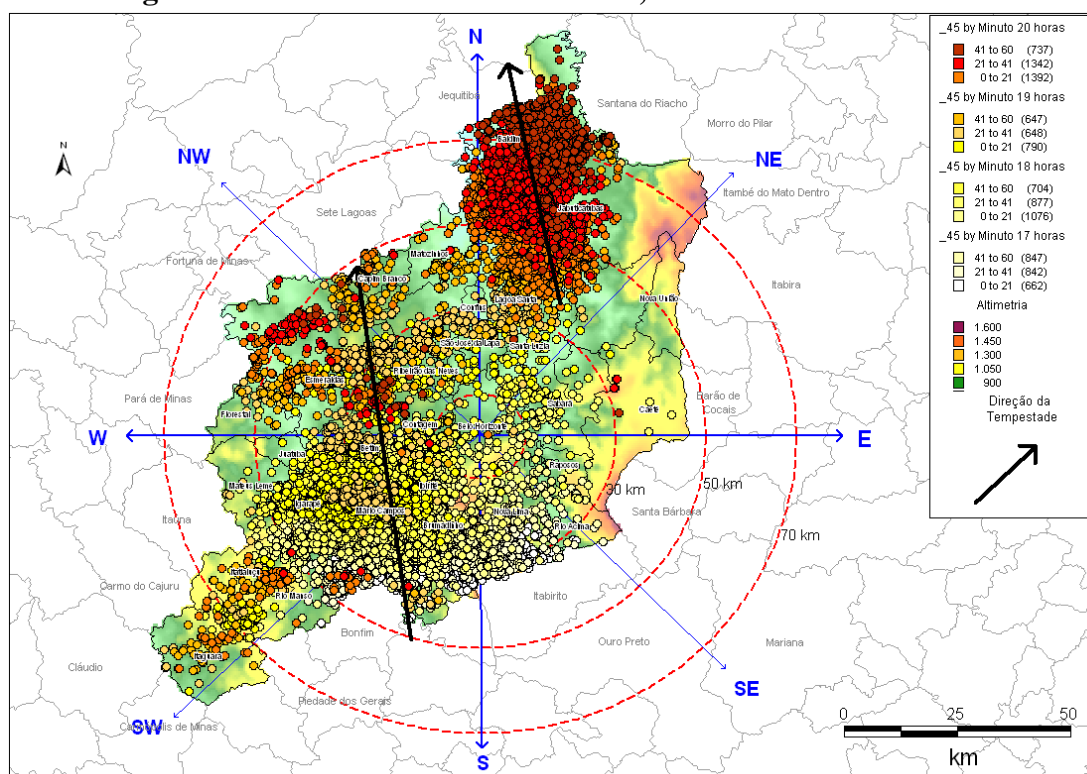


Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

A FIG. 56 abaixo representa as descargas atmosféricas registradas em um evento de chuva ocorrido no dia 03/11/1994, entre 17 e 20 horas GMT. Uma tempestade severa atingiu a RMBH praticamente por toda sua extensão territorial com trajetória orientada de S-N (leve declínio de NE-NW). Essa linha de instabilidade formou-se fora da região e percorreu toda a superfície extrapolando o limite norte nos municípios de Baldim e Capim Branco, por exemplo. Percorreu mais de 80 km com extensão (largura) maior que 50 km. Nesse evento observou-se a atuação de vários centros de baixa e alta pressão em virtude da ação ondulatória de circulação dos ventos, conforme FIG. 5.5. Esse evento teve magnitude forte com elevado registro de raios, registrando em alguns momentos mais de 1300 (mil e trezentos) raios em vinte minutos. Nessa data o fenômeno ENOS, na sua fase positiva, atuava sobre a TSM do Pacífico Equatorial de forma moderada.



**Figura 56 – 45º evento: Dia 03/11/1994, entre 17 e 20 horas GMT.**

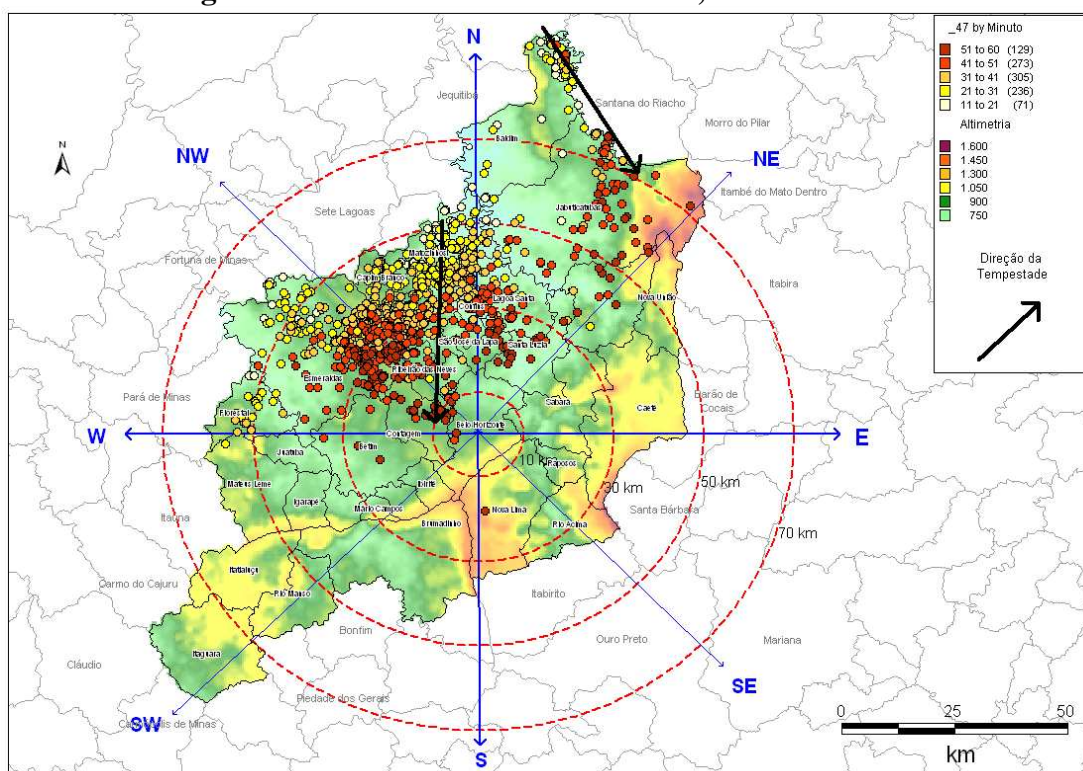


Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

O dia 22/01/1995, às 14 horas GMT, marcou o 46º evento de tempestade na RMBH. Uma linha de tempestade formou-se com maior intensidade na faixa oeste da região, com deslocamento no sentido W-E e mais de 35 km de distância percorrida, FIG. 57. O núcleo principal formou-se no município de Mateus Leme passando por Mário Campos, Ibitité, Belo Horizonte, transpondo a serra do Rola Moça e atingindo inclusive Brumadinho. Outros núcleos de fraca intensidade foram observados em outras localidades da RMBH. Nessa data o fenômeno ENOS, na sua fase positiva, atuava sobre a TSM do Pacífico Equatorial de forma moderada.



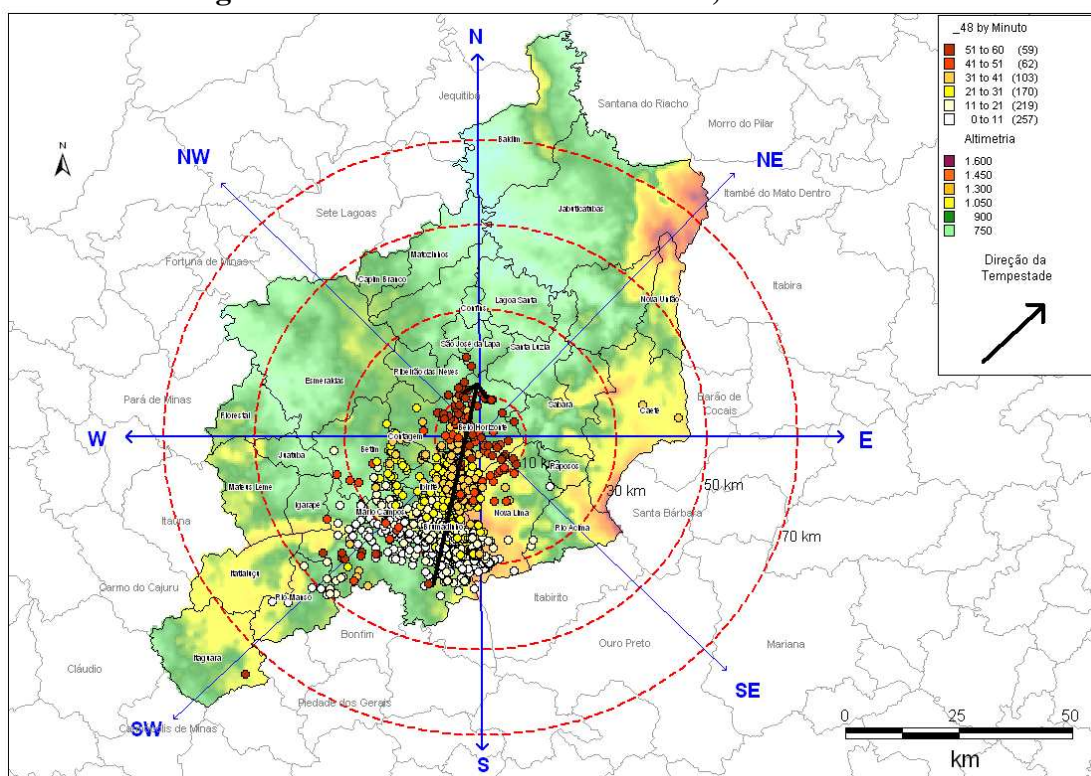
**Figura 58 – 47º evento: Dia 14/03/1995, às 9 horas GMT.**



Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

Ainda no ano de 1995 uma tempestade ocorrida no dia 03/10, à 0 (zero) hora GMT, formou-se no município de Brumadinho e se deslocou por aproximadamente 35 km até atingir a cidade de Belo Horizonte. Dessa forma, sua trajetória foi peculiar a diversos sistemas que atuam na RMBH orientando-se de S-N com leve declinação para NE, FIG. 59. A topografia local atuou como forçante na intensificação do sistema que entrou em dissipação após transpor as serras do Curral e Rola Moça. O final do ano de 1995 foi caracterizado pela atuação do La Niña, fase negativa do fenômeno ENOS.

**Figura 59 – 48º evento: Dia 03/10/1995, à 0 hora GMT.**

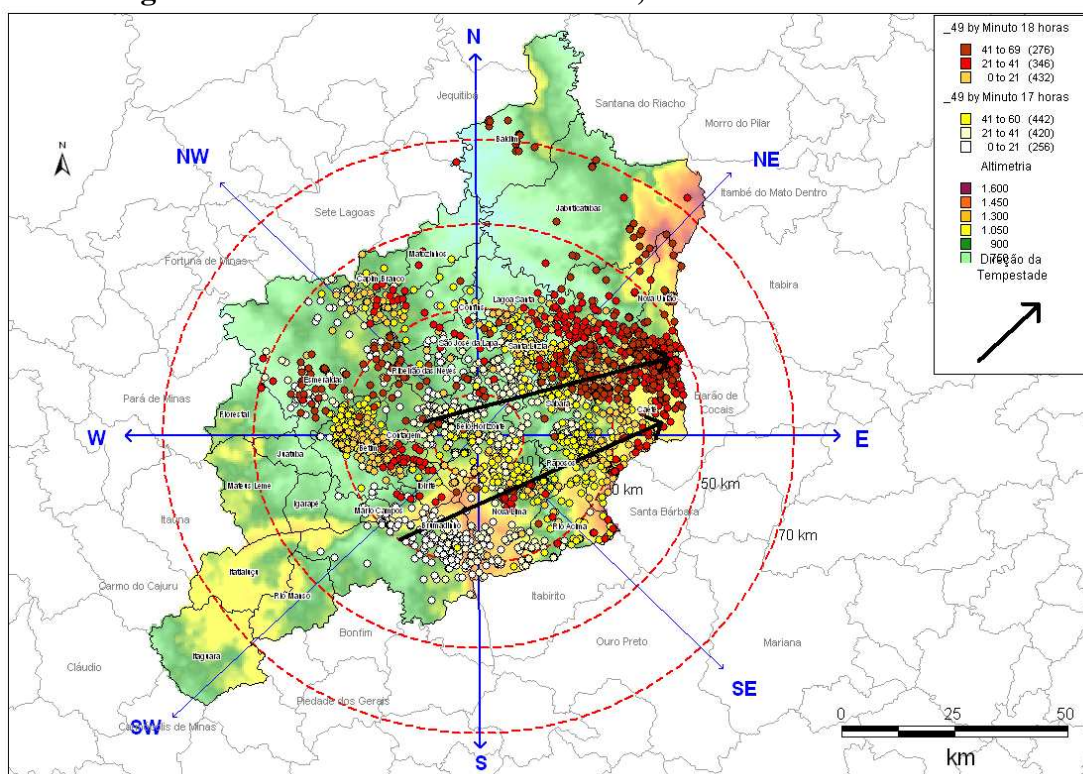


Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

Três dias após a tempestade analisada anteriormente, um novo sistema convectivo atuou com força moderada a forte sobre o território da RMBH. Esse evento ocorreu no dia 06/10/1995, entre 17 e 18 horas GMT, com a formação e desenvolvimento de vários núcleos por toda a região, se intensificando com maior destaque na região central com deslocamento superficial de aproximadamente 60 km médios, ocupando uma extensa faixa de mais de 50 km e orientação de trajetória W-E com declínio de SW-NE. Esse sistema se desenvolveu em todos os quadrantes analisados na RMBH, FIG. 60. Nessa data o fenômeno ENOS, em sua fase negativa, atuava de forma moderada no Pacífico Equatorial.



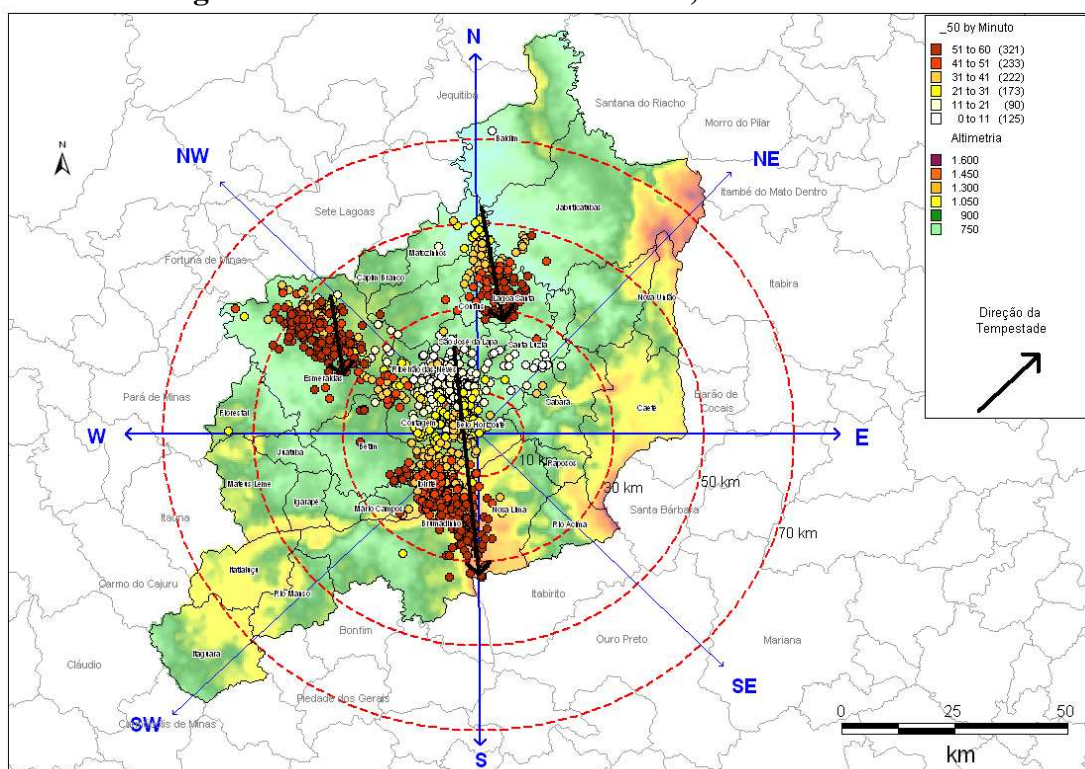
**Figura 60 – 49º evento: Dia 06/10/1995, entre 17 e 18 horas GMT.**



Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

O 50º evento, ocorrido dia 15/10/1995, às 19 horas GMT, FIG. 61 abaixo, registrou uma forte tempestade com três núcleos principais com sentido de deslocamento de N-S para todos eles. Um núcleo principal, sendo o primeiro a se estabelecer, formou-se em São José da Lapa e percorreu aproximadamente 60 km até se dissipar em Brumadinho divisa com Nova Lima. Em sua trajetória passou ao oeste de Belo Horizonte e Contagem, com forte intensidade atmosférica. A topografia atuou como forçante na intensificação convectiva desse sistema, percebeu-se um aumento dos raios após transpor a serra do Curral. Os outros núcleos com características similares atuaram mais ao norte desse primeiro, sendo um no quadrante NW e outro no quadrante NE, ambos percorrendo 20 km aproximadamente. Nessa data o fenômeno ENOS, em sua fase negativa, atuava de forma moderada no Pacífico Equatorial.

**Figura 61 – 50º evento: Dia 15/10/1995, às 19 horas GMT.**



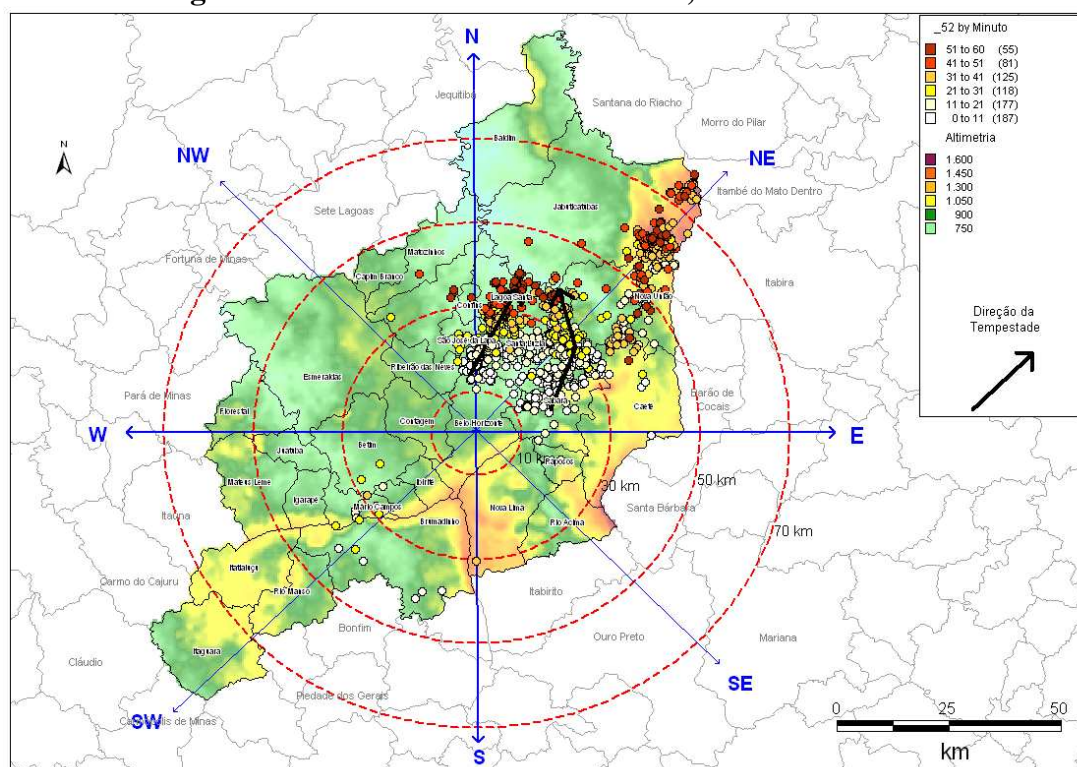
Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

O evento seguinte atuou no mesmo dia da tempestade analisada anteriormente, entretanto na virada de um dia para o outro, dias 15 e 16/10/1995, entre 23 e 0 hora GMT. Uma forte linha de instabilidade se formou a oeste da RMBH, FIG. 62, quando se fortaleceu e se deslocou para no sentido NW-NE. Um núcleo atingiu a região central, próximo ao município de Contagem, percorrendo aproximadamente 60 km e outro teve sua trajetória no sentido do município de Brumadinho, perfazendo mais de 80 km de distância entre a origem e sua dissipação. Atuou em vários municípios com uma largura de aproximadamente 35 km. Pelo mapa abaixo, percebe-se a influência da topografia como forçante na intensificação do sistema convectivo, pois o número de raios após as serras (Rola Moça, Azul, e Curral) aumentou consideravelmente. Nessa data o fenômeno ENOS, em sua fase negativa, atuava de forma moderada no Pacífico Equatorial.





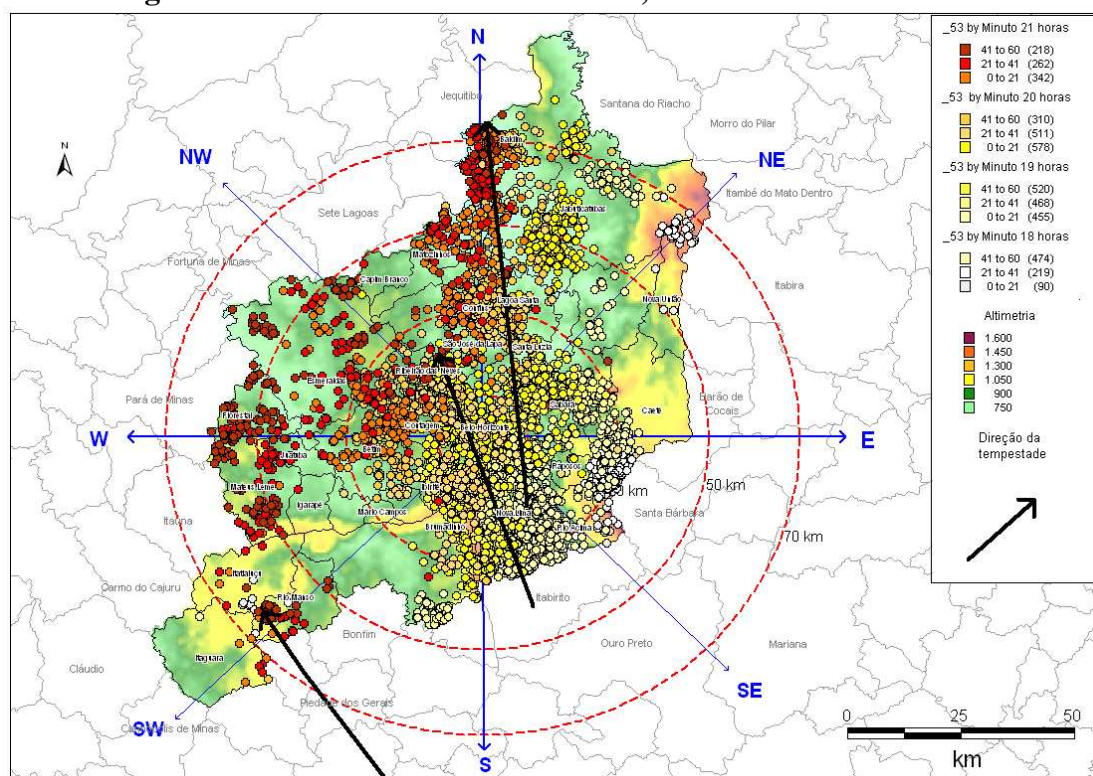
**Figura 63 – 52º evento: Dia 03/12/1995, às 18 horas GMT.**



**Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)**

Uma forte chuva provocou descargas atmosféricas por toda a RMBH no dia 10/02/1996, entre 18 e 21 horas GMT, FIG. 64. Vários núcleos foram observados dentro da região de estudo, porém a principal linha de instabilidade formou-se fora da região, mais ao sul do estado, percorrendo uma distância superior a 80 km. A trajetória observada por todo o sistema meteorológico, que atuou nesse dia, foi SE-NW com vários núcleos se formando na frente do sistema por onde ele atuou, conforme onda de circulação dos centros de alta e baixa pressão, FIG. 5.5, com pico de atividade elétrica entre 19 e 20 horas GMT. Nessa data o fenômeno ENOS, em sua fase negativa, atuava de forma moderada no Pacífico Equatorial.

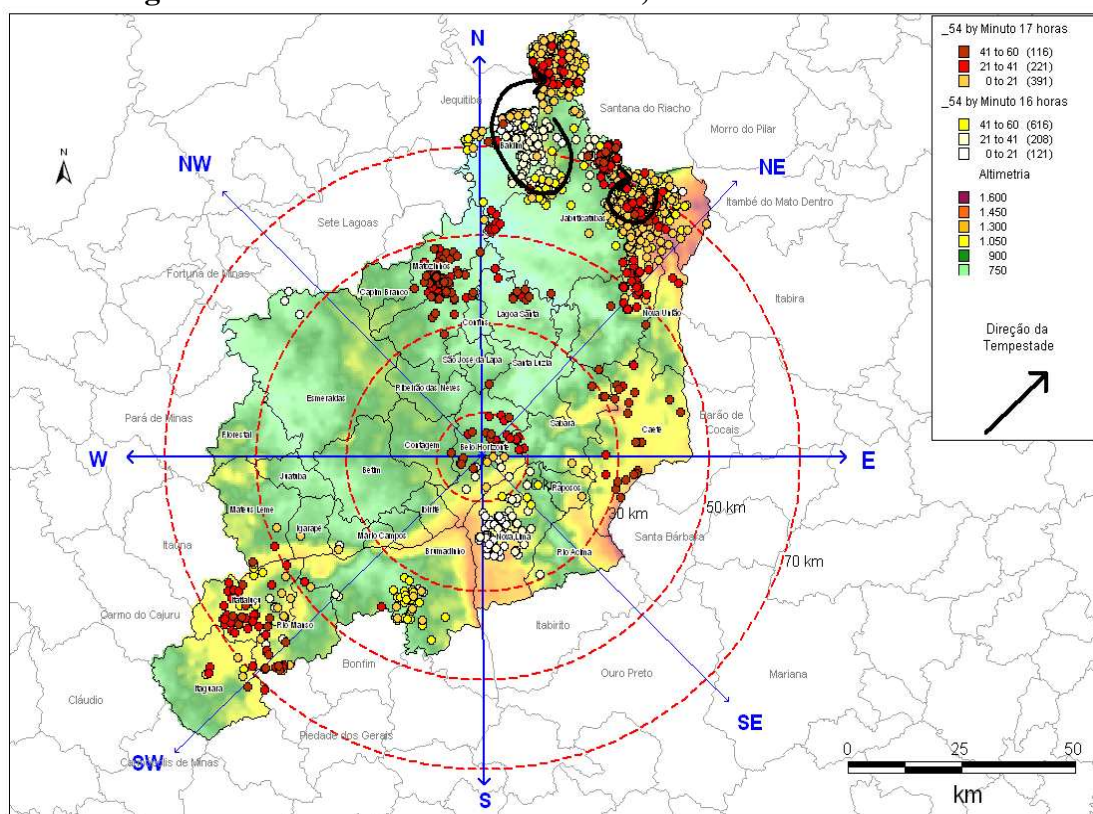
**Figura 64 – 53º evento: Dia 10/02/1996, entre 18 e 21 horas GMT.**



Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

O 54º evento ocorrido no dia 25/02/1996, entre 16 e 17 horas GMT, foi caracterizado por diversos núcleos distribuídos pela RMBH, FIG. 65. Entretanto, vale destacar dois núcleos mais intensos ao norte da região, no quadrante NE, sendo um no município de Jaboticatubas e outro em Baldim. Esse, localizado no município de Baldim, desenvolveu-se de tal forma que extrapolou a região de estudo. Porém, ambos os casos podem ser considerados como núcleos convectivos isolados, pois não houve deslocamento superficial considerável. Nessa data o fenômeno ENOS, em sua fase negativa, atuava de forma moderada no Pacífico Equatorial.

**Figura 65 – 54º evento: Dia 25/02/1996, entre 16 e 17 horas GMT.**



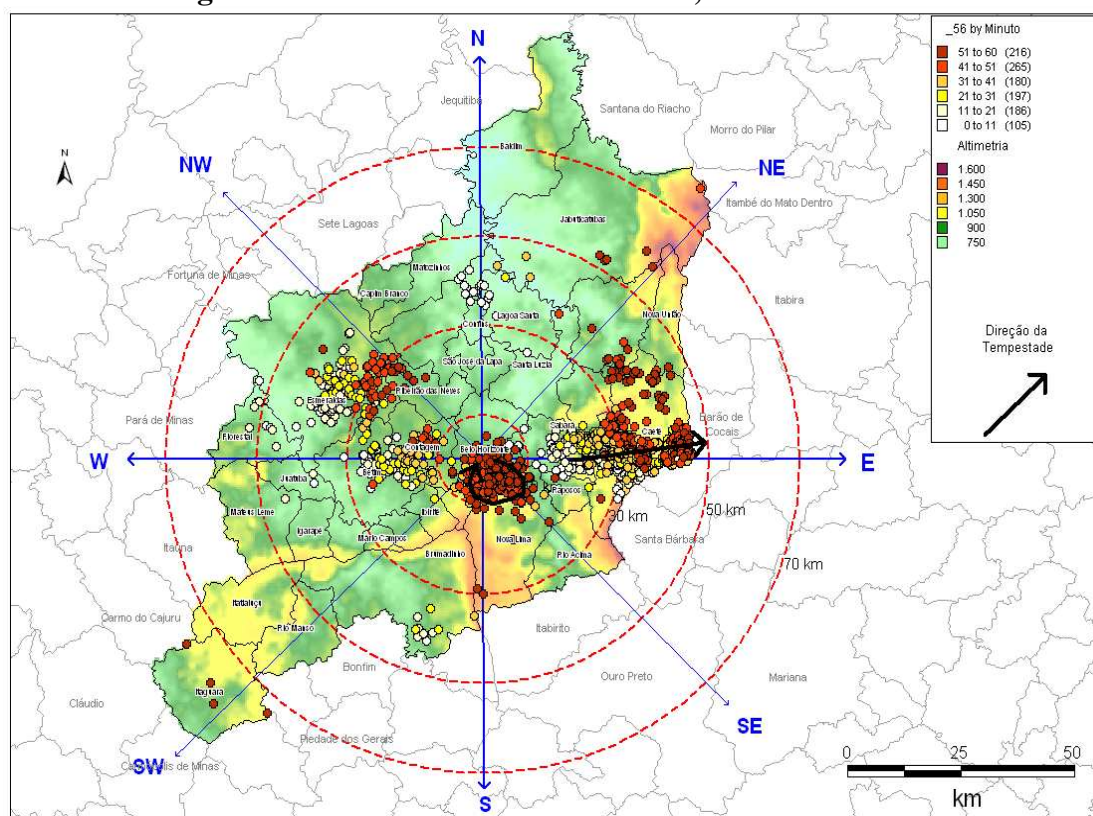
**Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)**

No dia seguinte, 26/02/1996, às 16 horas GMT, ao evento analisado anteriormente, uma nova tempestade foi registrada na RMBH. Ressalta-se que nesse período do ano é comum a atuação de sistemas frontais e formação de linhas de instabilidade, bem como a formação de núcleos convectivos em virtude da alta umidade disponível e elevação da temperatura, ingredientes fundamentais para a convecção. Portanto, conforme FIG. 66, dois núcleos se formaram e se desenvolveram na faixa oeste da RMBH, no quadrante NW. A trajetória desenvolvida em ambos os casos foi de N-S percorrendo uma distância média superior a 15 km. Apesar da característica de tempestade severa, esse evento, pelo número de raios e pela formação espacial, pode ser considerado de intensidade fraca a moderada. Nessa data o fenômeno ENOS, em sua fase negativa, atuava de forma moderada no Pacífico Equatorial.





**Figura 67 – 56º evento: Dia 21/03/1996, às 17 horas GMT.**



**Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)**

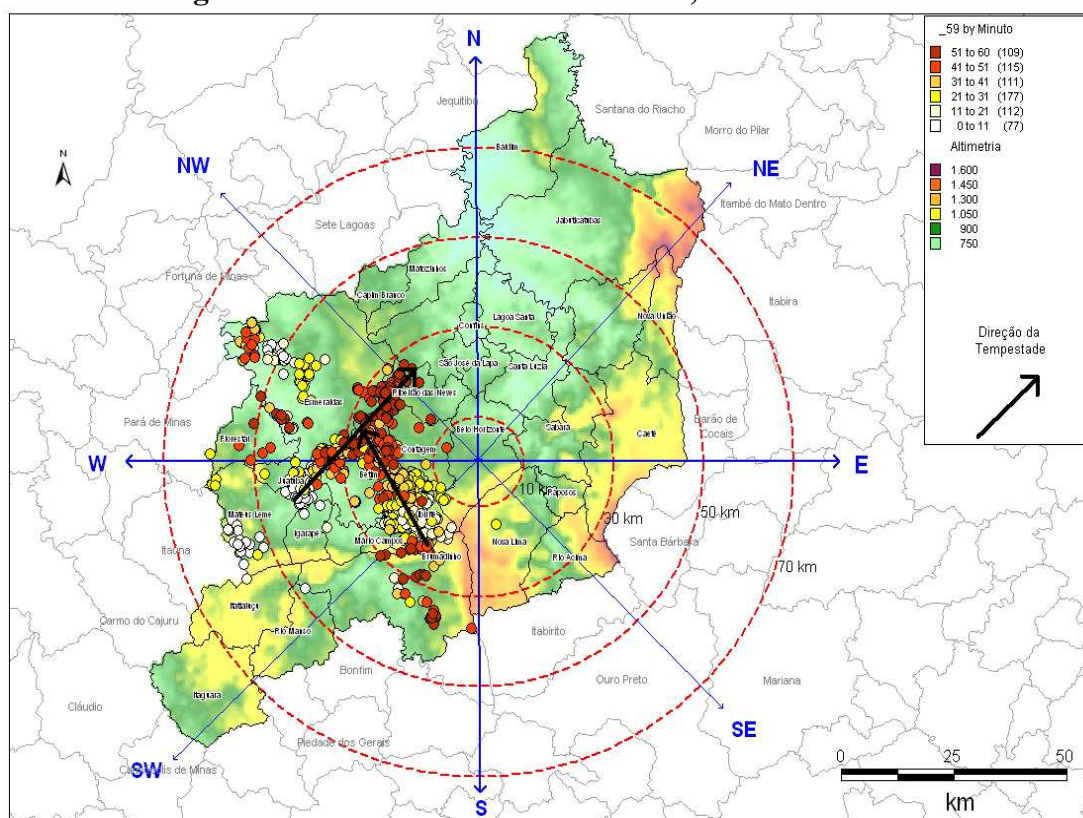
O 57º evento de tempestade analisado, ocorrido no dia 23/03/1996, às 20 horas GMT, foi caracterizado por dois núcleos principais, sendo um ao norte da RMBH no quadrante NE e outro próximo ao centro entre os quadrantes NE e SE, FIG. 68. A direção de trajetória formada pelos dois núcleos foi de NE-NW com uma quebra na trajetória no núcleo localizado ao Norte. A distância média de ambos os casos foi superior a 25 km, com uma hora de duração média com pico de atividade elétrica no início de formação do sistema convectivo. Nessa data o La Niña ainda atuava com fraca intensidade e já demonstrava sinal de dissipação no Pacífico Equatorial.







**Figura 70 – 59º evento: Dia 13/01/1998, às 19 horas GMT.**

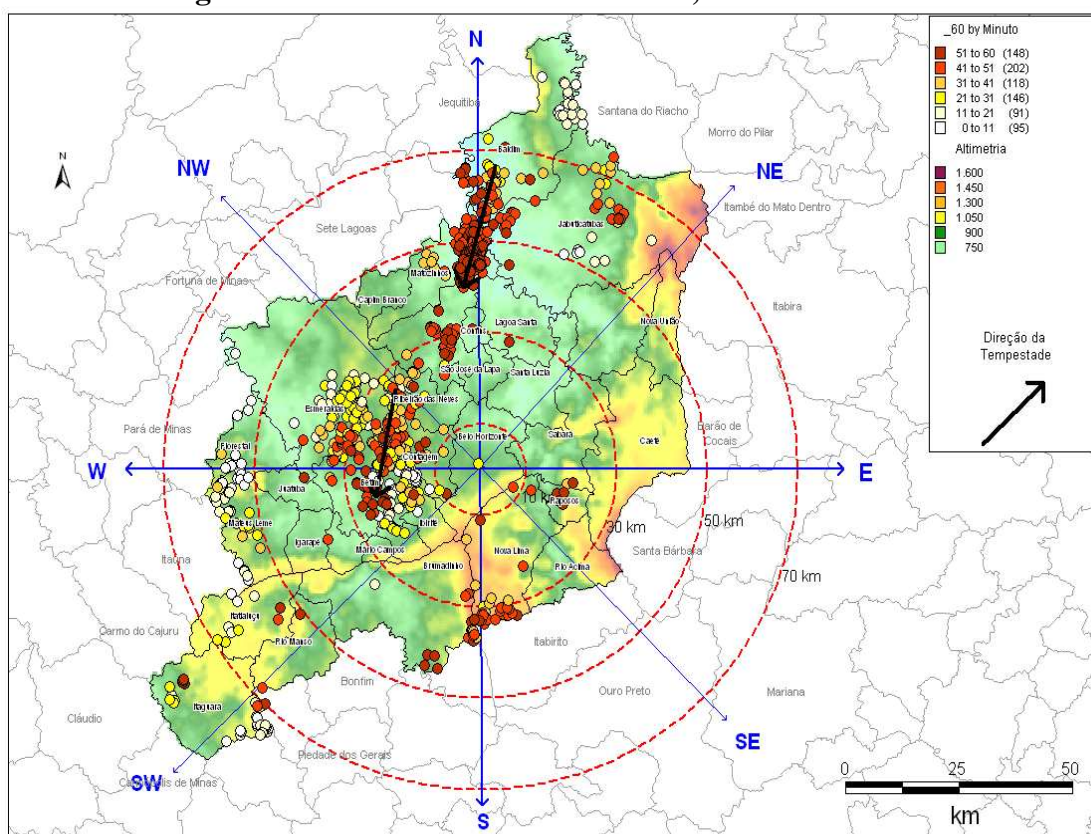


**Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)**

O evento do dia 15/12/1998, às 15 horas GMT, formou-se na faixa norte da RMBH com destaque para os núcleos de Baldim e Ribeirão das Neves, FIG 71. Ambos os casos tiveram o mesmo sentido de trajetória N-S, com deslocamento médio superficial de 25 km. Podem-se considerar sistemas meteorológicos de fraca intensidade. Nessa data o ENOS atuava na sua forma negativa (La Niña) com intensidade moderada na TSM do Pacífico Equatorial.



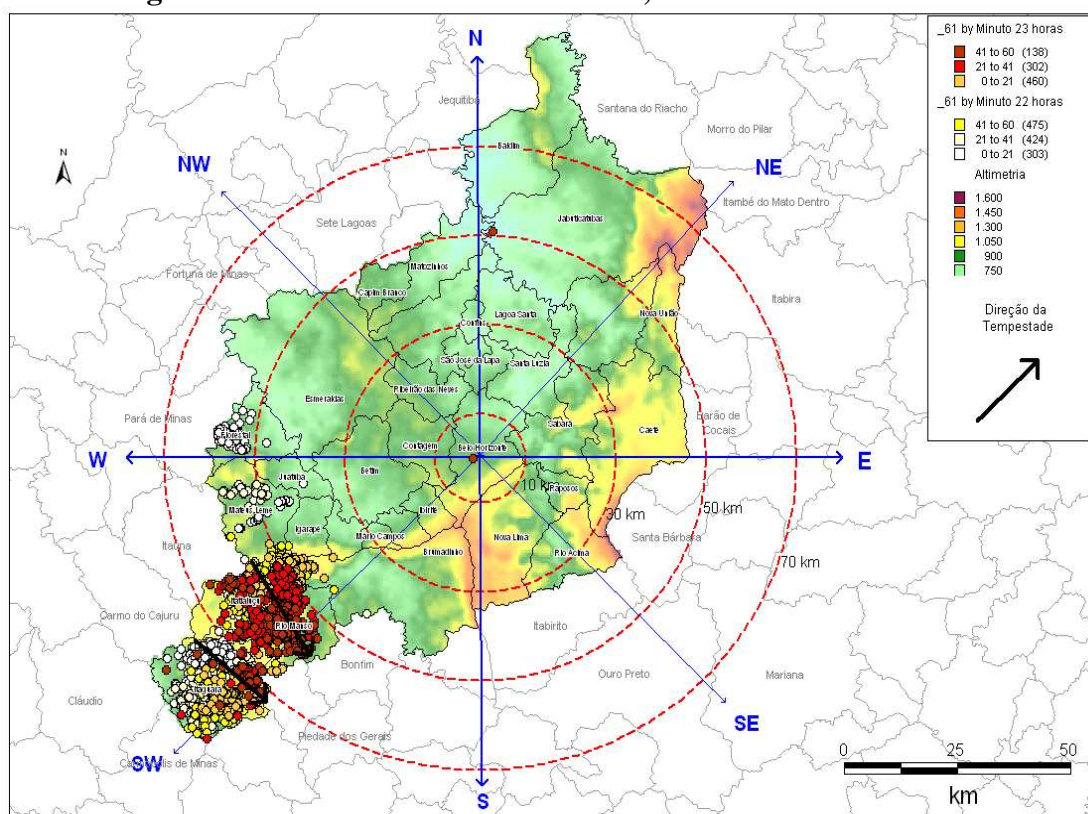
**Figura 71 – 60° evento: Dia 15/12/1998, às 15 horas GMT.**



Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

O 61º evento, ocorrido no dia 24/12/1998, entre 22 e 23 horas GMT, concentrou-se no quadrante SW nos municípios de Itaguara e Rio Manso. Pela formação e desenvolvimento do sistema convectivo, dois núcleos se destacaram com sentido de deslocamento NW-SE. A distância média percorrida foi de 25 km. Apesar da concentração de atuação nesses dois municípios, esse sistema teve sua origem fora da RMBH e se dissipou também fora dos limites da área estudada, FIG. 72. Ressalta-se ainda que esse evento teve forte atividade elétrica com duração média de duas horas. Nessa data o fenômeno ENOS, na sua fase negativa, atuava com intensidade moderada no Pacífico Equatorial.

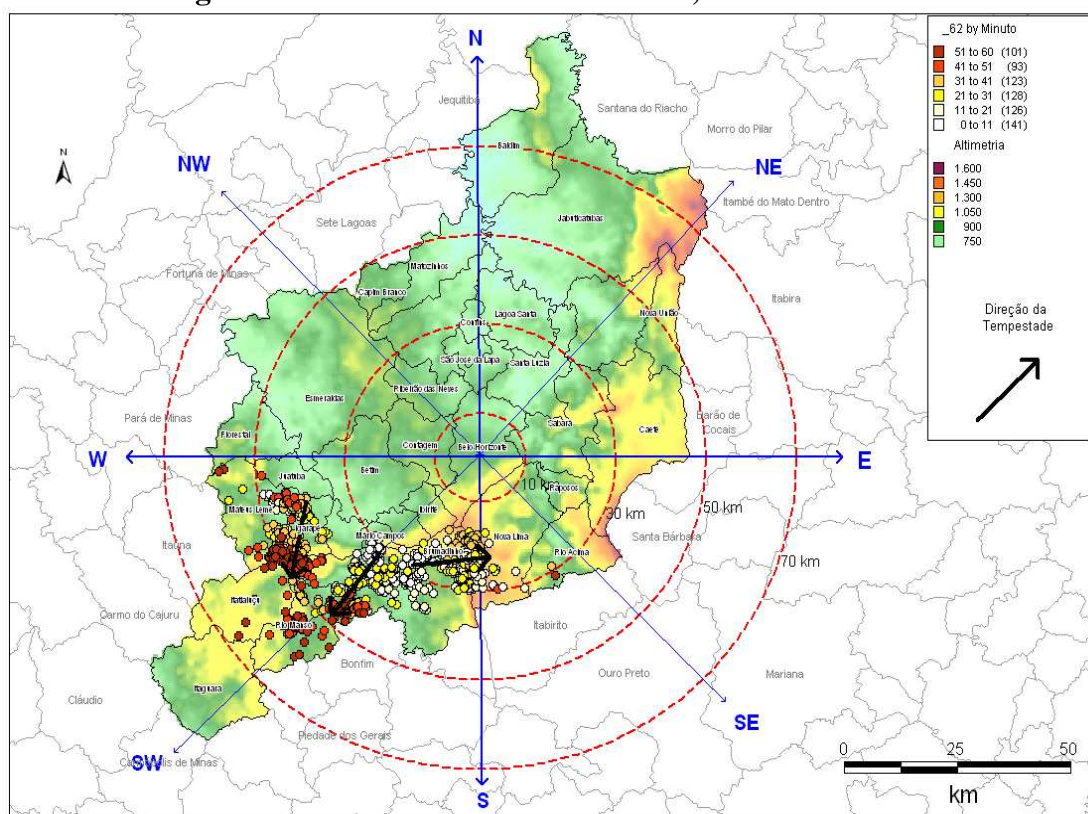
**Figura 72 – 61º evento: Dia 24/12/1998, entre 22 e 23 horas GMT.**



**Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)**

O evento seguinte analisado, ocorrido no dia 16/02/1999, às 17 horas GMT, tem uma característica espacial peculiar. Podem-se observar núcleos formados em diferentes áreas de atuação com forte influência da topografia, FIG. 73 abaixo. Apesar da variação espacial observada na formação e desenvolvimento dos núcleos, todo o sistema se concentra mais uma vez no quadrante SW. Quanto às trajetórias observadas, há uma predominância no sentido NE-SW, mas com um núcleo divergente com sentido W-E chegando a atingir o quadrante SE entre os municípios de Brumadinho e Nova Lima. A distância percorrida foi de 17 km médios. Nessa data o fenômeno ENOS, na sua fase negativa, atuava com intensidade moderada no Pacífico Equatorial.

**Figura 73 – 62º evento: Dia 16/02/1999, às 17 horas GMT.**

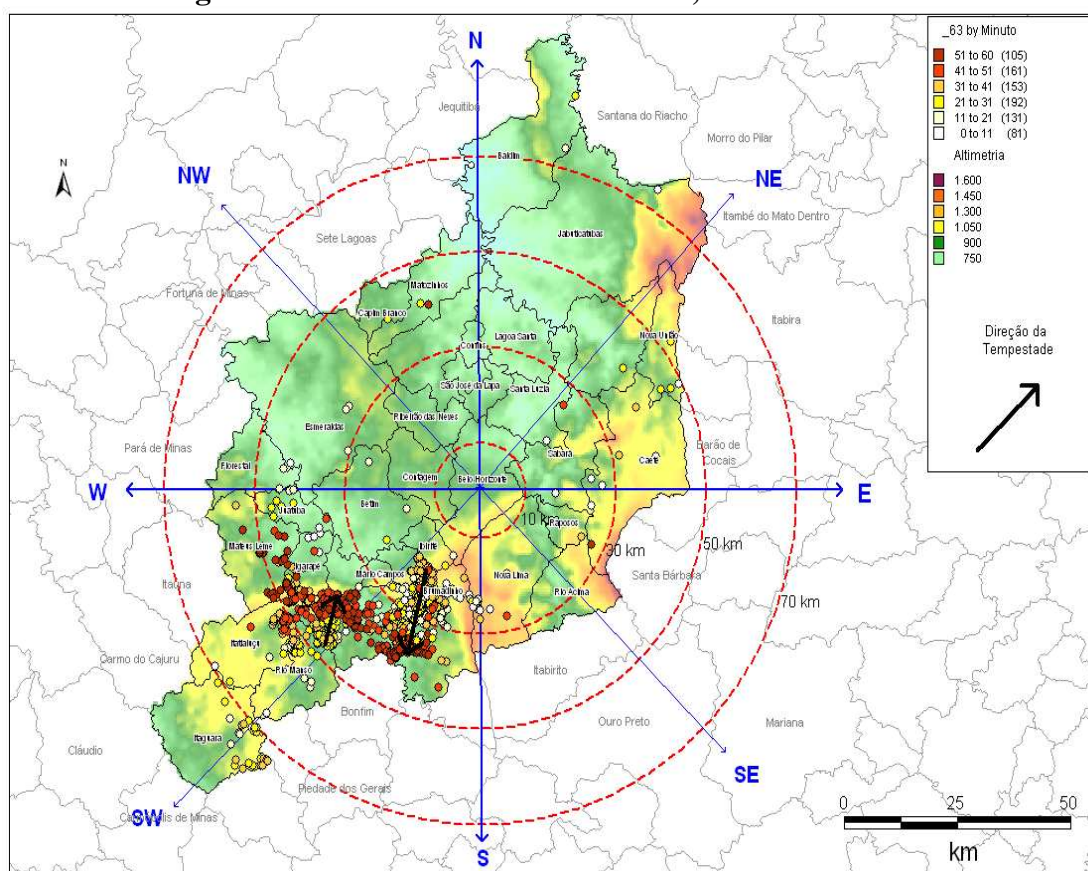


**Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)**

O 63º evento de tempestade severa na RMBH, analisado nesse estudo, ocorreu dia 06/03/1999, às 19 horas GMT, FIG.74. Mais uma vez o quadrante em que se formou e se desenvolveu o sistema convectivo foi o SW. Esse sistema apresenta trajetórias divergentes, sendo o primeiro núcleo com sentido de deslocamento N-S e um segundo núcleo, ocorrido aproximadamente 20 minutos após o primeiro, com sentido de deslocamento ao contrário, sendo S-N. A distância percorrida foi de 17 e 10 km respectivamente, com possibilidade de forte influência da topografia local, fato esse que pode ter contribuído para a mudança de trajetória do sistema convectivo. Nessa data o La Niña atuava com intensidade moderada no Pacífico Equatorial.



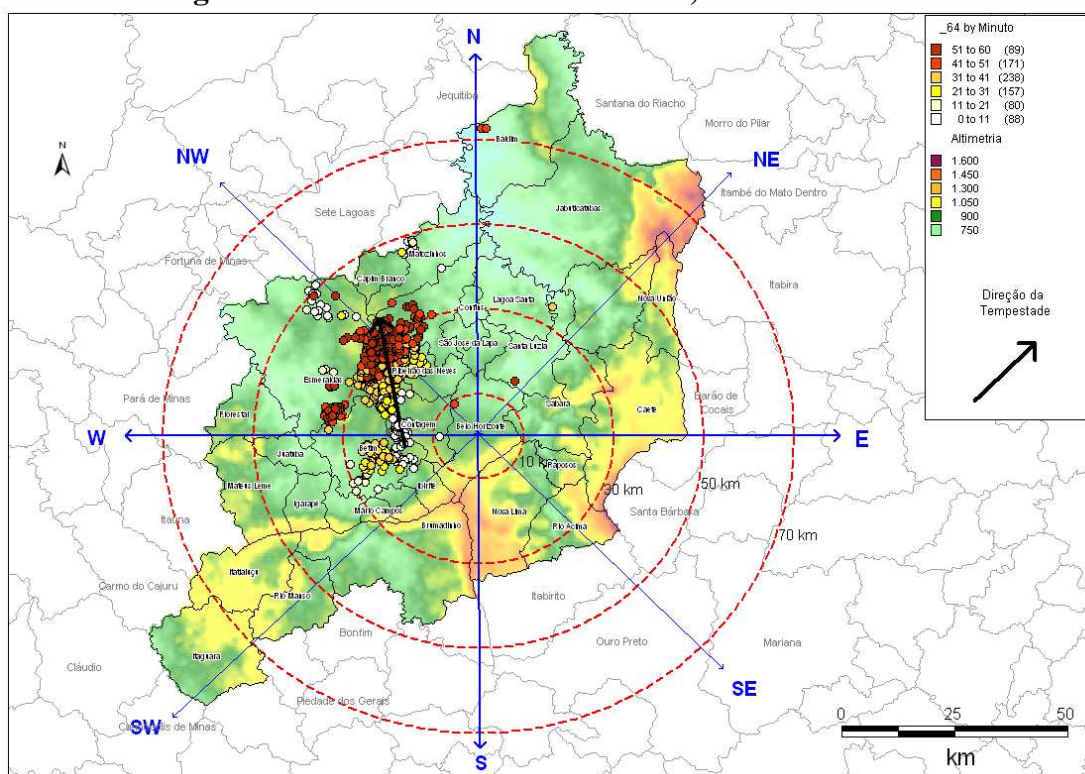
**Figura 74 – 63º evento: Dia 06/03/1999, às 19 horas GMT.**



Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

O evento do dia 25/02/2000, às 21 horas GMT, se formou na divisa dos quadrantes SW e NW, próximo aos municípios de Contagem e Betim, FIG. 75. A trajetória do sistema foi orientada no sentido S-N com 30 km médios percorridos, dissipando-se nos municípios de Esmeraldas e Pedro Leopoldo, quando foi observada máxima atividade elétrica. Nessa data o fenômeno La Niña ainda atuava no Pacífico Equatorial com intensidade moderada.

**Figura 75 – 64º evento: Dia 25/02/2000, às 21 horas GMT.**



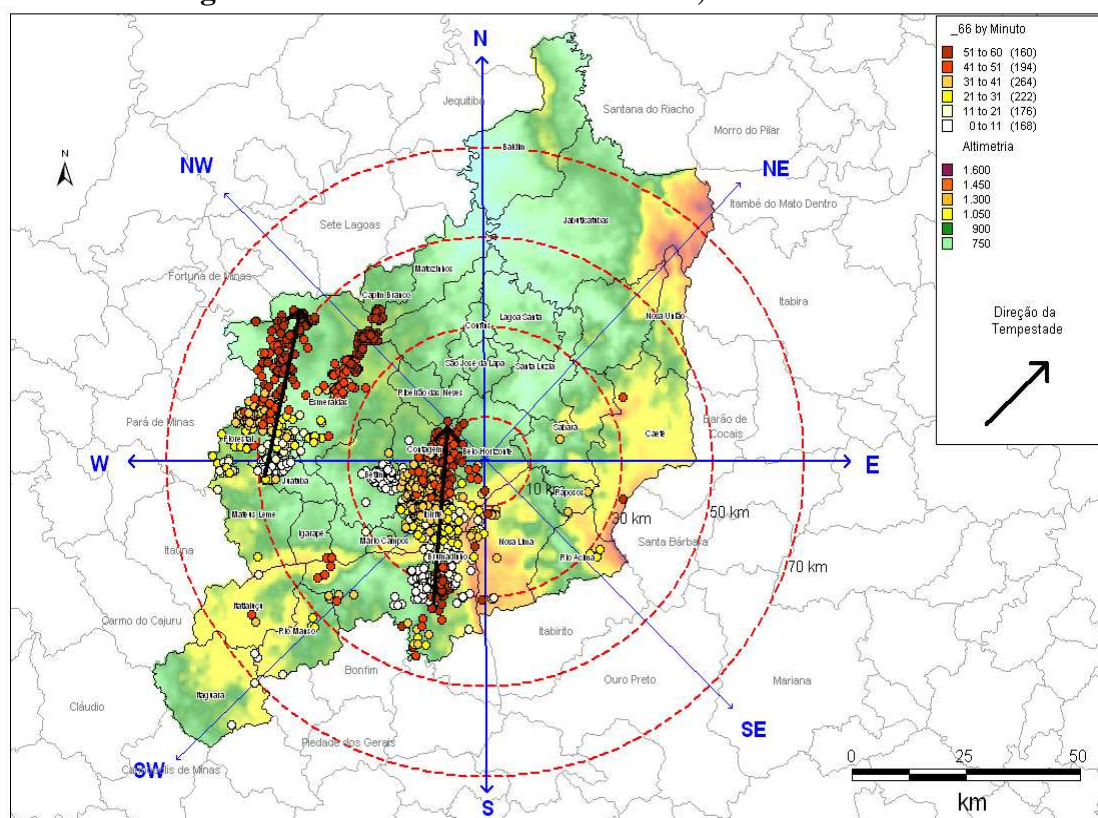
Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

No dia 30/01/2002, entre 17 e 18 horas GMT, foi registrada mais uma tempestade severa na RMBH analisada nesta tese, FIG. 76. Três núcleos principais foram observados com forte atividade convectiva sobre a região. Os quadrantes de SW, NW e SE foram os principais locais de formação com direção predominante de W-E, nos quadrantes SW e NW, e outra direção de SW-NE, no quadrante SE. Ressalta-se que as trajetórias observadas por toda a metodologia utilizada mostraram uma trajetória quebrada, ou seja, com tendência curva influenciada por algum fator local. A distância percorrida de todos os núcleos foram de 30 km aproximadamente. Nessa data o fenômeno El Nino estava entrando em dissipação no Pacífico Equatorial.





**Figura 77 – 66º evento: Dia 07/12/2002, às 20 horas GMT.**



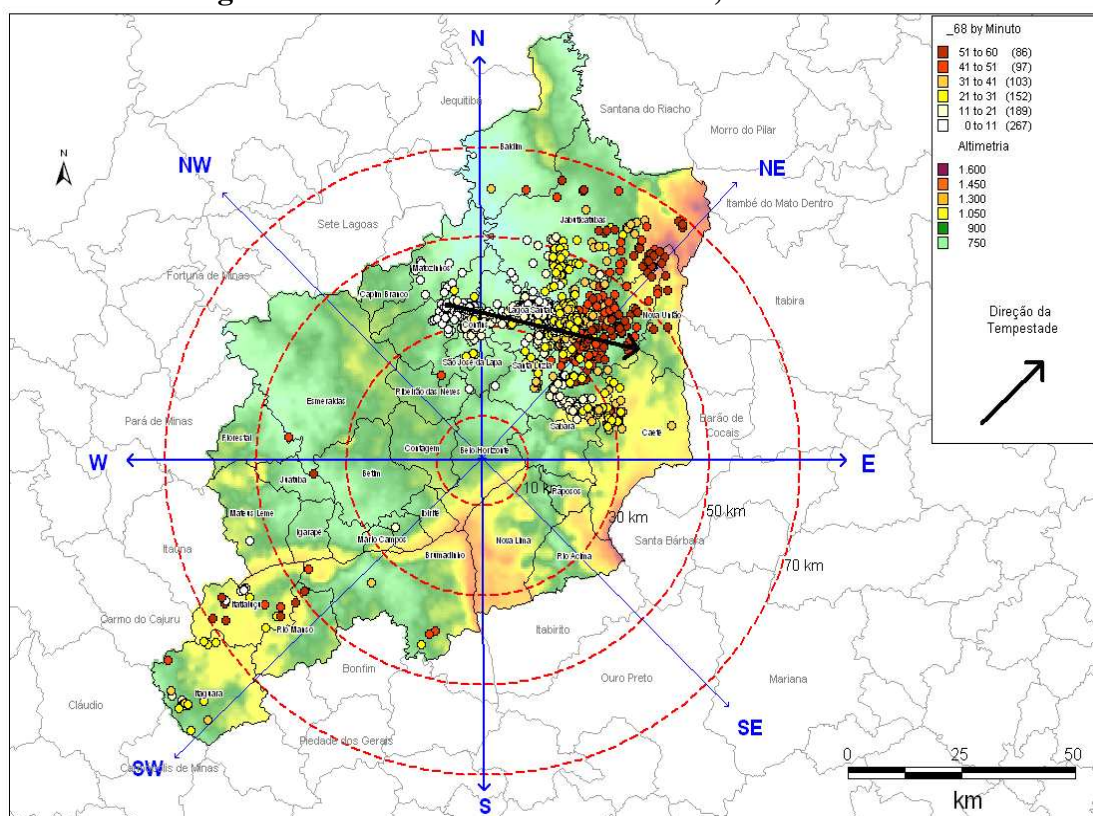
Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

O evento seguinte ocorreu alguns dias após o evento analisado anteriormente, dia 25/12/2002, entre 18 e 19 horas GMT. Esse evento foi marcado por uma forte convecção ao centro da RMBH, com grande atividade elétrica e distribuição espacial para vários municípios, FIG. 78. A tempestade se formou nos quadrantes SW e NW, sobretudo no município de Contagem. A trajetória foi orientada de SW-NE (leve declínio W-E) com distância média percorrida de 38 km dissipando-se na borda da RMBH, próximo ao município de Caeté. Nessa data o fenômeno El Niño atuava no Pacífico Equatorial com intensidade moderada.





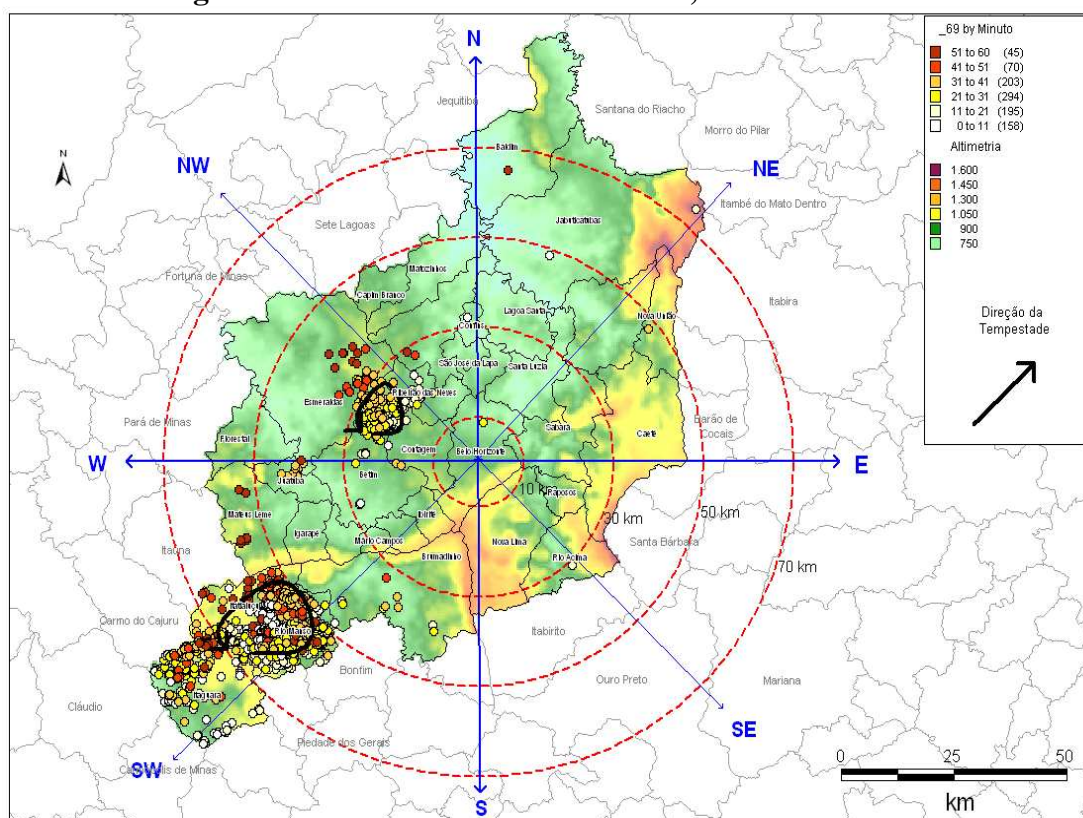
**Figura 79 – 68º evento: Dia 22/12/2003, à 1 hora GMT.**



Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

O 69º evento analisado ocorreu no dia 01/01/2005, às 22 horas GMT, FIG. 80. Dois núcleos principais foram observados nesse horário analisado, sendo um no quadrante NW e outro no quadrante SW, com maior intensidade. Todos os dois núcleos podem ser considerados de atuação local sem trajetória preferencial e deslocamento. Ressalta-se que o sistema convectivo do quadrante SW teve maior atividade atmosférica e elétrica, ocupando inclusive uma extensão espacial maior. Nessa data o fenômeno ENOS atuava na sua fase positiva no Pacífico Equatorial.

**Figura 80 – 69º evento: Dia 01/01/2005, às 22 horas GMT.**



Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

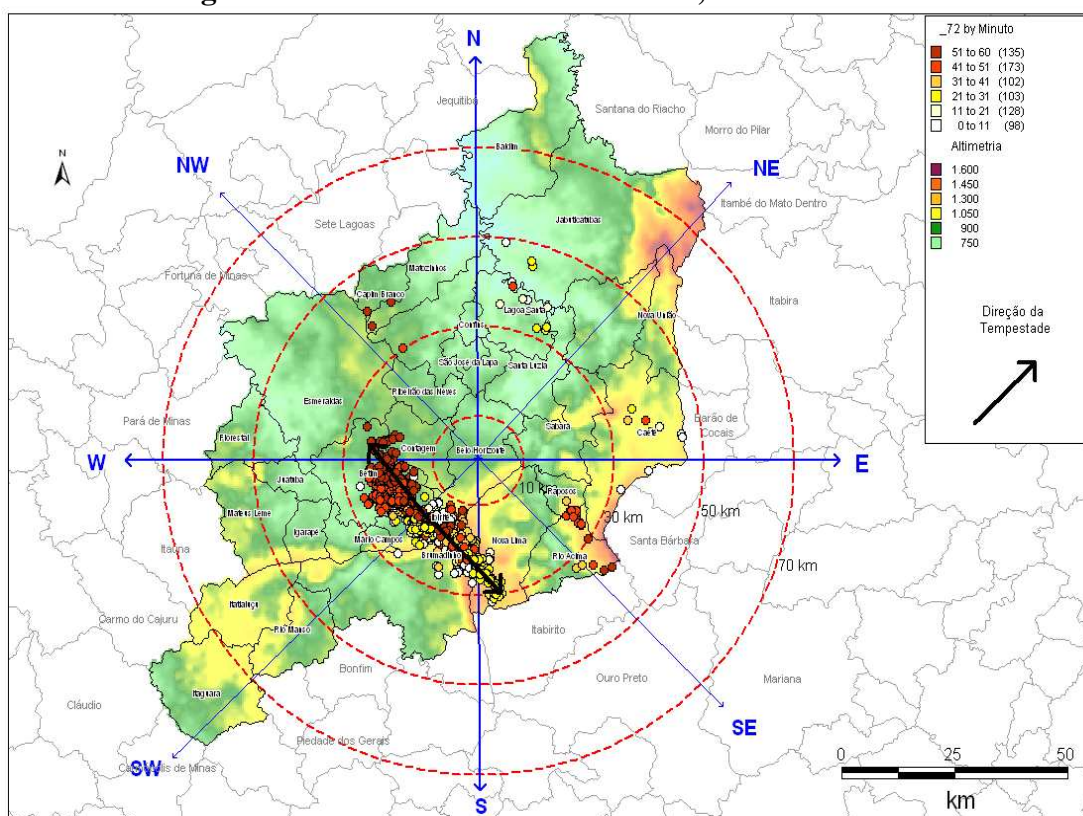
O 70º evento ocorrido no dia 18/03/2005, às 19 horas GMT, formou-se no quadrante NE entre os municípios de Belo Horizonte e Sabará, FIG. 81. Intensificou-se e deslocou-se no sentido NE-SW. Seu deslocamento se deu ao longo da serra do Curral, na divisa de Belo Horizonte e Nova Lima, entrando em dissipação nas proximidades do município de Brumadinho. Percorreu aproximadamente 20 km com largura não superior a 5 km. Nessa data o El Niño acaba de entrar em dissipação no Pacífico Equatorial.







**Figura 83 – 72º evento: Dia 29/01/2006, às 2 horas GMT.**

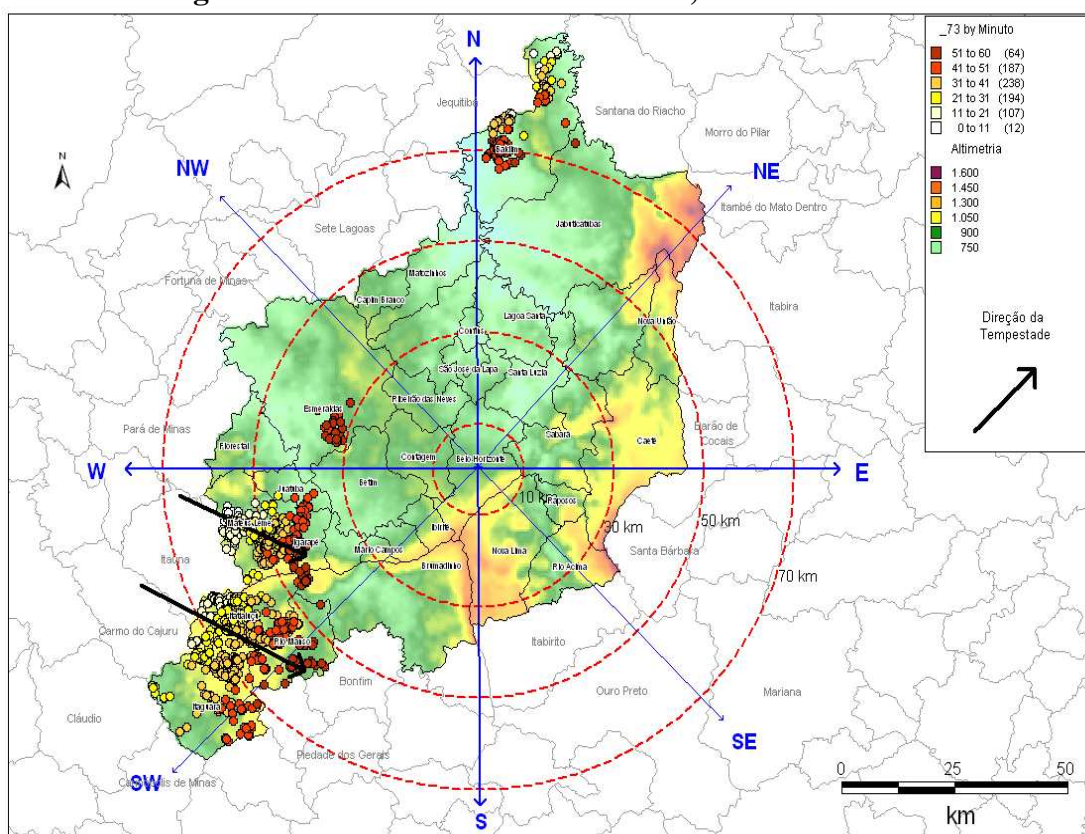


Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

O 73º evento analisado ocorreu no dia 12/02/2006, às 22 horas GMT. Alguns núcleos foram observados de forma aleatória sobre a RMBH, entretanto, dois núcleos se destacaram em virtude da atividade atmosférica produzida, FIG. 84. Esses núcleos se desenvolveram no quadrante SW, fora da RMBH, e tiveram deslocamento superior a 30 km médios com direção de trajetória NW-NE. O sistema se concentrou preferencialmente nos municípios de Itaguara, Rio Manso e Itatiaiuçu. Nessa data o fenômeno La Niña ainda atuava no Pacífico Equatorial, com intensidade moderada.



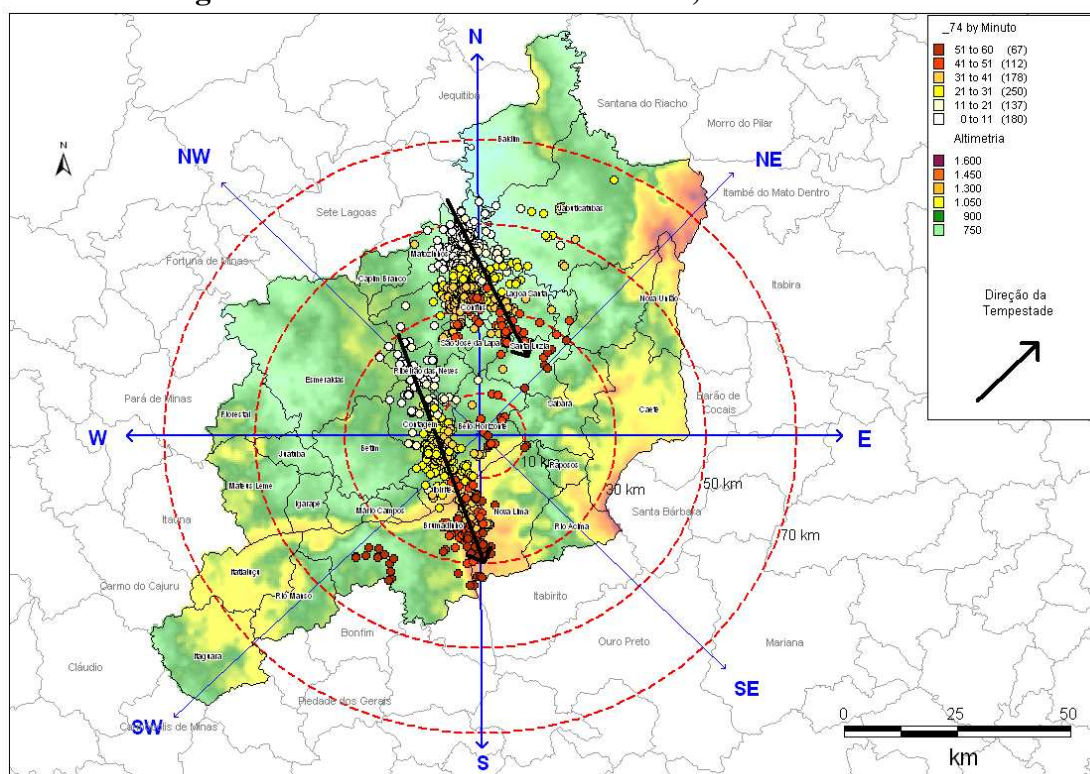
**Figura 84 – 73º evento: Dia 12/02/2006, às 22 horas GMT.**



Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

Finalmente, o 74º evento estudado nesta tese ocorreu no dia 09/11/2007, às 21 horas GMT, FIG. 85. Percebem-se dois núcleos distintos com formação no quadrante NW, sendo um no município de Matozinhos, mais ao norte, e outro no município de Ribeirão das Neves divisa com Pedro Leopoldo. Esse sistema se deslocou por uma extensa área atingindo a vertente sul da serra do Curral na divisa de Brumadinho e Nova Lima, totalizando 60 km aproximadamente, ao passo que o vetor mais a norte percorreu 25 km médios apenas. Ambos os vetores tiveram orientação NW-NE. Nessa data o fenômeno La Niña ainda atuava no Pacífico Equatorial, com intensidade moderada.

**Figura 85 – 74º evento: Dia 09/11/2007, às 21 horas GMT.**



Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)



## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Dentre as várias tempestades ocorridas na RMBH, entre os anos de 1989 e 2007, foram aqui analisados 74 eventos de acordo com as ocorrências de descargas atmosféricas. Sendo assim, diversos outros casos de tempestades severas não entraram nas análises, sendo aquelas com baixa incidência de raios, pois a quantidade desse fenômeno elétrico foi o pré-requisito para a seleção dos casos. Portanto, há que se analisar em trabalhos futuros as tempestades sob a ótica dos ventos, dos totais pluviométricos acumulados e mesmo de outros casos com raios.

A RMBH está sob a influência de diversos fenômenos meteorológicos que contribuem sobremaneira na formação, evolução e deslocamento das tempestades. A topografia local atua fortemente na trajetória das tempestades, ora trabalhando como barreira, ora servindo como forçante para uma direção e mesmo na atenuação ou incremento da intensidade.

As primeiras análises desta tese, sob a ótica da densidade das descargas atmosféricas sobre a RMBH, permitiram, preliminarmente, encontrar as áreas com maior incidência de raios. Dessa forma, possibilitou-se ampliar o entendimento na organização, atuação e desenvolvimento das tempestades associadas a raios na RMBH. Ainda com essa análise foi possível correlacionar outros fatores, como a precipitação média anual, temperatura máxima média e com a própria concentração de população, uma vez que, existem teorias que correlacionam a maior ocorrência de raios frente à maior urbanização. Portanto, os resultados evidenciaram uma forte relação entre as descargas atmosféricas e maior concentração de população.

A topografia também se mostrou altamente correlacionada com a densidade de raios. Os perfis analisados também evidenciaram um aumento da ocorrência dos raios com a maior altitude. Essa relação está na formação das chuvas orográficas, uma vez que a topografia eleva o potencial de ocorrência de chuvas na região. Apesar de que, conforme Reis (2006), a orografia não é a única responsável pela organização e formação das chuvas convectivas. Sabe-se que os fenômenos meteorológicos atuantes na RMBH são fortes o bastante para a formação do fenômeno de raio, mas que essa mesma topografia age como um incremento.

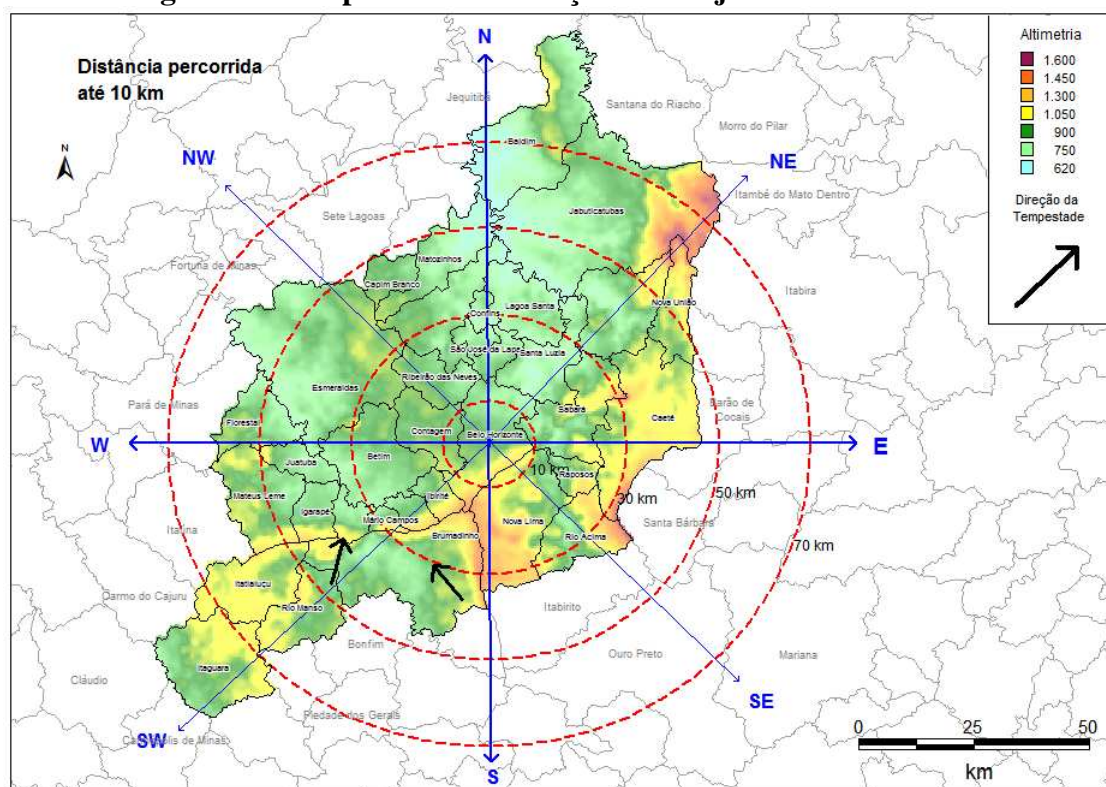
As análises desenvolvidas por quadrantes permitiram discretizar melhor as ocorrências e encontrar os resultados relacionados a cada região. O quadrante principal de ocorrência de tempestades foi o SW seguido por NE, NW e SE, respectivamente. De modo geral as chuvas (tempestades) tiveram trajetória predominante de SW, NW e W. Dessa forma, percebe-se uma

preferência nos quadrantes SW e NW. Essa orientação indica que as ocorrências podem estar relacionadas à ação das frentes frias e mesmo à formação de linhas de instabilidades formadas nos municípios dessas localidades, comuns para a RMBH. De acordo com os vetores mapeados, a distância média percorrida superou os 35 km, valor superior aos encontrados na bibliografia específica que é de 20 km médios.

As FIG. 86 a 96 aglutinam as tempestades por faixas de distâncias de 0 (zero) a 10 km, 10 a 20 km, 20 a 30 km, 30 a 40 km, 40 a 50 km, 50 a 60 km, 60 a 70 km, 70 a 80 km, 80 a 90 km, 90 a 100 km e acima de 100 km. Dessa forma pode-se explorar a atuação das chuvas por região, por distância, por direção, por origem e área de dissipação. A distância média percorrida foi acima de 35 km, e esse dado deixa claro que muitas das tempestades analisadas se originaram e se dissiparam dentro da própria RMBH.

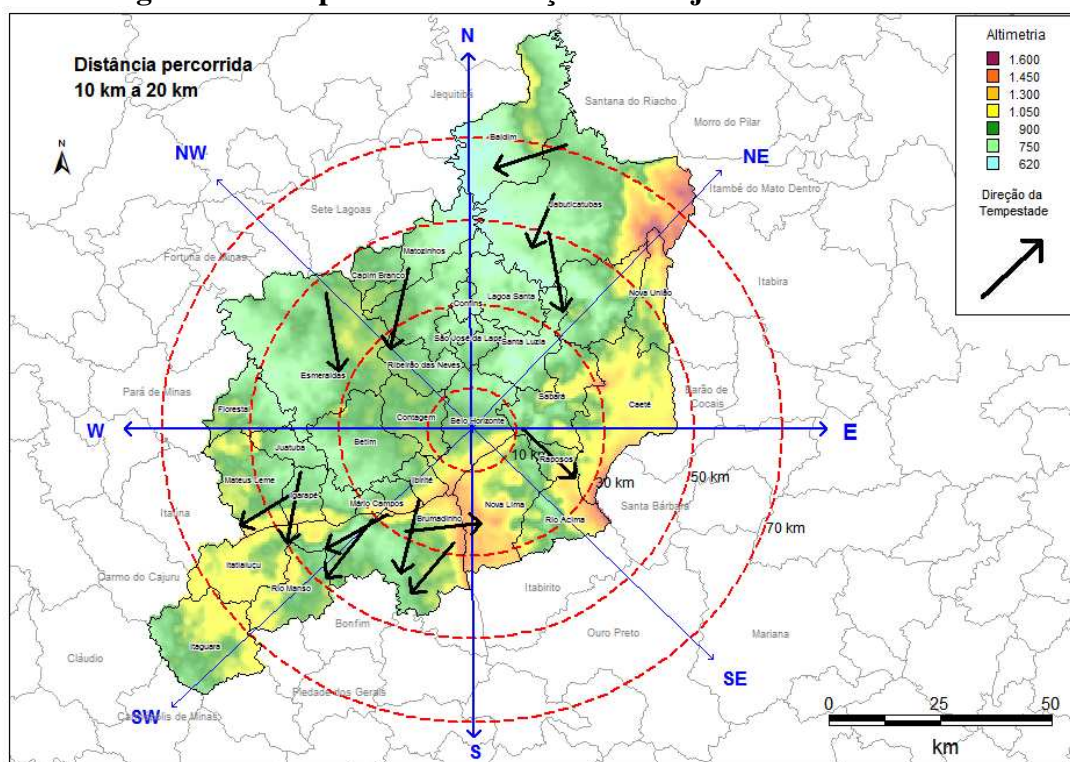
Pela distância média percorrida, vale destacar que muitas dessas tempestades, ao se formarem em um dos quadrantes, conseguem atingir os demais, ou seja, a maioria das chuvas tem o potencial de se deslocar e atingir outras regiões. Entretanto, por vezes, a região é assolada por tempestades provenientes de regiões distantes como as vindas do sul, relacionadas a entrada de frentes frias e fortes linhas de instabilidades, e algumas ações convectivas que se formam a NW e N da região, percorrendo distâncias superiores a 80 km. De acordo com as figuras abaixo, percebe-se uma grande concentração de tempestades na faixa de 30 a 40 km de trajetória e, apesar da aparência aleatória das direções, a predominância é de SW. As menores distâncias estão entre as menores frequências.

**Figura 86 – Mapa com distribuição das trajetórias de 0 a 10 km.**



Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

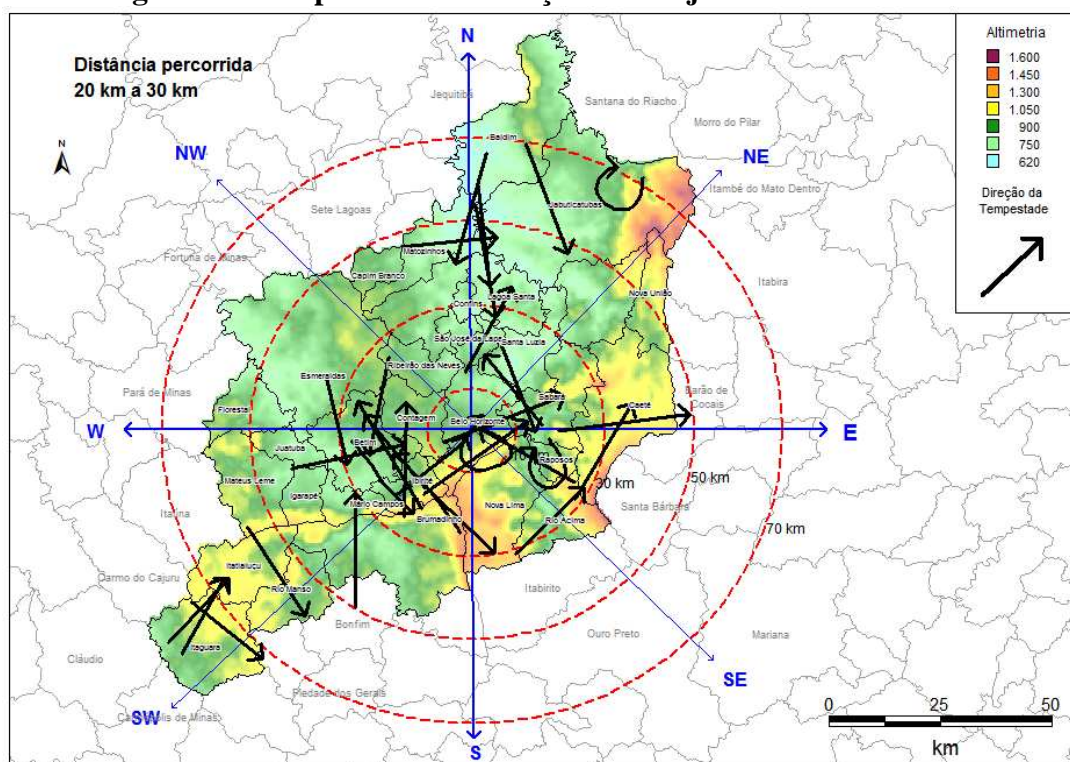
**Figura 87 – Mapa com distribuição das trajetórias de 10 a 20 km**



Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

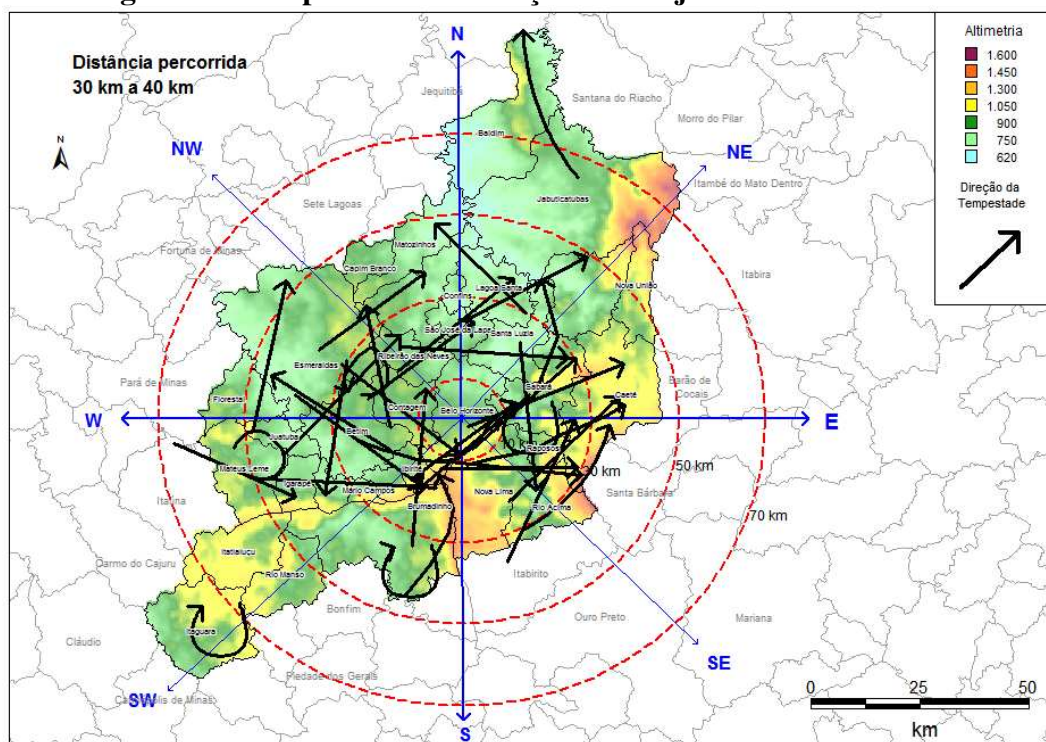


**Figura 88 – Mapa com distribuição das trajetórias de 20 a 30 km.**



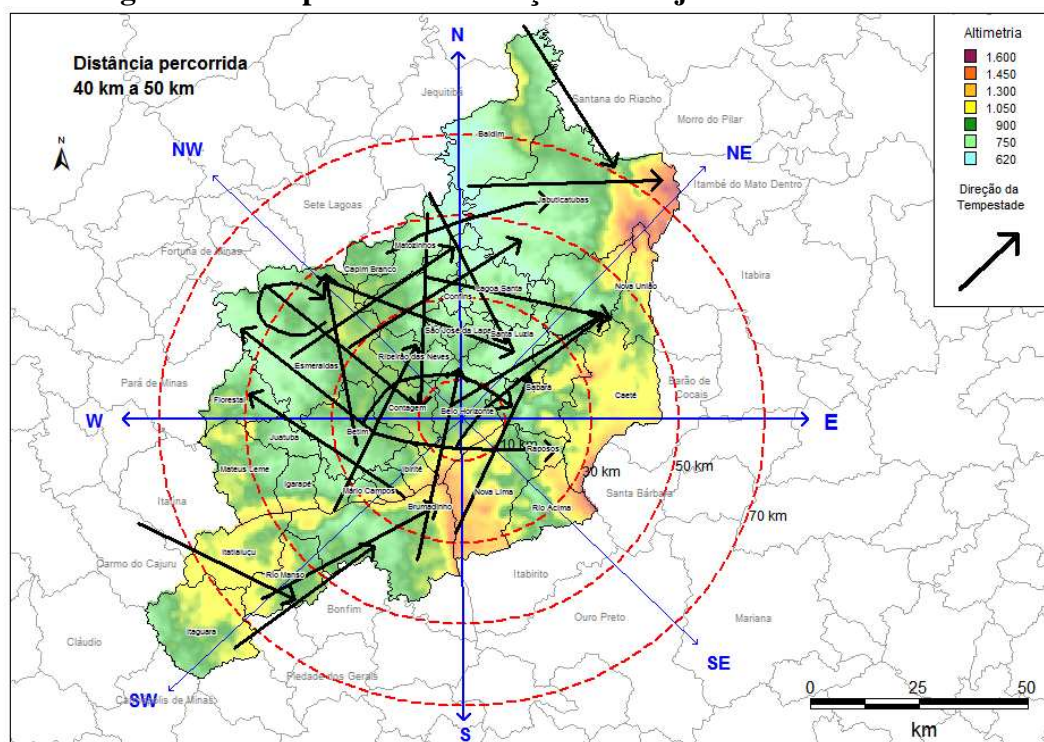
Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

**Figura 89 – Mapa com distribuição das trajetórias de 30 a 40 km.**



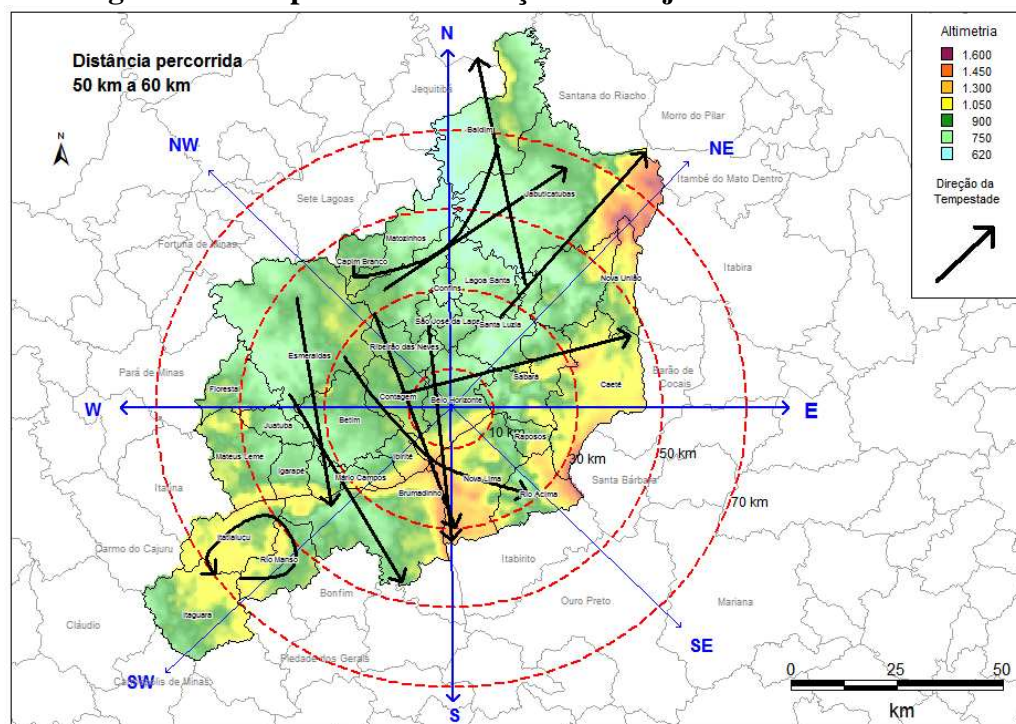
Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

**Figura 90 – Mapa com distribuição das trajetórias de 40 a 50 km.**



Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

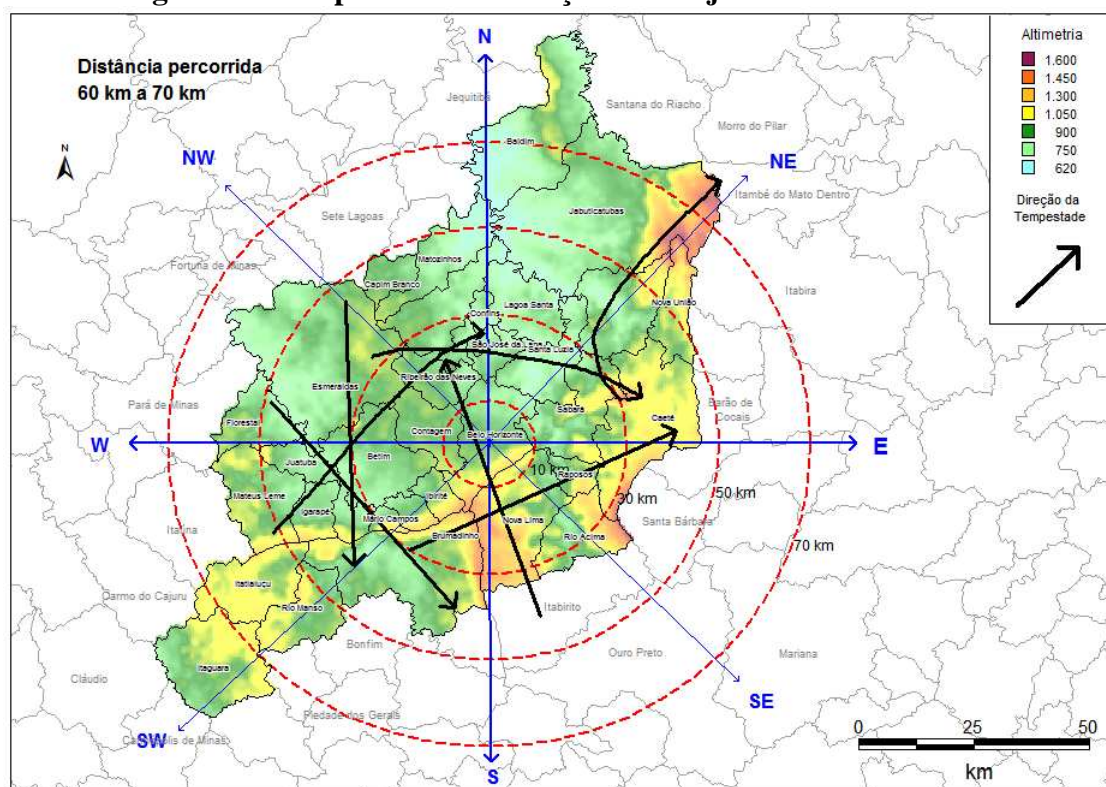
**Figura 91 – Mapa com distribuição das trajetórias de 50 a 60 km.**



Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

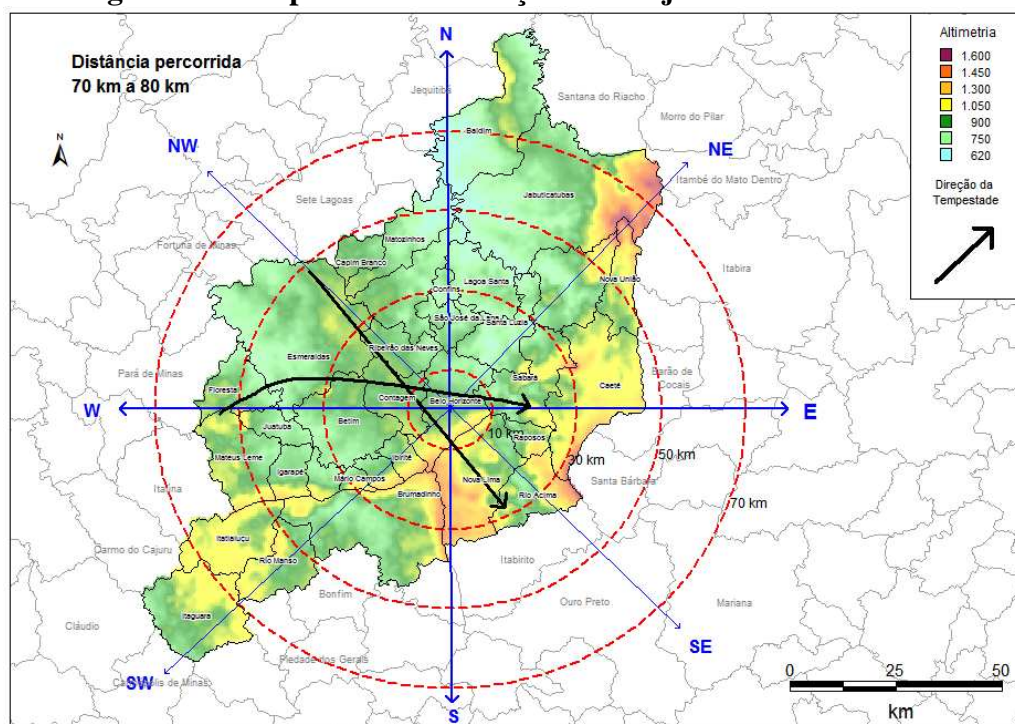


**Figura 92 – Mapa com distribuição das trajetórias de 60 a 70 km.**



Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

**Figura 93 – Mapa com distribuição das trajetórias de 70 a 80 km.**

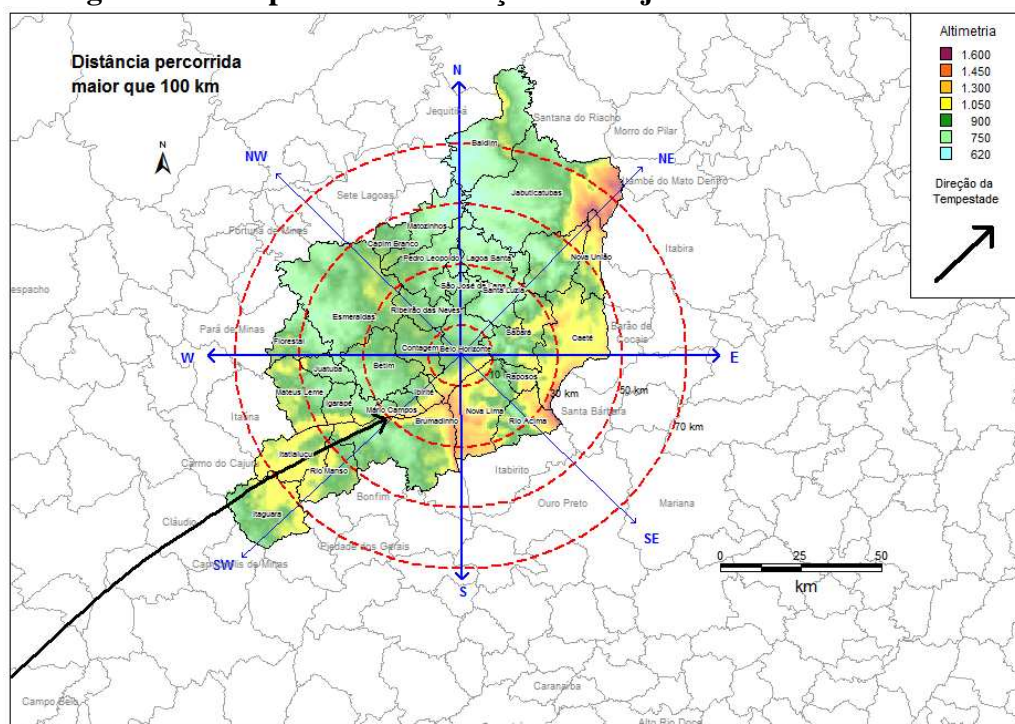


Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)





**Figura 96 – Mapa com distribuição das trajetórias acima de 100 km.**



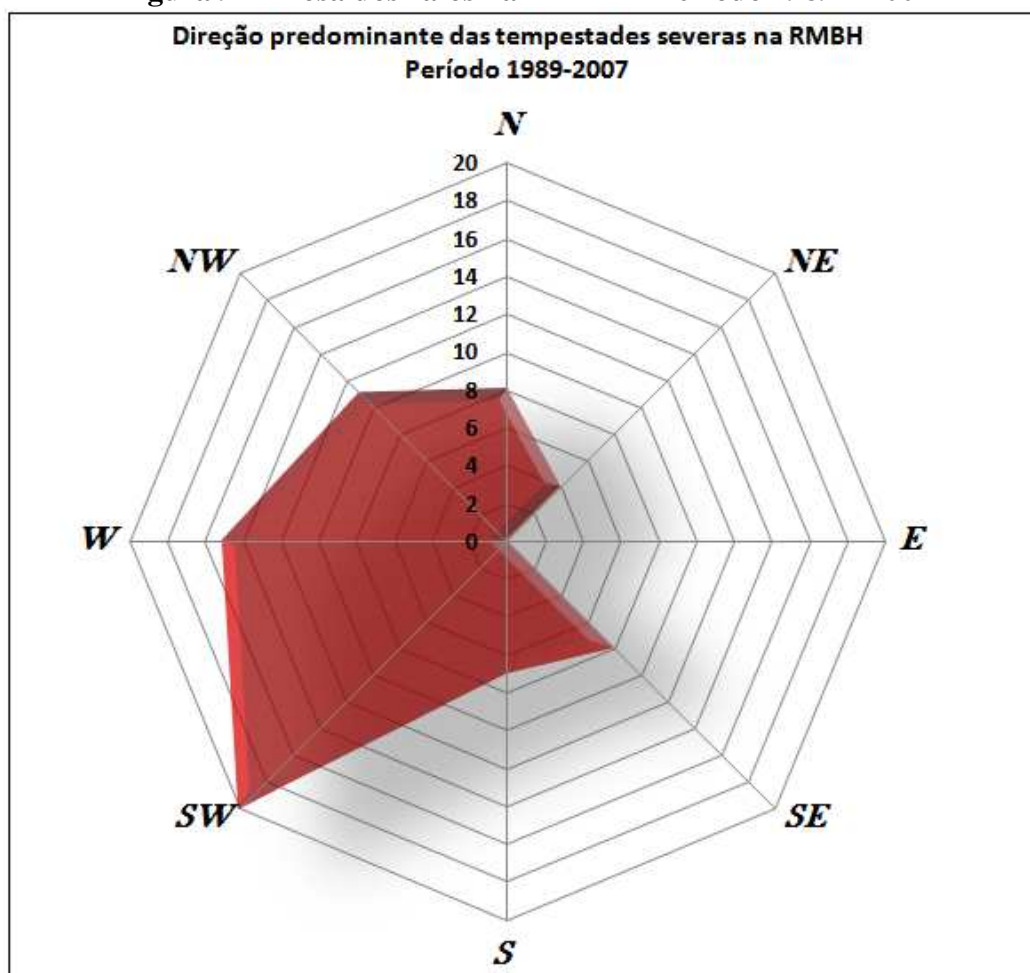
**Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)**

A análise dos 74 casos de tempestades na RMBH permitiu identificar particularidades de cada evento. Ao aglutinar todos os casos, foram obtidas mais de 74 trajetórias, pois em alguns casos percebeu-se mais de um núcleo, o que caracterizou trajetórias distintas. A FIG.97 representa a rosa dos raios com todas as direções predominantes encontradas nos eventos de tempestades analisados. As trajetórias preferenciais estão entre as orientações noroeste, oeste e sudoeste, sendo essa última a de maior frequência. Nas demais direções se encontram os casos mais raros de deslocamentos e, ressalta-se que não foi observado nenhum caso de leste, ou seja, as tempestades estudadas na RMBH não têm a direção procedente de leste.

A FIG. 98 descreve as mesmas trajetórias analisadas das tempestades, entretanto, discretiza por quadrante. Essa intervenção foi importante para compreender onde as tempestades se originam, ou mesmo onde atuam, e suas direções predominantes. No quadrante SW foi onde se observou um número maior de ocorrências de tempestades, seguido dos quadrante NE, NW e SE respectivamente. Em todos eles a direção SW esteve entre as mais frequentes, mas em alguns casos, como no quadrante NE, a direção predominante foi NW (ressalta-se que essa análise se refere à origem do deslocamento, ou seja, de onde a tempestade vem e não para onde vai). Ainda percebe-se que há um número baixo de

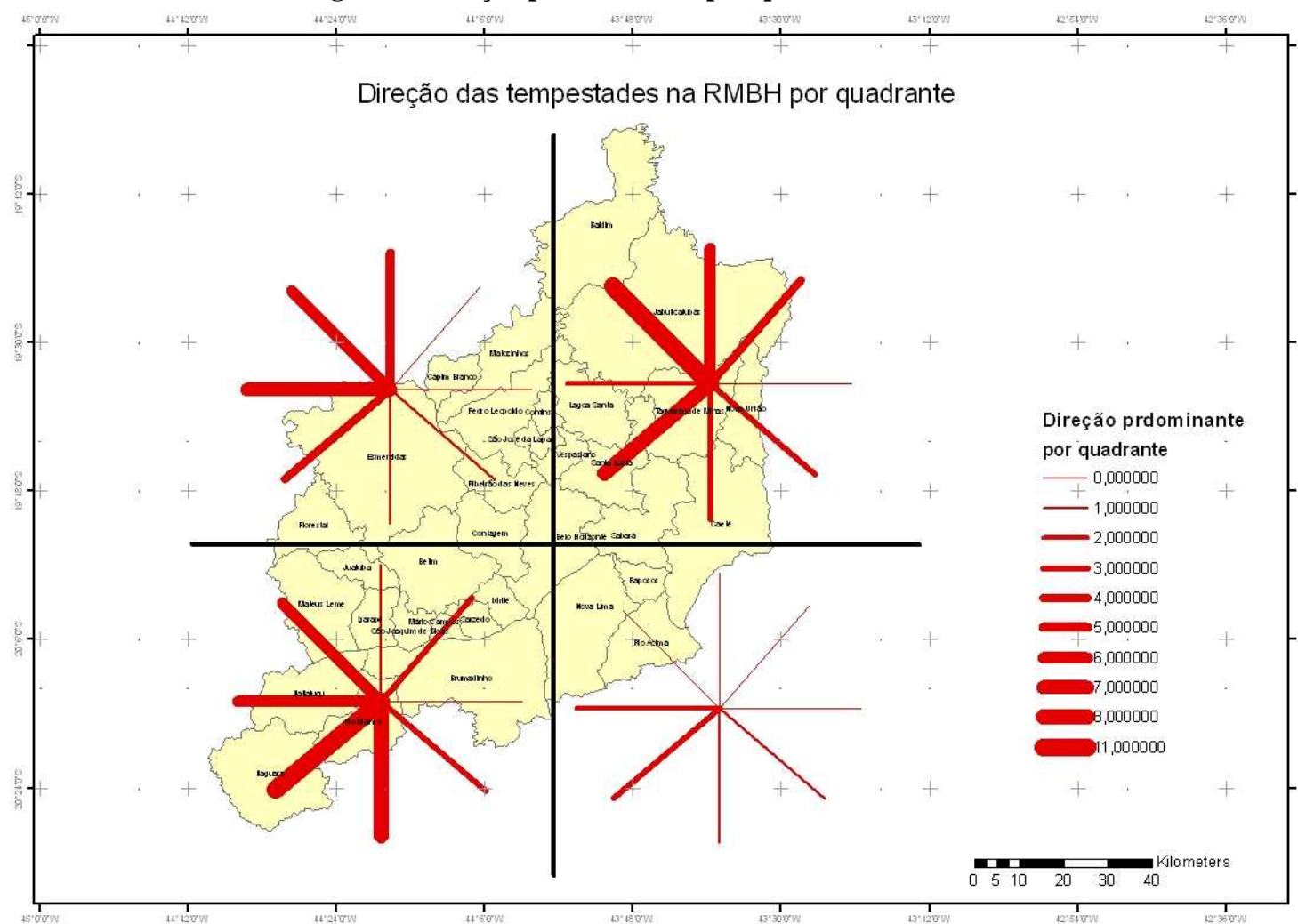
ocorrências de tempestades no quadrante SE, não que não haja tempestades nessas regiões, mas sim, que as chuvas que ocorrem ali são provenientes de outras regiões.

**Figura 97 - Rosa dos raios na RMBH – Período 1989 – 2007**



Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)

**Figura 98 - ireção predominante por quadrante na RMBH**



Fonte: Coelho C. W. G.A. (2011)



O tempo de duração foi dentro do esperado, de acordo com a mesma bibliografia consultada, sendo uma hora para a maioria dos casos. Algumas exceções foram identificadas, acima de duas horas, e raríssimos casos de quatro horas. Os mapas desenvolvidos por evento de tempestade severa demonstraram que, na grande maioria dos casos, a tempestade se organiza, se desenvolve e tem seu pico máximo de ocorrência de atividade elétrica após 2/4 do tempo de ocorrência. Após esse tempo a chuvarada começa a se desorganizar e entrar em dissipação.

Quanto a relação com o fenômeno ENOS, pode-se concluir que não houve nenhuma correlação marcante com alguma fase do fenômeno, seja na positiva, seja na negativa. Houve uma atuação aleatória ora tendendo para o El Niño, ora tendendo para o La Niña, e ora em sua fase dita normal.

As técnicas utilizadas podem ser consideradas satisfatórias para a análise de uma tempestade. A utilização de técnicas de análise espacial permitiu o conhecimento da densidade das descargas atmosféricas, tanto no tempo como no espaço. A correlação com as demais variáveis foi considerada de suma importância para a explicação de determinados parâmetros, como a concentração em alguns pontos da RMBH. A validação dos dados pelo algoritmo desenvolvido dentro do Mapinfo e o algoritmo desenvolvido na Matlab permitiram de forma satisfatória o conhecimento das trajetórias das tempestades. Ambos os softwares podem e devem ser mais utilizados em outros casos, assim como melhorados para cada situação.

Os dados do SLT, para a análises das trajetórias das tempestades, atenderam as expectativas e objetivos desta tese. Os dados coletados pelo sistema a cada instante de ocorrência permitem trabalhar com visualizações no espaço de tempo que se desejar. Portanto, as trilhas de caminhamentos das tempestades são claramente identificadas e mapeadas. A utilização conjunta do Geoprocessamento permitiu ampliar essas possibilidades de tal forma, que os raios são vistos pontualmente com temática específica de tempo de ocorrência.

Todos os resultados encontrados e analisados nesta tese foram satisfatórios, de acordo com os objetivos propostos. Entretanto, faz-se necessário continuar os estudos para novos casos de tempestades, para que se contemple uma escala de tempo maior e mais completa. Outros estudos, com outros dados, também se fazem necessários para a comprovação de algumas hipóteses atingidas, bem como a averiguação dos métodos e técnicas aqui utilizados. Novas informações como vento e a utilização de imagens de satélites serão de grande valia para a continuação dos estudos para a mensuração dos tipos de sistemas mais atuantes na

RMBH. Entretanto, os dados de raios permitiram estudar de forma abrangente as tempestades na RMBH na sua forma temporal e espacial.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, J. F. Sistemas de informações geográficas e manufatura integrada por computador: uma análise exploratória. In: TERRA, L. D. B. (Ed) **Manufatura integrada por computador**. Belo Horizonte, Fundação CEFETMINAS, 1995, 249p.
- ABREU, J.F.; BARROSO, L.C. **Geografia, modelos de análise espacial e GIS**. Belo Horizonte: PUC Minas, 2003.
- ANDRIOTTI, J. L. S., **Fundamentos de Estatística e Geoestatística**. Rio Grande do Sul: Editora da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2003.
- ASSIS, W. L. **Análise do campo térmico e Hígrico em Belo Horizonte**. 2001. Dissertação (Mestrado) – UFMG, Instituto de Geociência, Belo Horizonte.
- ASSIS, W. L. **O sistema clima urbano do município de Belo Horizonte na perspectiva tempo-espacial**. 2010. Tese (Doutorado) – UFMG, Instituto de Geociência, Belo Horizonte.
- ASSUNÇÃO, H. F., SOARES, F. R., Análise temporal e espacial do regime pluviométrico no município de Toledo, estado do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11, 2000, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2000. p 521-528.
- AYOADE, J.O; **Introdução à Climatologia para os Trópicos**; 9. ed. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 2003.
- BATTAN, L. J. **The Nature of violent storms**. Garden City: Anchor Books, 1961.
- BEGA, R. M. et al. Variabilidade espacial das precipitações pluviais diárias em uma estação experimental em Pindorama, SP. **Bragantia**, Campinas, v. 64, n.1, p.149-156, 2005.
- BELL, T. H. **As tempestades**. New York: The Viking Press, 1961.
- BENGTSSON L., HODGES, K. I., ERICH R. Storm Tracks and Climate Change. **Journal of Climate**, Washington, v. 21, p. 3518-3543, 2005.
- BERBERY E. H., VERA C. S. Characteristics of the Southern Hemisphere Winter Storm Track with Filtered and Unfiltered Data. **Journal of Atmospheric Science**, Washington, v. 53, n. 3, p. 468-481, 1996.
- CASTRO, J. F. M. **Caracterização espacial do sul de Minas e “entorno” utilizando-se o modelo potencial e a análise de fluxos em sistemas digitais: Uma proposta metodológica**. 2000. Tese (Doutorado) - IGCE/UNESP, São Paulo.
- CHANG, E. K. M.: Y. F. Fu. Interdecadal variations in Northern Hemisphere winter storm track intensity. **Journal of Climate**, Washington, v. 15, p. 642-658, 2002.

COELHO, C. W. G. A. **Estudo da variabilidade das chuvas em Belo Horizonte a partir da expansão da rede pluviométrica: Uma análise qualitativa**. 2006. Dissertação (Mestrado) - UFMG. Instituto de Geociências, Belo Horizonte.

COELHO, C. W. G. A.; PRUDENTE, C. N. Chuvas intensas na cidade de Belo Horizonte: Um estudo de caso. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE HIDROLOGIA OPERATIVA Y SEGURIDAD DE PRESAS, 3, 2010, Concórdia, Argentina. **Anais**: Buenos Aires: Cier, 2010.

DAVIS, J.C **Statistics and Data Analysis in Geology**. 2nd. ed. New York: John Wiley, 1986.

HALLAK, R. **Simulações numéricas de tempestades severas na RMSP**. 2007. Tese (Doutorado) – USP, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas - Departamento de Ciências Atmosféricas, São Paulo.

HARNIK N.; CHANG E. K. M. Storm track variations as seen in radiosonde observations and reanalysis data. **Journal of Climate**, Washington, v. 16, p. 480-495, 2002.

HELD, A.M.G. ESCOBEDO, J.F. Climatologia de tempestades na área central do estado de São Paulo usando radar meteorológico. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 25, n.1, p.1-20, 2010.

HODGES, B. J. et al. A comparison of recent reanalysis datasets using objective feature tracking: Storm tracks and tropical easterly waves. **Journal of Atmospheric Science**, Washington, v. 131, p. 2012–2037, 2003.

HOSKINS, B. J., P. J. VALDES. On the existence of stormtracks. **Journal of Atmospheric Science**, Washington, v. 47, p.1854–1864, 1990.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **4º Relatório, Mudança do clima 2007: A base das ciências físicas**. Disponível em: <http://www.ipcc.ch>. Acesso em: 20 de fev de 2011.

LOMBARDO, M. A., **Ilha de calor nas metrópoles**. São Paulo: Hucitec, 1985

LUCIO P. S., ABREU M. L., TOSCANO, E. M. M. Caracterização de séries climatológicas em Belo Horizonte - MG. PARTE I,II,III,IV. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 10, 1998, Brasília. **Anais**. Brasília: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1998. p 322-330.

MAGALHÃES FILHO, L. C. A., **Ilha de calor urbana, metodologia para mensuração: Belo Horizonte, uma análise exploratória**. 2006. Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós Graduação em Geografia, Belo Horizonte.

MAGUIRE, D., GOODCHILD, M.; RHIND, D. (Ed.). **Geographical Information Systems: Principles and Applications**. New York: John Wiley and Sons, 1991.



MAIA, L., F., P., G. **Alguns Aspectos dinâmicos-climatológicos em Minas Gerais**. 1986. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

MARQUES, J.; **Apontamentos de Climatologia**. Rio de Janeiro, Ed. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1972.

MATIAS, L. F., Sistemas de Informações Geográficas (SIG): ainda a questão do método. **Geosp**, São Paulo, v 13, 2002. Disponível em: <[http://www.geografia.fflch.usp.br/publicacoes/Geosp/Geosp13/Geosp13\\_Lindon\\_Matias.htm](http://www.geografia.fflch.usp.br/publicacoes/Geosp/Geosp13/Geosp13_Lindon_Matias.htm)>. Acesso em: 31 de jul. 2010.

MESQUITA, C. R. **Investigação de sistemas de detecção e localização de descargas atmosféricas**. 2001. Dissertação (Mestrado) – UFMG, Departamento de Engenharia Elétrica, Belo Horizonte, UFMG.

MOREIRA, J. L. B. **Estudo da Distribuição Espacial das Chuvas em Belo Horizonte e em seus Entorno**. 2002. Dissertação (Mestrado) – UFMG, Instituto de Geociências, Belo Horizonte.

MOURA, Ana C. M. **Geoprocessamento na gestão e planejamento urbano**. Belo Horizonte: Ed da Autora, 2003.

NACCARATO, K. P. **Estudo de relâmpagos no Brasil com base na análise de desempenho do Sistema de Localização de Tempestades**. 2001. Dissertação (Mestrado) - INPE, Geofísica Espacial, São José dos Campos.

NIMER, E., **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro, IBGE, 1979.

ORLANSKI, I - Bifurcation in Eddy Life Cycles: Implications for Storm Track Variability, **Journal of the Atmospheric Sciences**, Washington, v. 60, p. 993-1023, 2003.

PAUL, L., BATY, M. **Spatial Analysis: Modelling a GIS Environment**. Cambridge: Geoinformation International., 1996.

PÉDELABORDE, P. **Introduction a l'étude scientifique du climat**. Paris: Societé D'édition D'enseignement Supérieur, 1970.

PINHEIRO, M. M.G.; NAGUETTINI, M.; Análise regional da frequência e distribuição temporal das tempestades na região metropolitana de Belo Horizonte – RMBH. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 3, n. 4, p. 73-87, Out./Dez. 1998,

PRATES, J., E. **Controles associados a distribuição espacial da precipitação no verão de Minas Gerais: Aspectos fisiográficos e meteorológicos**. 1994. Tese (Doutorado) - USP, Departamento de Ciências Atmosféricas – Instituto Astronômico e Geofísico, São Paulo.

RAPPER, J. **Geographical Information Systems**. Oxford: Blackwell, 1993.

REIS R. J. **Mapeando a climatologia das descargas atmosféricas em Minas Gerais, utilizando dados de 1989 a 2002 - uma análise exploratória**. 2005. Tese (Doutorado) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós Graduação em Geografia, Belo Horizonte.

REIS, R. J. et al. Determinação das áreas de potencial de riscos de precipitações intensas em Belo Horizonte. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13, 2004, Fortaleza. **Anais**. Fortaleza: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2004. p 754-762.

REIS, R. J. Previsão de tempo a curto prazo utilizando o sistema de localização de tempestades (SLT). In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS, 3, 1994, São Paulo. **Anais**: São Paulo: SIPDA, 1994. p 203-208.

RIEHL, H. – **Meteorologia Tropical**. Chicago: Mc Graw-Hill Book, 1965.

ROCHA, Cezar H. B. **Geoprocessamento: Tecnologia transdisciplinar**. Juiz de Fora: Ed do Autor, 2000.

ROGERS, J. C. - North Atlantic storm track variability and its association with the North Atlantic Oscillation and climate variability of northern Europe. **Journal of Climate**, Washington, v. 10, p.1635–1647, 1997.

ROMESBURG, H. C. **Cluster analysis for researchers**. North Carolina: Lulu Press, 2004.

SWISS REINSURENCE COMPANY ECONOMIC RESEARCH & CONSULTING. **Natural catastrophes and man-made disasters in 2007: high losses in Europe**. SIGMA, 2008. Disponível em: <<http://www.swissre.com/publications>>. Acesso em: 15, mar, 2011.

STAROSTIN, A.; KNEIB, R. O. Tempestades com trajetória de linha quebrada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12, 2002, Foz do Iguaçu – PR. **Anais**. Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2002. p 1022-1030

TOMINAGA, L. K., et al. **Desastres naturais: Conhecer e prevenir**. São Paulo: Ed. Instituto Geológico, 2009.

TRENBERTH, K. E. - Storm tracks in the Southern Hemisphere. **Journal of Atmospheric Science**, Washington, v. 48, p. 2159–2178, 1991.

TUCCI, C. E. M.; BRAGA, B. (Org.) **Clima e Recursos Hídricos no Brasil**. Porto Alegre: ABRH, 2003.

VIANELLO, R. L., ALVES, A. R., **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: UFV, 1991.

## ANEXOS

### ANEXO A - Algoritmo desenvolvido para o MAPinfo®

```
Include "MAPBASIC.DEF"
```

```
Include "MENU.DEF"
```

```
Declare Sub Main
```

```
Declare Sub TelaDefinirParametros
```

```
Declare Sub PrepararIntervalos
```

```
Declare Sub Wait(byVal iSeconds as Integer)
```

```
Declare Sub LevantaPrimeiroMarcador
```

```
Declare Sub LimparMapa
```

```
Global iSelTabelaFonte,iSelTabelaDestino as smallint
```

```
Global strTabelas as String
```

```
Global iNumTables as SmallInt
```

```
Global iDia,iMes,iAno,iHora,iMinuto,fDia,fMes,fAno,fHora,fMinuto as Integer
```

```
Global iIntervaloAtualizacao,iPasso,iLimpeza as Integer
```

```
Global imDia,imMes,imAno,imHora,imMinuto as Integer
```

```
Global arrayIntervalos() as Integer
```

```
Global iLimpar as Integer
```

```
Global icDia,icMes,icAno,icHora,icMinuto,fcDia,fcMes,fcAno,fcHora,fcMinuto  
as Integer
```

```
Sub Main
```

```
Create Menu
```

```
"StormTracker" as "Definir Parametros" Calling TelaDefinirParametros,
```

```
"Mostrar No Mapa" Calling PrepararIntervalos,
```

```
"Limpar Mapa" Calling LimparMapa
```

```
Alter Menu Bar Add "StormTracker"
```

```

End Sub

Sub TelaDefinirParametros

Dim i as Integer

Dim strVirgula As String

strVirgula = ""

iNumTables = NumTables()

If iNumTables > 0 Then

strTabelas = ""

For i = 1 To iNumTables

strTabelas = strTabelas + strVirgula + TableInfo(i,TAB_INFO_NAME)

strVirgula = ";"

Next

Dialog

Title "Configuracao StormTracker"

Width 200

Height 200

Control StaticText

Title "Tabela Fonte:"

Position 10,10

Control PopupMenu title strTabelas

Position 60,10

Into iSelTabelaFonte

Control StaticText

Title "Tabela Destino:"

Position 10,30

Control PopupMenu title strTabelas

Position 60,30

Into iSelTabelaDestino

Control StaticText

Title "Dat. Inicial:"

Position 10,50

```

```
Control EditText
Value iDia
Position 60,50 Width 15
into iDia
Control EditText
Value iMes
Position 80,50 Width 15
into iMes
Control EditText
Value iAno
Position 100,50 Width 30
into iAno
Control EditText
Value iHora
Position 135,50 Width 15
into iHora
Control EditText
Value iMinuto
Position 155,50 Width 15
into iMinuto
Control StaticText
Title "Dat. Final:"
Position 10,70
Control EditText
Value fDia
Position 60,70 Width 15
into fDia
Control EditText
Value fMes
Position 80,70 Width 15
into fMes
```



```
Control EditText
Value fAno
Position 100,70 Width 30
into fAno
Control EditText
Value fHora
Position 135,70 Width 15
into fHora
Control EditText
Value fMinuto
Position 155,70 Width 15
into fMinuto
Control StaticText
Title "Tmp. Passo:"
Position 10,90
Control EditText
Value iPasso
Position 60,90 Width 20
into iPasso
Control StaticText
Title "Tmp. Atualz:"
Position 10,110
Control EditText
Value iIntervaloAtualizacao
Position 60,110 Width 20
into iIntervaloAtualizacao
Control StaticText
Title "Tmp. Limpeza:"
Position 10,130
Control EditText
Value iLimpeza
```

```

Position 60,130 Width 20

into iLimpeza

Control StaticText

Title "*Todos os tempos deverao estar em minutos"

Position 10,150

Control OKButton

Title "Salvar"

Position 10,170

Else

Note "Voce deve ter ao menos uma tabela aberta para uso."

End If

End Sub

Sub PrepararIntervalos

Dim tabPontos as String

Dim strLatitude,strLongitude as String

Dim tabela,coluna,conjugado as Alias

Dim iCount as Integer

Dim flagSaiLoop as Logical

Dim strNomeTabela as String

Dim cursorArray as Integer

iCount = 1

strNomeTabela = TableInfo(iSelTabelaFonte,TAB_INFO_NAME)

tabPontos = PathToTableName$(strNomeTabela)


Select * From tabPontos where Ano Between iAno AND fAno AND mes Between
iMes AND fMes AND dia Between iDia AND fDia AND Hora Between iHora AND
fHora AND Minuto Between iMinuto AND fMinuto Order By Ano,Mes,Dia,Hora into
tabFinal

icDia = iDia

icMes = iMes

icAno = iAno

```

```

icHora = iHora
icMinuto = iMinuto

fcDia = fDia
fcMes = fMes
fcAno = fAno
fcHora = fHora
fcMinuto = fMinuto
imMinuto = iMinuto
imHora = iHora
flagSaiLoop = FALSE
Do While(flagSaiLoop = FALSE)
    imMinuto = imMinuto + iPasso
    If(imMinuto >= 60) Then
        imMinuto = imMinuto - 60
        imHora = imHora + 1
        If(imHora > 24) Then
            imHora = imHora - 24
            imDia = imDia + 1
        End If
    End If
    If(imHora = fHora AND imMinuto <= fMinuto) Then
        cursorArray = UBound(arrayIntervalos)
        ReDim arrayIntervalos(cursorArray + 1)
        iLimpar = iLimpar + iPasso
        Call LevantaPrimeiroMarcador
    Else
        If(imHora < fHora) Then
            cursorArray = UBound(arrayIntervalos)
            ReDim arrayIntervalos(cursorArray + 1)
            iLimpar = iLimpar + iPasso
        End If
    End If

```

```

Call LevantaPrimeiroMarcador

Else

flagSaiLoop = TRUE

End If

End If

Loop

End Sub

Sub LevantaPrimeiroMarcador

Dim strNomeTabela,tabPrincipal as String

Dim iRowID as Integer

strNomeTabela = TableInfo(iSelTabelaDestino,TAB_INFO_NAME)

tabPrincipal = PathToTableName$(strNomeTabela)

strNomeTabela = "tabFinalPlota"

'Note icHora + ":" + icMinuto + " e " + imHora + ":" + imMinuto

Select * From tabFinal where hora BETWEEN icHora AND imHora AND minuto
BETWEEN icMinuto AND imMinuto Order By Ano,Mes,Dia,Hora into tabFinalPlota

iRowID = TableInfo(0, TAB_INFO_NROWS)

Insert Into tabPrincipal ( COL1, COL2, COL3, COL4, COL5, COL6, COL7) Select
COL1, COL2, COL3, COL4, COL5, COL6, COL7 From tabFinalPlota

icHora = imHora

icMinuto = imMinuto

If iRowID > 0 Then

Call Wait(iIntervaloAtualizacao)

'Note iLimpar

If(iLimpar > iLimpeza) Then

```

```
Call LimparMapa
```

```
iLimpar = 0
```

```
End If
```

```
End If
```

```
End Sub
```

```
Sub LimparMapa
```

```
Dim strNomeTabela,tabRemocao as String
```

```
strNomeTabela = TableInfo(iSelTabelaDestino,TAB_INFO_NAME)
```

```
tabRemocao = PathToTableName$(strNomeTabela)
```

```
'Select * From tabRemocao where Munic_pio = "+" OR Munic_pio = "-" into
```

```
tempTab
```

```
Delete From tabRemocao
```

```
End Sub
```

```
Sub Wait(ByVal iSeconds as Integer)
```

```
Dim iEnd as Integer
```

```
iEnd = Timer() + iSeconds
```

```
Do while Timer() < iEnd
```

```
'whatever
```

```
Loop
```

```
End Sub
```



## ANEXO B - Algoritmo desenvolvido para o Matlab

```
% Lê dados puros
cd('D:\Temporario\Estudos\CarlosWagner');

tdisch = textscan(fopen('Dados puros.txt','r'), '%[^\n]','Whitespace','');
tdisch = tdisch{1};
disch = evalstr(tdisch(2:end));

%Transforma a data em datenum
dt = datenum([disch(:,1:5) disch(:,6)+disch(:,7)/1000]);
%datevec(dt)

% Acha os pontos de descaraga
pos = disch(:,(end-1):end);

% Plota todas as discargas do evento
plot(pos(:,1),pos(:,2),'r.')

% O evento tem duas horas de duração
% Pode-se dividir o evento em 1,5,10,20,30 minutos

% Divindo o evento em 20 minutos
% nt - número de divisões do evento
delta = 10;
nmaxcluster =
nt = ceil((dt(end)-dt(1))/(delta/60/24));

% Divisões temporais do evento
ndt = (0:(nt-1))*delta/60/24 + dt(1);
```

```

% Divisões dos vetores de descargas com base nos tempos
ev = cell(nt-1,3);
color_map = jet(nt-1);
figure(1)
for k=1:nt-1
% Acha as descargas dentro do intervalo de tempo
idx = find(dt>=ndt(k) & dt<ndt(k+1));
ev(k,1) = {pos(idx,:)};
% Descobre o tamanho do cluster
if k==1
msil = zeros(6,1);
for m=1:6
kindx = kmeans(ev{k,1},m,'distance','sqeuclid');
msil(m) = mean(silhouette(ev{k,1},kindx,'sqeuclid'));
end
[~, sidx] = max(msil);
if (sidx==2) && (max(msil)<.65)
sidx = 1;
end
end
[ev{k,2} ev{k,3}] = kmeans(ev{k,1},sidx,'distance','sqeuclid');

% Plota as descargas
plot(ev{k,1}(:,1),ev{k,1}(:,2),'.','Color',color_map(k,:))
hold on
end
grid on
axis ij
hold off

% Plota os centróides
figure(2)

```

```

for k=1:nt-1

plot(ev{k,3}(:,1),ev{k,3}(:,2),'p','MarkerFaceColor',color_map(k,:),'Marker
EdgeColor','k','MarkerSize',15)

hold on

end

hold off

grid on

axis ij

% Ordena os centroides

for k=1:nt-2

D = squareform(pdist(cell2mat(ev(k:(k+1),3))));

[~, idx] = min(D(end-sidx+1:end, 1:sidx));

ev{k+1,3} = ev{k+1,3}(idx,:);

end

% Traça linhas entre os centroides

figure(2)

hold on

pc = cell2mat(ev(:,3));

lnmap = jet(sidx*2);

for k=1:sidx

plot(pc(k:sidx:size(pc,1),1),pc(k:sidx:size(pc,1),2),'-', 'Color',
color_map(k*2,:),'LineWidth',3)

end

hold off

figure(1)

hold on

pc = cell2mat(ev(:,3));

lnmap = jet(sidx*2);

```

```

for k=1:sidx
plot(pc(k:sidx:size(pc,1),1),pc(k:sidx:size(pc,1),2),'-', 'Color',
color_map(k*2,:), 'LineWidth',3)
end
hold off

figure(3)
hold on
coolcl = cool(nt-1);
hotcl = hot(nt-1);
wintercl = winter(nt-1);
for k=1:nt-1
idx = ev{k,2}==1;
plot(ev{k,1}(idx,1),ev{k,1}(idx,2),'.','Color',coolcl(k,:))
idx = ev{k,2}==2;
%plot(ev{k,1}(idx,1),ev{k,1}(idx,2),'.','Color',hotcl(k,:))
idx = ev{k,2}==3;
%plot(ev{k,1}(idx,1),ev{k,1}(idx,2),'.','Color',wintercl(k,:))
end
% hold off
grid on
axis ij

```