



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS  
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**ESTUDO DE CASO DE UM EVENTO CONVECTIVO  
OCORRIDO EM SANTA RITA DO SAPUCAÍ - MG**

---

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO**

**Larissa Helena da Costa**

**Itajubá, MG, Brasil**

**2020**

# **ESTUDO DE CASO DE UM EVENTO CONVECTIVO OCORRIDO EM SANTA RITA DO SAPUCAÍ-MG**

---

por

**Larissa Helena da Costa**

Monografia apresentada à comissão examinadora  
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas  
da Universidade Federal Itajubá (UNIFEI, MG), como  
requisito parcial para obtenção do grau de  
**Bacharel em Ciências Atmosféricas.**

**Orientador: Michelle Simões Reboita**  
**Coorientador: Enrique Vieira Mattos**

**Itajubá, MG, Brasil**  
**2020**

**Universidade Federal de Itajubá  
Instituto de Recursos Naturais  
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a  
Monografia

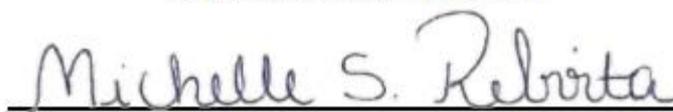
**ESTUDO DE CASO DE UM EVENTO CONVECTIVO OCORRIDO EM  
SANTA RITA DO SAPUCAÍ - MG**

elaborada por

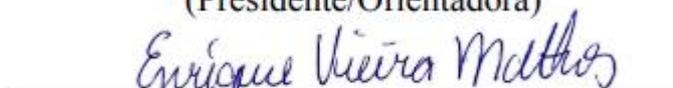
**Larissa Helena da Costa**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de  
**Bacharel em Ciências Atmosféricas**

**Comissão Examinadora:**



**Michelle Simões Reboita, Dr.<sup>a</sup>. (UNIFEI)**  
(Presidente/Orientadora)



**Enrique Vieira Mattos, Dr. (UNIFEI)**  
(Coorientador)



**Bruna Andreлина, MSc. (UNIFEI)**



**Bruno Capucin, MSc. (UNIFEI)**

Itajubá, 20 de novembro de 2020

*Aos meus pais, Maria Lúcia e Carlos, meu avô João e meus irmãos.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiro a Deus por ter me dado força para conseguir chegar até aqui. A jornada não foi fácil, mas hoje me vejo vitoriosa por tê-la conseguido cumprir. Tive dias difíceis e cinzentos, que por muitas vezes me fizeram querer desistir de prosseguir. Aqui encerro um ciclo para começar a abrir novos, que espero que sejam cheios de boas possibilidades e crescimento, tanto profissional, como pessoal.

A minha família, dedico tudo que sou hoje, principalmente por terem me incentivado e ensinado a ser sempre uma boa pessoa, com respeito, caráter e persistência nos objetivos, não teria conseguido conquistar nada sem o apoio deles, portanto essa vitória não é apenas minha.

Para os meus professores, obrigada pelas correções e ensinamentos que me permitiram desenvolver um melhor desempenho no meu processo de formação profissional, principalmente para minha orientadora Michelle Simões Reboita e meu coorientador Enrique Vieira Mattos, os quais deixo toda minha gratidão pelo apoio, aprendizados e paciência durante esses anos de curso, com certeza levarei a amizade de vocês para a vida.

A minha amiga Meli Silva, agradeço por me ajudar a compreender meus momentos de surto, além de sempre me apoiar a manter os pés no chão com as decisões da vida. Obrigada por todo incentivo para ser uma pessoa melhor, tanto com os outros como comigo.

Agradeço também minhas amigas Aline Santos, Paloma Simões e Ana Ticianelli por me darem forças nos meus momentos mais difíceis e por entenderem meus momentos de ausência.

Deixo aqui também um agradecimento aos meus colegas de profissão, Robson Barretos e Bruna Andreлина pela ajuda no processo de construção deste trabalho.

*“Ideias e somente ideias podem iluminar a escuridão”*

Ludwig Von Mises

## RESUMO

Monografia de Graduação  
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil

### ESTUDO DE CASO DE UM EVENTO CONVECTIVO OCORRIDO EM SANTA RITA DO SAPUCAÍ - MG

AUTOR(A): Larissa Helena da Costa  
ORIENTADOR: Michelle Simões Reboita  
Local e Data da Defesa: Itajubá, 20 de novembro de 2020.

A cidade de Santa Rita do Sapucaí, localizada no sul do Estado de Minas Gerais, no dia 24 de outubro de 2019 aproximadamente às 21 UTC foi atingida por uma tempestade de granizo que gerou diversos danos no município. Carros foram amassados com o impacto das pedras de gelo, telhados foram destruídos e uma mulher morreu ao tentar se abrigar debaixo de uma árvore que acabou caindo sobre a mesma. Neste contexto, o objetivo do presente estudo é apresentar as condições físicas e sinóticas do ambiente no qual a tempestade se desenvolveu. Foram utilizados dados da reanálise ERA5, imagens do radar de São Roque (SP) e do satélite GOES-16, além de dados de relâmpagos da rede BrasilDAT. A análise sinótica mostrou que a tempestade pode ter ocorrido como uma resposta dinâmica (divergência em níveis altos) e termodinâmica (convecção local e umidade na coluna atmosférica) das características da atmosfera no sul de MG. As imagens de satélite registraram a evolução e intensificação do sistema convectivo até o horário que o município foi atingido, registrando núcleos com temperatura de brilho inferiores a  $-60^{\circ}\text{C}$ . O conteúdo de água líquida (VIL, até  $9\text{ kg/m}^2$ ), densidade de VIL (DVIL,  $10\text{ g/m}^3$ ) e a altura de *Waldvogal* (AW, 4,7 km) aumentaram rapidamente até o momento antes da ocorrência do granizo em superfície. Em adição, a tempestade apresentou uma alta taxa de relâmpagos intra-nuvem (até 3500 relâmpagos /10 min) e nuvem-solo (até 300 relâmpagos/10min) antes da ocorrência do granizo, indicando o potencial do uso dos relâmpagos como um parâmetro preditor da ocorrência de granizo em superfície.

Palavras-chave: Santa Rita do Sapucaí. Meteorologia. Tempestade de granizo.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1</b> – Satélite GOES-16, Cartas de Superfície, PNMM (hPa), Espessura (500/1000 hPa), Jato (250 hPa), Divergência (250 hPa) (22/10 a 24/10)..  | 13 |
| <b>Figura 2</b> – Satélite GOES-16, PNMM (hPa), Espessura (500/1000 hPa), Jatos (250 hPa), Divergência (250 hPa), Cisalhamento (500 e 1000 hPa) e (850 e 1000 hPa) (24/10)   | 14 |
| <b>Figura 3</b> – UE (500 hPa), Ômega (500 hPa), Altura Geopotencial (500 hPa), UE (850 hPa), Ômega (850 hPa), Intensidade do Vento (850 hPa), UE (925 hPa), Ômega (925 hPa), Intensidade do Vento (925 hPa) (24/10) | 15 |
| <b>Figura 4</b> – TWV-TIR, relâmpagos intra-nuvem e nuvem solo positivo (24/10)  | 17 |
| <b>Figura 5</b> – Imagens do GOES - 16 do canal infravermelho (24/10)  | 21 |
| <b>Figura 6</b> – CAPPI de refletividade (dBZ) em 3,05 km de altura (24/10)  | 21 |
| <b>Figura 7</b> – CAPPI de refletividade (dBZ) em 3,05 km de altura (24/10)  | 23 |
| <b>Figura 8</b> – Evolução temporal dos relâmpagos intra-nuvem e nuvem-solo, área da tempestade, refletividade máxima e eco top de 20 dBZ (24/10)  | 24 |
| <b>Figura 9</b> – Evolução temporal do máximo VIL, densidade de VIL - DVIL, altura de Waldvogal – AW e eco top de 35 dBZ (24/10)   | 25 |
| <b>Figura 10</b> – CAPPI de refletividade (dBZ) em 3,0 km de altura (24/10)  | 26 |
| <b>Figura 11</b> – Seções transversais verticais de refletividade no instante de maior atividade convectiva  | 27 |

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

|           |   |  |
|-----------|---|--|
| IBGE      | - | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística                  |
| INATEL    | - | Instituto Nacional de Telecomunicações                           |
| SMAS      | - | Sistema de Monção da América do Sul                              |
| ZCAS      | - | Zona de Convergência do Atlântico Sul                            |
| AB        | - | Alta da Bolívia  |
| BCH       | - | Baixa do Chaco   |
| SCM's     | - | Sistemas Convectivos de Mesoescala                               |
| AS        | - | América do Sul   |
| SP        | - | São Paulo  |
| JBN       | - | Jatos de Baixos Níveis   |
| MG        | - | Minas Gerais   |
| SRS       | - | Santa Rita do Sapucaí  |
| CAPE      | - | <i>Covective Available Potential Energy</i>                      |
| BrasilDAT | - | Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas            |
| NS        | - | Relâmpagos Nuvem-Solo  |
| IN        | - | Relâmpagos Intra-nuvem   |
| CPTEC     | - | Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos                 |
| Cemaden   | - | Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais |
| UE        | - | Umidade Específica   |
| GRADS     | - | Grid Analysis and Display System                                 |
| DECEA     | - | Departamento de Controle do Espaço Aéreo                         |
| GOES-16   | - | <i>Geoestationary Operational Environmental Satellite – 16</i>   |
| ECMWF     | - | <i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>        |
| ABI -     | - | Advanced Baseline Imager   |
| VIL       | - | Conteúdo de Água Líquida Integrado Verticalmente                 |
| TOA       | - | <i>Time-of-Arrival</i>   |
| ET        | - | <i>Echo Top</i>  |

|        |   |  |
|--------|---|--|
| IR     | - | Infra-Red.   |
| WP     | - | Water Vapor  |
| CAPPI  | - | Constant Altitude Plan Position Indicator          |
| DVIL - | - | Vertically Integrated Liquid Water Content Density |
| °C     | - | Graus Celsius                                      |
| AW     | - | Altura de Waldvogel                                |

# SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                | <b>6</b>  |
| <b>2. DADOS E METODOLOGIA .....</b>       | <b>9</b>  |
| 2.1. DADOS .....                          | 9         |
| 2.2. ANÁLISE SINÓTICA.....                | 9         |
| 2.3. CARACTERÍSTICAS DA PRECIPITAÇÃO..... | 10        |
| 2.4. ATIVIDADE ELÉTRICA .....             | 11        |
| <b>3. RESULTADOS.....</b>                 | <b>12</b> |
| 3.1. ANÁLISE SINÓTICA.....                | 12        |
| 3.2. CARACTERÍSTICAS DA PRECIPITAÇÃO..... | 15        |
| <b>4. CONCLUSÃO.....</b>                  | <b>26</b> |
| <b>5. REFERÊNCIAS .....</b>               | <b>28</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

Santa Rita do Sapucaí é um município localizado no sul do Estado de Minas Gerais em uma área fisicamente caracterizada pela alternância entre montanhas e vales que formam a bacia do rio Sapucaí. Santa Rita do Sapucaí também é denominada de “Vale da Eletrônica”, por ser um dos principais polos de desenvolvimento tecnológico do país, com reconhecimento nacional e internacional (INATEL, 2020). De acordo com o censo de 2010, o município conta com uma população de 37,7 mil habitantes (IBGE, 2020) e tem sua economia baseada nas atividades industriais voltadas para as áreas de eletrônica, telecomunicações e informática, além de atividades agropecuárias, sendo os principais produtos, o café e o leite (SANTA RITA DO SAPUCAÍ, 2020).

No final da tarde do dia 24 de outubro de 2019, a cidade de Santa Rita do Sapucaí foi atingida por uma tempestade que produziu granizo, com duração de aproximadamente 30 minutos (JORNAL G1, 2019). Para esse dia, a Defesa Civil havia emitido diversos alertas de chuva para a Região Sul de Minas Gerais, inclusive, alertando sobre a possibilidade de granizo entre às 17 e 19 horas local, justamente o período em que o município foi atingido pela tempestade (ESTADO DE MINAS, 2019). Além de destelhar casas e derrubar árvores, a chuva de granizo abalou a estrutura de um posto de combustível, danificou o galpão de uma indústria, quebrou vidros de alguns veículos, cedeu o teto de uma escola da cidade e ocasionou a morte de uma moradora que tentou se abrigar debaixo de uma árvore que caiu sobre ela (JORNAL G1, 2019). Segundo a companhia que fornece energia para o município, a chuva também provocou danos no sistema elétrico, interrompendo o fornecimento de energia em vários pontos da cidade (UOL NOTÍCIAS, 2019).

A formação de uma tempestade está associada a uma combinação de fatores como: (a) presença de um mecanismo de levantamento do ar, que pode ser, por exemplo, o encontro do vento com uma barreira topográfica (fator dinâmico) ou convecção (fator termodinâmico); (b) o ar que ascende deve conter umidade; (c) presença de instabilidade (a parcela de ar deve ser mais quente do que a das camadas para onde se desloca) e (d) o cisalhamento vertical do vento não deve ser muito fraco e nem muito intenso, pois em ambos os casos as nuvens não conseguem se formar (ALCÂNTARA, 2011). A presença desses fatores pode ser indicada através do número de Richardson, que é baseado na relação entre *Convective Available*

*Potential Energy* (CAPE) e cisalhamento vertical entre 6000 m e 500 m acima da superfície (WEISMAN; KLEMP, 1984; STENSRUD *et al.*, 1997).

Com base no parágrafo anterior, nota-se que as tempestades podem ser mais frequentes em determinadas regiões do globo onde há condições propícias. Considerando a América do Sul (AS), essa é caracterizada pelo regime de monção, no qual o período chuvoso se inicia em meados da primavera (REBOITA *et al.*, 2010; ASFAHQ *et al.*, 2020). Durante o período chuvoso, a atividade convectiva se estende da Amazônia ao sudeste do Brasil caracterizando a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (SILVA *et al.*, 2018). Em altos níveis, se estabelece uma circulação anticiclônica, denominada Alta da Bolívia (AB) e corrente abaixo, um cavado próximo ao litoral do Nordeste do Brasil (REBOITA *et al.*, 2010, SILVA *et al.*, 2019). Já em baixos níveis, a configuração atmosférica é caracterizada pela presença da Baixa do Chaco (BCH) e/ou do Noroeste da Argentina. Esses sistemas em superfície, juntamente com a Cordilheira dos Andes, ajudam a canalizar o transporte de umidade e calor da região Amazônica para os subtropicais na forma de Jatos de Baixos Níveis (JBN) (VERA *et al.*, 2006; GAN *et al.*, 2016; SANTOS e REBOITA, 2018). O JBN, por sua vez, acaba tornando as condições ambientais favoráveis para a gênese e manutenção de Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM's) (BEZERRA, 2016), que são nuvens convectivas responsáveis por grande parte da precipitação da estação quente nas regiões tropicais e temperadas da AS. Portanto, essas características da AS, com a ZCAS e o JBN, são elementos importantes para a geração de tempestades.

No Brasil, as regiões Sul e Sudeste do Brasil são as que apresentam a maior frequência de tempestades severas (SILVA DIAS; GRAMMELSBACHER, 1991; MATTOS, 2020) e isso está associado ao padrão climatológico do escoamento atmosférico, principalmente com a influência do JBN (PINHEIRO *et al.*, 2013; SANTOS e REBOITA, 2019; MONTINI *et al.*, 2019). Entre a primavera e outono, muitos casos de precipitação no sul de MG estão associados tanto ao suprimento de umidade através do JBN quanto pelo transporte de umidade do oceano Atlântico pelos ventos do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (REBOITA *et al.*, 2010; SILVA *et al.*, 2019; MARENGO *et al.*, 2020). Por exemplo, as grandes inundações no sul de MG nos anos de 1991 e 2000 ocorreram no verão associadas à ZCAS (REBOITA *et al.*, 2017). Além disso, as chuvas em Santa Rita do Sapucaí também podem ocorrer por

circulação de brisa de vale-montanha (efeito de mesoescala) e por convecção (efeito local) (CAMPOS *et al.*, 2016).

Em termos de climatologia de granizo na AS, há um pico de ocorrência de tempestades com granizo no norte da Argentina, se estendendo ao Paraguai, Uruguai e partes de Brasil e Bolívia no início da primavera (CECIL; BLANKENSHIP, 2012). Considerando apenas o Brasil, a maior frequência de tempestades com granizo ocorre nos estados da região Sul seguida pela área formada entre o sul-sudeste de MG, Espírito Santo e Rio de Janeiro (MARTINS *et al.*, 2017). De acordo com Barnes (2001), Martins *et al.* (2017) e Beal *et al.* (2020), o ciclo de eventos de granizo possui variabilidade sazonal, com maior frequência na primavera e verão, segundo Barnes (2001) e entre o final do inverno e primavera, segundo Martins *et al.* (2017) e Beal *et al.* (2020). Uma justificativa para isso é o forte aquecimento diurno da superfície, que serve como “gatilho” para a atividade convectiva e, conseqüentemente, para a formação de tempestades.

As tempestades severas são caracterizadas por possuírem correntes de ar ascendentes e descendentes bastante intensas, por gerar granizo acima de 2 cm, e/ou rajadas de ventos destrutivas, com velocidade acima de 50 kt e/ou amplificar processos de estiramento de vórtices em direção à superfície, gerando tornados (JOHN; DOSWELL, 1992; MOLLER, 2001; NASCIMENTO, 2005). Estes tipos de tempestades podem causar prejuízos à população, como inundações, perdas materiais e em piores casos, podem causar perda de vidas (LEAL *et al.*, 2012; LIMA; GERTRUDES, 2013). Entender os processos físicos sobre a formação e ocorrência dessas tempestades pode produzir subsídio para o desenvolvimento de novas ferramentas de *nowcasting* e, com isso, minimizar danos à sociedade.

A literatura sobre aspectos físicos das tempestades severas no Brasil não é muito extensa. Pode-se citar: Nascimento (2005), Tavares e Mota (2012), Silva Neto (2014), Regis (2017), Abreu (2018) e Mattos *et al.* (2020). Regis (2017) estudou os aspectos sinóticos, termodinâmicos e físicos de uma tempestade que causou granizo na cidade de Itajubá, MG, em 17 de setembro de 2016. Mattos *et al.* (2020), realizaram uma análise similar, porém para um evento severo ocorrido no município de Bauru, SP, onde através de seus resultados demonstraram a importância da combinação das informações sinóticas, físicas e elétricas das tempestades para auxiliar na previsão imediata de tempo. Gatti (2019), estudou uma série de 9 eventos de tempo severo, associados a formação de SCM's em Santa Catarina, com a intenção de verificar quais

os possíveis danos que os mesmos podem gerar. Kneib (2007) fez um estudo para o estado do Paraná, onde demonstrou a importância do monitoramento de linhas de instabilidade (LI), uma vez que estes sistemas podem provocar uma mudança rápida nas condições de tempo, pois se desenvolvem em curto prazo, o que pode ocasionar vendavais e inundações, trazendo prejuízos sociais e econômicos. Abreu (2018) analisou nove tempestades de granizo que ocorreram no estado de São Paulo, com base em dados do radar de São Roque (SP) e dados da rede de monitoramento de descargas elétricas provenientes do Sistema Brasileiro de Detecção de Descargas Atmosféricas (BrasilDAT), a fim de se compreender os parâmetros microfísicos e elétricos destas tempestades. A partir desses estudos, foi possível entender melhor os processos atmosféricos e termodinâmicos que tornaram possíveis a ocorrência do tempo severo em cada um dos locais mencionados.

Diante desse contexto, o objetivo principal deste trabalho é descrever o ambiente sinótico e as características físicas da precipitação decorrente da tempestade registrada no dia 24 de outubro de 2019 em Santa Rita do Sapucaí (MG). Esse estudo é de extrema importância, pois é a primeira vez que uma tempestade ocorrida em Santa Rita do Sapucaí está sendo analisada do ponto de vista meteorológico.

## **2. DADOS E METODOLOGIA**

### **2.1. Dados**

Para a realização deste estudo foram utilizadas diferentes fontes de dados: i) reanálise do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ERA5)(ECMWF; HERSBACH *et al.*, 2019), ii) dados do radar de São Roque que pertence ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), iii) imagens do satélite *Geostationary Operational Environmental Satellite –16* (GOES-16) e iv) registros de relâmpagos do Sistema Brasileiro de Detecção de Descargas Elétricas (BrasilDAT). Mais informações sobre esses dados estão apresentadas nas próximas seções.

### **2.2. Análise Sinótica**

A reanálise ERA5 foi utilizada na análise do ambiente sinótico em que ocorreu a tempestade. A reanálise possui resolução horizontal de aproximadamente 25 km e

frequência horária. As variáveis obtidas foram umidade específica, geopotencial, velocidade vertical, componentes do vento e temperatura do ar nos 17 níveis disponíveis. Também foram utilizadas a pressão ao nível médio do mar, temperatura do ar a 2 metros de altura e componentes do vento a 10 metros entre os dias 22 a 25 de outubro de 2019.

De posse desses dados gerou-se os seguintes campos sinóticos: umidade específica em 850 e 500 hPa; cisalhamento vertical do vento (necessário para a manutenção da tempestade): calculado entre 500 e 1000 hPa e entre 850 e 1000 hPa; direção e intensidade do vento em 850 hPa (para inferir se há convergência na região da tempestade); divergência de massa em 250 hPa e movimento em 850 hPa (para verificar se a divergência está favorecendo o levantamento do ar) e advecção horizontal de temperatura em 850 hPa (para verificar se há advecção quente na região da tempestade).

### **2.3. Características da Precipitação**

Para análise das características da precipitação utilizou-se informações do Radar Meteorológico localizado na cidade de São Roque, no Estado de São Paulo. Este radar, é operado pelo 1º Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo (CINDACTA I) que pertence ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e está localizado na latitude 23°36'07" Sul e longitude 47°05'39" Oeste, em uma altitude de 1147 m, sendo um dos dois radares que abrangem a região de estudo. Este é um radar Doppler que opera na banda S (2,7 GHz a 2,9 GHz), comprimento de onda de 10 cm com uma largura de pulso de 1,98 graus; sua estratégia de varredura acontece em escala temporal de 10 minutos. Os dados utilizados são os *Constant Altitude Plan Position Indicator* (CAPPI) de refletividade (dBZ) com resolução temporal e espacial horizontal de 10 min e 1 km, respectivamente. Os CAPPI's possuem 14 níveis na vertical desde 2 km até 15 km de altura, com resolução vertical de 1 km.

A taxa de precipitação foi calculada utilizando a Relação Z-R denominada de Marshall-Palmer (1948), expressa pela seguinte equação:

$$Z = 200R^{1,6}, \quad (1)$$

em que Z é a refletividade em  $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$  e R a taxa de precipitação em  $\text{mm h}^{-1}$ .

Para a análise da massa de água líquida da nuvem que gerou o granizo foi utilizado o parâmetro Conteúdo de Água Líquida Integrado Verticalmente (VIL). O VIL

representa a massa de água contida em um volume e área unitários ( $kg\ m^{-2}$ ), foi proposto por Clark e Greene (1972) sendo calculado através da seguinte formulação:

$$VIL = 3,44 \times 10^{-6} \int_{BaseNuvem}^{TopoNuvem} Z^{4/7} dH, \quad (2)$$

em que, H é a altura em metros e Z é a refletividade em  $mm^6\ m^{-3}$ .

O DVIL é a densidade do conteúdo de água líquida integrado verticalmente, representa a divisão do VIL ( $kg\ m^{-2}$ ) pelo eco top de 10dBZ (m), como na equação 3:

$$DVIL = \left( \frac{VIL}{Eco\ Top\ 10\ dBZ} \right) * 1000 \quad (3)$$

Sendo DVIL a Densidade do Conteúdo de Água Líquida Integrado Verticalmente em  $g\ m^{-3}$ , VIL o conteúdo de água líquida integrado verticalmente em  $kg\ m^{-2}$  e Eco Top 10dBZ é a altura máxima em metros do Eco com 10dBZ de refletividade. Waldvogel et al. (1979) definiu como Altura de Waldvogel (AW), a altura do nível de 45 dBZ acima da camada de derretimento que pode conter granizo e pode ser calculada pela equação 4.

$$AW = Altura\ (45\ dBZ) - Altura\ (0\ ^\circ C) \quad (4)$$

Sendo AW a Altura de Waldvogel medida em m, Altura (45dBZ) é a altura em m que se encontra valores de refletividade de 45 dBZ e Altura (0°C) é a altura onde se encontra valores de temperatura de 0°C.

Foi utilizado também o eco top de 20 dBZ e 35 dBZ, que representa a altura máxima do eco de 20 dBZ e 35 dBZ respectivamente ( $1\ mm\ h^{-1}$ ) e representa a profundidade dos sistemas precipitantes. Esse parâmetro representa a altura da nuvem estimada em km.

## 2.4. Atividade Elétrica

Os dados de relâmpagos para a avaliação da atividade elétrica da tempestade, foram obtidos para o dia 24 de outubro de 2019, entre 17 e 19 horas (período em que ocorreu o evento) e são provenientes da rede BrasilDAT, que é uma rede de detecção e monitoramento de descargas elétricas baseada na tecnologia de sensores da *Earth Network* que abrange as regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste do Brasil. Esta rede é operada pelo grupo Eletricidade Atmosférica (ELAT) e utiliza o método *time-of-arrival* (TOA) para detectar emissões das descargas de retorno entre 1 Hz e 12 MHz com monitoramento em tempo real. Os dados foram disponibilizados para essa pesquisa pela empresa CLIMATEMPO. Os arquivos estão no formato de texto e

contêm as seguintes informações: data, horário, latitude e longitude e pela discriminação do tipo de relâmpago em intra-nuvem (IN) e nuvem-solo (NS).

Os relâmpagos NS e IN serão contabilizados ao longo do ciclo de vida da nuvem que produziu a ocorrência de granizo. Para isso, para cada passo do ciclo de vida da tempestade será contabilizado a quantidade de relâmpagos registradas dentro de um quadrado centrado na nuvem durante a varredura do radar, ou seja, a cada intervalo de 10 min. Como os relâmpagos são formados através das colisões entre *graupel* e cristais de gelo dentro das nuvens, eles possuem uma forte associação e podem prever a ocorrência do granizo em superfície.

Para analisar a profundidade das nuvens, foram utilizados dados de satélite do canal vapor d'água (WV) e infravermelho (IR). Estas informações são provenientes do sensor *Advanced Baseline Imager* (ABI), do GOES-16, que possui 16 canais espectrais e uma resolução temporal de 10 min. Para o cálculo de análise da profundidade das nuvens, foi utilizada a metodologia proposta por Schmetz *et al.* (1997). Essa metodologia que consiste no cálculo da diferença entre temperatura de brilho do canal vapor d'água (6,2  $\mu\text{m}$ ) e infravermelho (10,3  $\mu\text{m}$ ) (TWV-TIR), o que permite localizar nuvens profundas capazes de penetrar a tropopausa e injetar umidade na baixa estratosfera. Valores positivos dessa diferença são associados a topos "*overshooting top*" (nuvens que ultrapassam a tropopausa), que são encontrados em regiões de baixa temperatura de brilho e maior atividade de relâmpagos observados ao redor. As nuvens que ultrapassam a tropopausa são capazes de produzir alta concentração de partículas de gelo e são geralmente indicadoras de tempestades severas (BEDKA, 2011).

### **3. RESULTADOS**

#### **3.1. Análise Sinótica**

Nesta etapa são apresentados os campos sinóticos entre os dias 22 e 24 de outubro de 2019. Nesses dias nenhuma frente fria atuou no sudeste do Brasil (Figura 1). No dia 22 há um cavado invertido no campo da pressão ao nível médio do mar (PNMM) (Figura 1D) entre o norte de MG e o oceano Atlântico que ajuda a organizar a banda de convergência de umidade mostrada no dia 23 (Figura 1E), mas que não persiste até o dia 24. Por outro lado, no dia 24 há um cavado em superfície entre o Estado de São Paulo (SP) e o oceano Atlântico que ajuda a configurar uma área de

menor pressão. As regiões com cavado em superfície e zona de convergência de umidade são caracterizadas por nebulosidade que aparece organizada na forma de banda estendendo-se da Amazônia em direção ao Atlântico (Figura 1A-C).

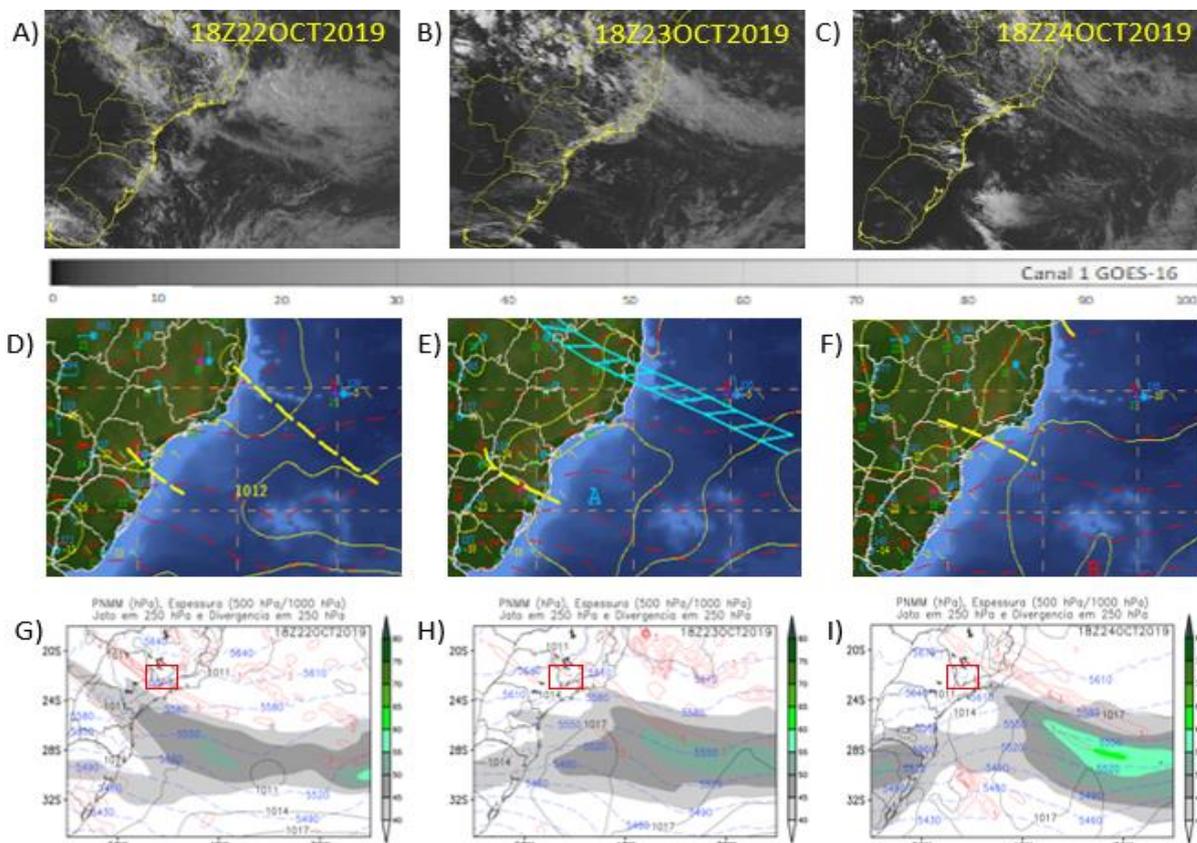


Figura 1 - Para o dia 22, 23 e 24 de outubro de 2019 às 1800 UTC: Imagens do satélite GOES -16 do canal vapor d'água (A-C), cartas de superfície (D-F) e campos sinóticos de pressão ao nível médio do mar (hPa, linhas pretas), espessura da camada 500/1000 hPa (gpm, linhas azuis tracejadas), jatos em altos níveis ( $m s^{-1}$ , colorido) e divergência de massa em 250 hPa ( $Kg s^{-1}$ , linhas vermelhas (G-I). A caixa vermelha indica a região de estudo.

Com relação à circulação atmosférica em altos níveis, do dia 22 ao 24 de outubro de 2019, o jato subtropical migrou ligeiramente para norte de forma que o setor norte de sua entrada atingiu o RJ e, portanto, também o sul de MG embora não mostrado na Figura 1(G-I). Através de análise dinâmica da atmosfera (Holton, 2004) mostra-se que o lado polar da entrada dos jatos em altos níveis promovem divergência de massa em altos níveis e essa característica é mostrada no sul de MG na Figura 1(G-I). A divergência ajuda a organizar e intensificar os movimentos ascendentes na atmosfera. Esse suporte aos movimentos ascendentes também ocorreu ao longo do dia 24, inclusive no período da tempestade em Santa Rita do Sapucaí (SRS) (Figura 2E-H). A ocorrência de movimentos ascendentes é mostrada na Figura 3 através da

variável ômega. O ar ascendente se concentra na fronteira de MG, SP e RJ. Com a ocorrência de ventos intensos em altos níveis entre SP e sul de MG há condições de cisalhamento vertical do vento sendo superior a 10 m/s entre 500 e 1000 hPa ao longo do dia 24 (Figura 2I-L). Ressalta-se que a formação de tempestades severas depende da existência de cisalhamento vertical que não seja muito fraco e também não muito intenso. Nas análises da próxima seção serão discutidos mais detalhes sobre os limiares do cisalhamento vertical.

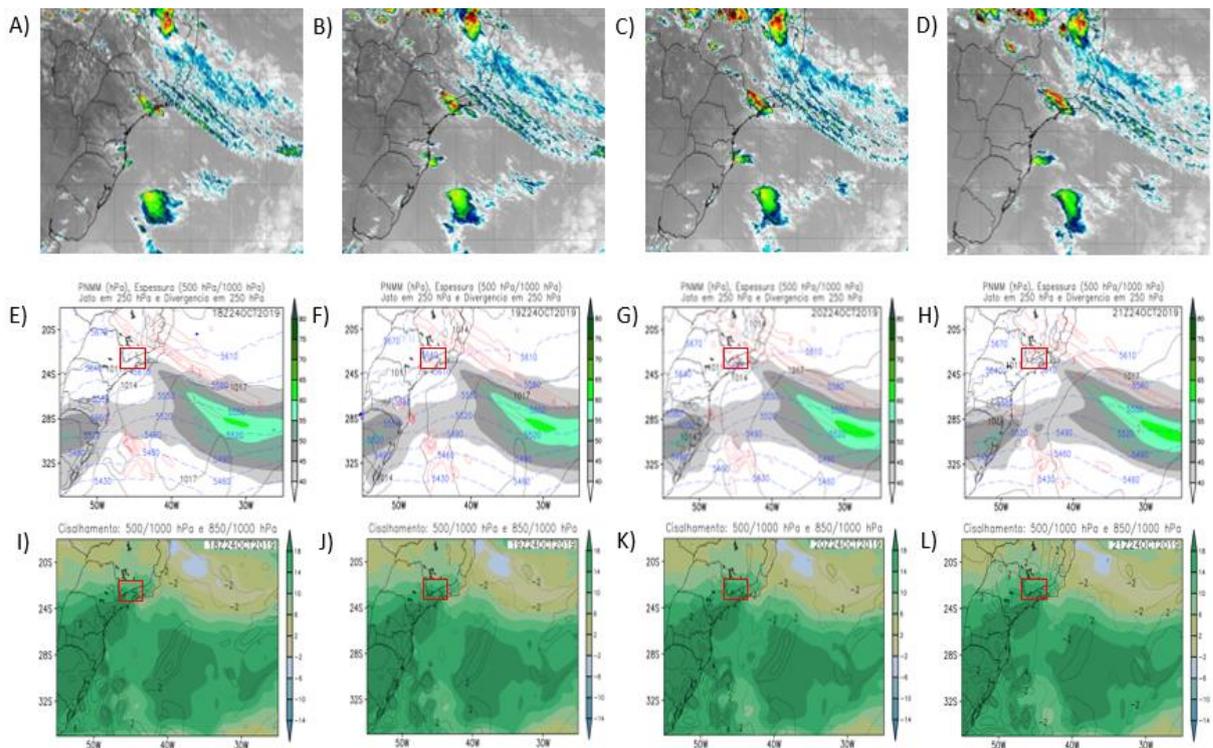


Figura 2 - Para o dia 24 de outubro de 2019: - Imagem do satélite GOES-16 no canal IR com o campo de temperatura de brilho realçada às 1800, 1900, 2000 e 2100 UTC. Campos Sinóticos às 1800, 1900, 2000 e 2100 UTC do dia 24 de outubro de 2019: (D-G) pressão ao nível médio do mar (hPa, linhas pretas), espessura da camada 500/1000 hPa (gpm, linhas azuis tracejadas), jato em altos níveis ( $m s^{-1}$ , colorido) e divergência de massa em 250 hPa ( $Kg s^{-1}$ , linhas vermelhas); (I-L) intensidade do cisalhamento vertical do vento ( $m s^{-1}$ , colorido) calculado entre 500 e 1000 hPa e entre 850 e 1000 hPa.

A Figura 3 apresenta a evolução da umidade específica nos níveis de 500, 850 e 925 hPa entre 1800 e 2100 UTC. Em todos os níveis e horários, os maiores valores de umidade específica ocorrem nas proximidades do norte de MG, sendo seguida dos valores elevados no sul de MG. A presença de umidade nessa região, segundo a Figura 3, é mais associada com o transporte em 925 hPa pela circulação anticiclônica próxima à costa. Como havia disponibilidade de umidade, principalmente, em 925 hPa pelo transporte feito pelos ventos do oceano para o continente, o ar que ascendeu,

condensou e contribuiu para a formação da tempestade. A ascensão do ar pode também ter sido forçada pelo aquecimento local.

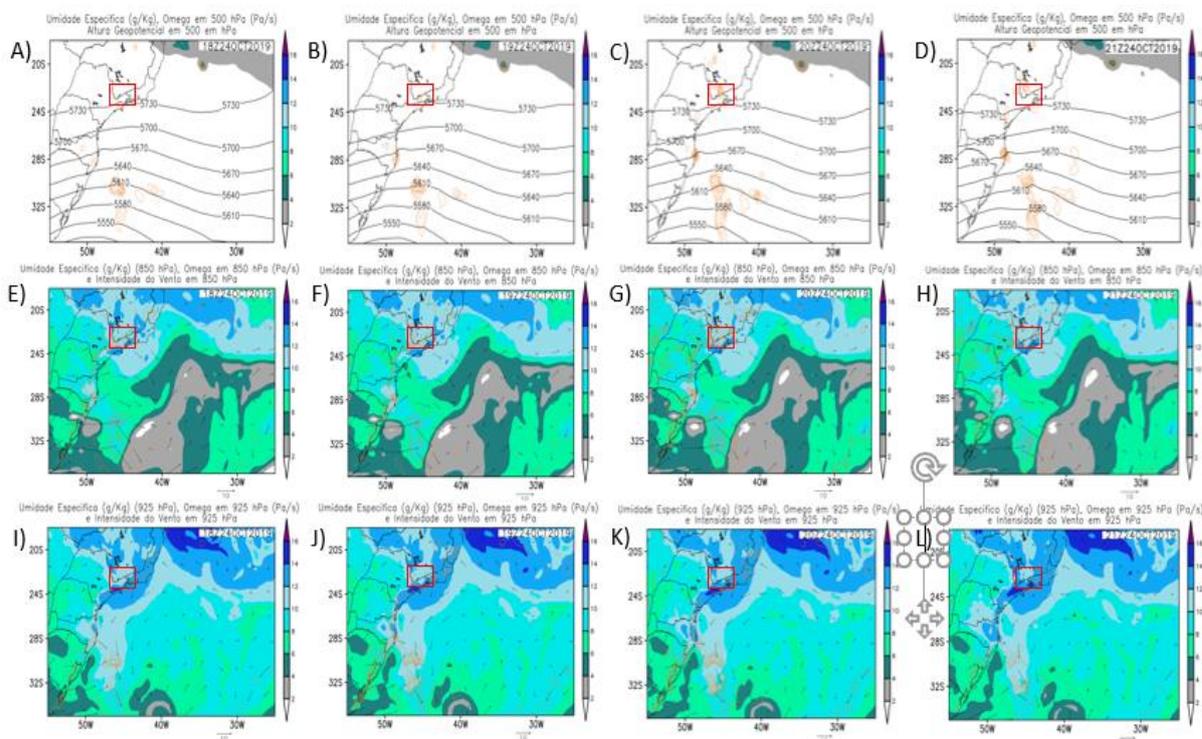


Figura 3 - Campos Sinóticos às 1800, 1900, 2000 e 2100 UTC do dia 24 de outubro de 2019: (A-D) umidade específica (g/ Kg, colorido), ômega em 500 hPa (Pa/s, linhas vermelhas pontilhadas) e altura geopotencial em 500 hPa (gpm, linhas de contorno pretas); (E-H) umidade específica em 850 hPa (g/Kg, colorido), ômega em 850 hPa (Pa/s, linhas vermelhas tracejadas), intensidade do vento superior a  $10 \text{ m s}^{-1}$  em 850 hPa ( $\text{m s}^{-1}$ , vetores); (I-L) umidade específica em 925 hPa (g/Kg, colorido), ômega em 925 hPa (Pa/s, linhas vermelhas tracejadas), intensidade do vento superior a  $10 \text{ m s}^{-1}$  em 925 hPa ( $\text{m s}^{-1}$ , vetores).

Da análise sinótica pode-se concluir que a tempestade formada na cidade de SRS no dia 24 de outubro de 2019 pode ter sido uma resposta dinâmica e termodinâmica das características da atmosfera no sul de MG. Em termos da dinâmica a divergência de massa em altos níveis contribuiu para organizar os movimentos ascendentes na atmosfera e, em termos de características termodinâmicas, esses movimentos verticais também podem ter contribuição do aquecimento local da superfície e, como havia condições úmidas no sul de MG, isso contribuiu para a formação das nuvens e chuva.

### 3.2. Características da Precipitação

Como a cidade de SRS não possui estação meteorológica, a hora estimada da chuva foi inicialmente obtida através de registros em jornais (JORNAL G1, 2019)

sendo estimada sua ocorrência aproximadamente às 2100 UTC. Uma análise mais precisa é mostrada através de estimativas de radar. Na primeira etapa desta seção será realizada uma análise das características dos topos das tempestades observadas por informações de satélite e em seguida, será avaliada as propriedades dos sistemas precipitantes através de informações provenientes de radar meteorológico.

A Figura 4A, C, E, G e I mostra o mapa espacial da diferença de temperatura TWV-TIR para os horários entre 1900 e 2100 UTC. Ao analisar a figura observa-se no sul do Estado de Minas Gerais, há a presença de uma banda de nuvens com orientação noroeste-sudeste. Diferenças positivas (+2K) na temperatura de brilho são observadas na mesma região onde está concentrada uma alta taxa de relâmpagos (Figura 4 B, D, F, H e J). Esses resultados são coerentes com o trabalho de *Machado et al.* (2009), que indicaram que diferenças positivas da temperatura de brilho estão associadas a ocorrência de relâmpagos. Diferenças positivas na temperatura de brilho sugerem a existência de nuvens com topos profundos, que ultrapassam a tropopausa e que possuem grande quantidade de gelo. Intensas correntes ascendentes combinadas com maior disponibilidade de gelo no topo das nuvens, favorecem intensa transferência de cargas entre hidrometeoros durante as colisões (*Jayaratne et al.*, 1983). Na presença de água super-resfriada em regiões com fortes correntes ascendentes, o processo de colisão entre cristais de gelo e *graupel* é condição fundamental para a formação de relâmpagos (*Reynolds et al.* 1957).

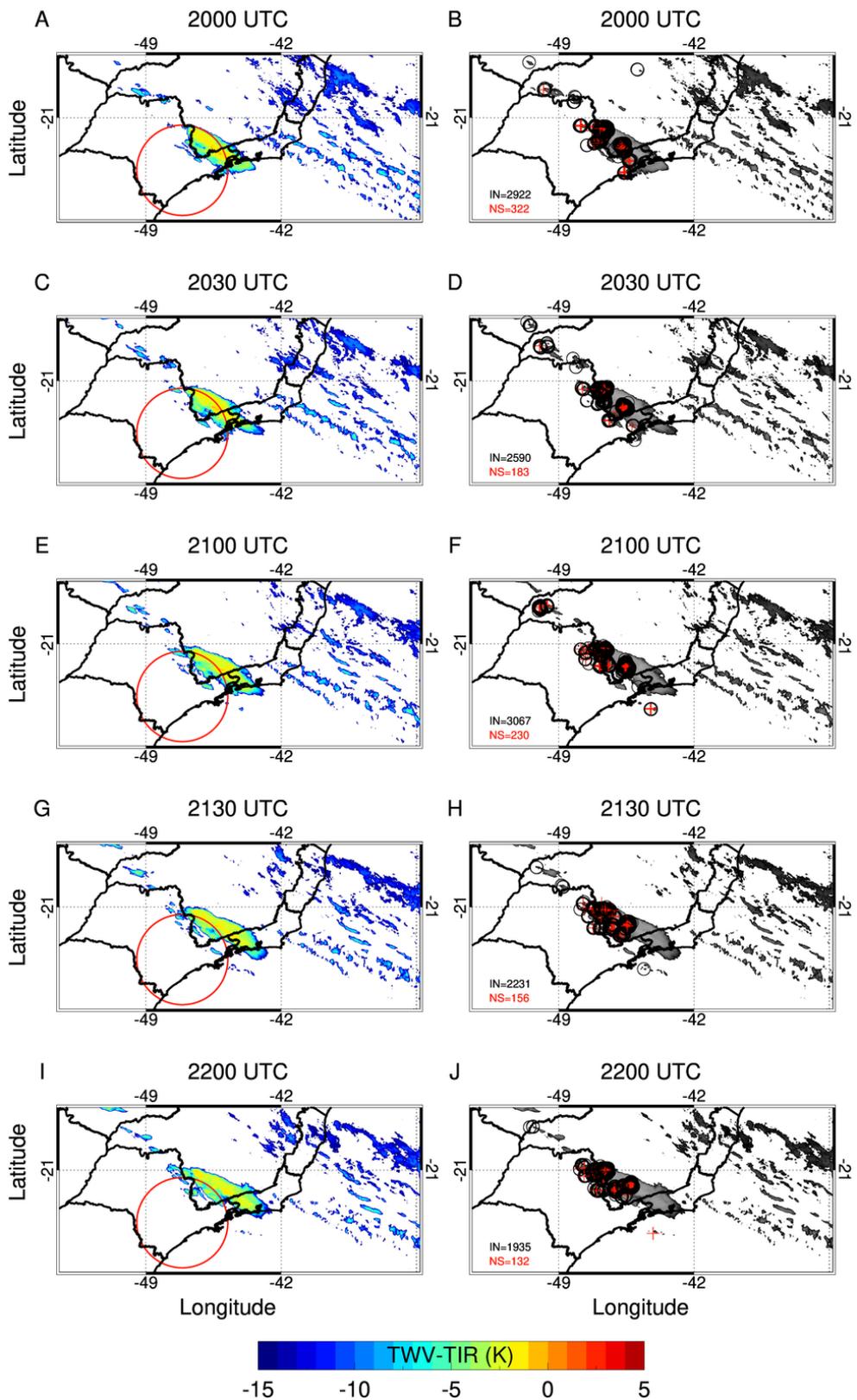


Figura 4 - Diferença de temperatura de brilho (K) entre o canal do vapor d'água (TW, 6,5 μm) e a temperatura de brilho no canal do infravermelho (TIR, 10,7 μm) (TWV-TIR, região colorida) no dia 24 de outubro de 2019 às (A) 1900, (C) 1930, (E) 2000, (G) 2030 e (I) 2100 UTC. Estão representados também (Figura 4 A, C, E, G e I) os relâmpagos intra-nuvem (círculo aberto na cor

preta) e nuvem-solo positivo (cruz na cor vermelha) e o círculo vermelho indica o raio de 240 km de atuação do radar de São Roque.

A Figura 5 mostra o monitoramento através de imagens do canal infravermelho do satélite GOES-16 da tempestade que atingiu SRS. Ao analisar a figura observa-se que às 1700 UTC (Figura 4A) existe a presença de um pequeno núcleo convectivo nos arredores da região de estudo ( $-60^{\circ}\text{C}$ ). Ao transcorrer do tempo nota-se um aumento e intensificação da tempestade, até que às 2000 UTC (Figura 4D) atinge máxima extensão espacial, com temperatura de brilho extremamente baixa ( $< -65^{\circ}\text{C}$ ) (aproximadamente 40 minutos antes da tempestade atingir a cidade). Às 2200 UTC, horário no qual a tempestade já havia atingido o município, o núcleo convectivo, apesar de ainda possuir grande extensão espacial, começou a diminuir em intensidade.

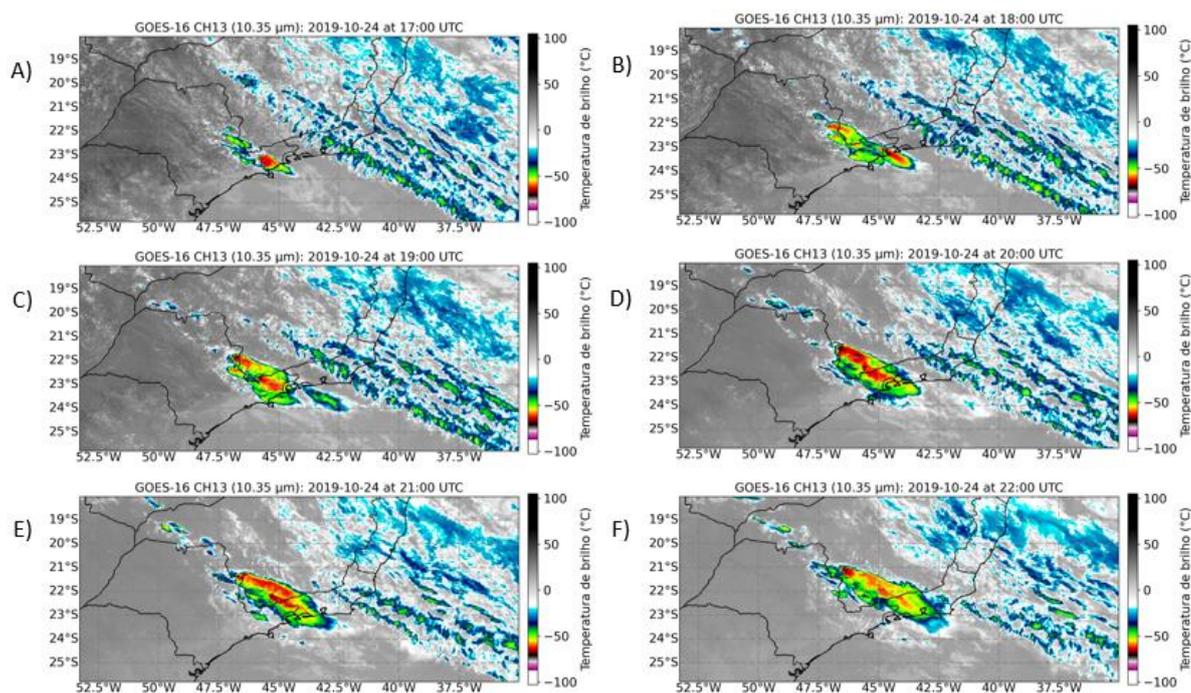


Figura 5 - Imagens do GOES - 16 do canal infravermelho ( $10,35\ \mu\text{m}$ ) realçada entre 1700 e 2200 UTC para o dia 24 de outubro de 2019 com resolução espacial de 2 km.

As Figuras 6 e 7 mostram o CAPPI de 3,0 km de altura da variável refletividade. A tempestade adentrou a área do radar às 1520 UTC (figuras não mostradas) e foi monitorada até às 2120 UTC (totalizando 6 h), momento em que saiu do alcance (distância  $> 240\ \text{km}$  do centro do radar) do radar (Figura 7P). A tempestade que atingiu a cidade de SRS é formada por algumas células convectivas intensas, que no decorrer

de seu ciclo de vida se unem em uma única célula convectiva maior. Em seu momento de maior intensidade (entre 2000 e 2100 UTC, Figura 7I-P) a tempestade apresenta núcleos convectivos com refletividade acima de 60 dBZ indicando a presença de alta concentração de gotas de chuva grandes (RINEHART, 2010). Estes resultados indicam uma tempestade intensa, com possível queda de granizo (GOMES, 2006; MELO, 2016). A tempestade possui propagação para nordeste, com inclinação inicialmente para sudoeste-nordeste e posteriormente, com o passar do tempo se torna de noroeste-sudeste (Figura 6 e 7).

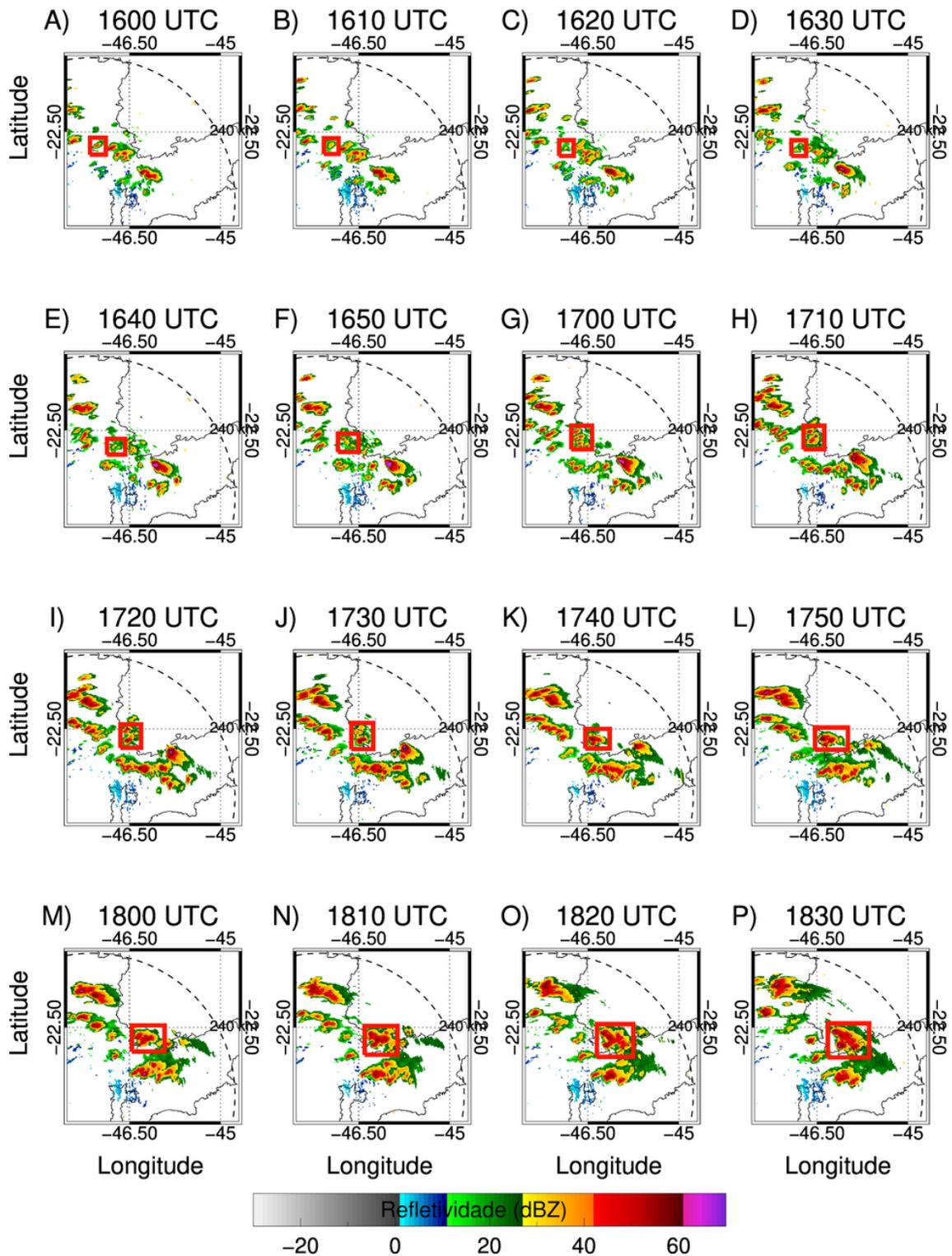


Figura 6 - *Constant Altitude Plan Position Indicator* (CAPPI) de refletividade (dBZ) em 3,0 km de altura para o dia 24 de outubro de 2019 entre 1600 e 1830 UTC. O quadrado na cor vermelha representa a delimitação da área da tempestade que foi rastreada manualmente.

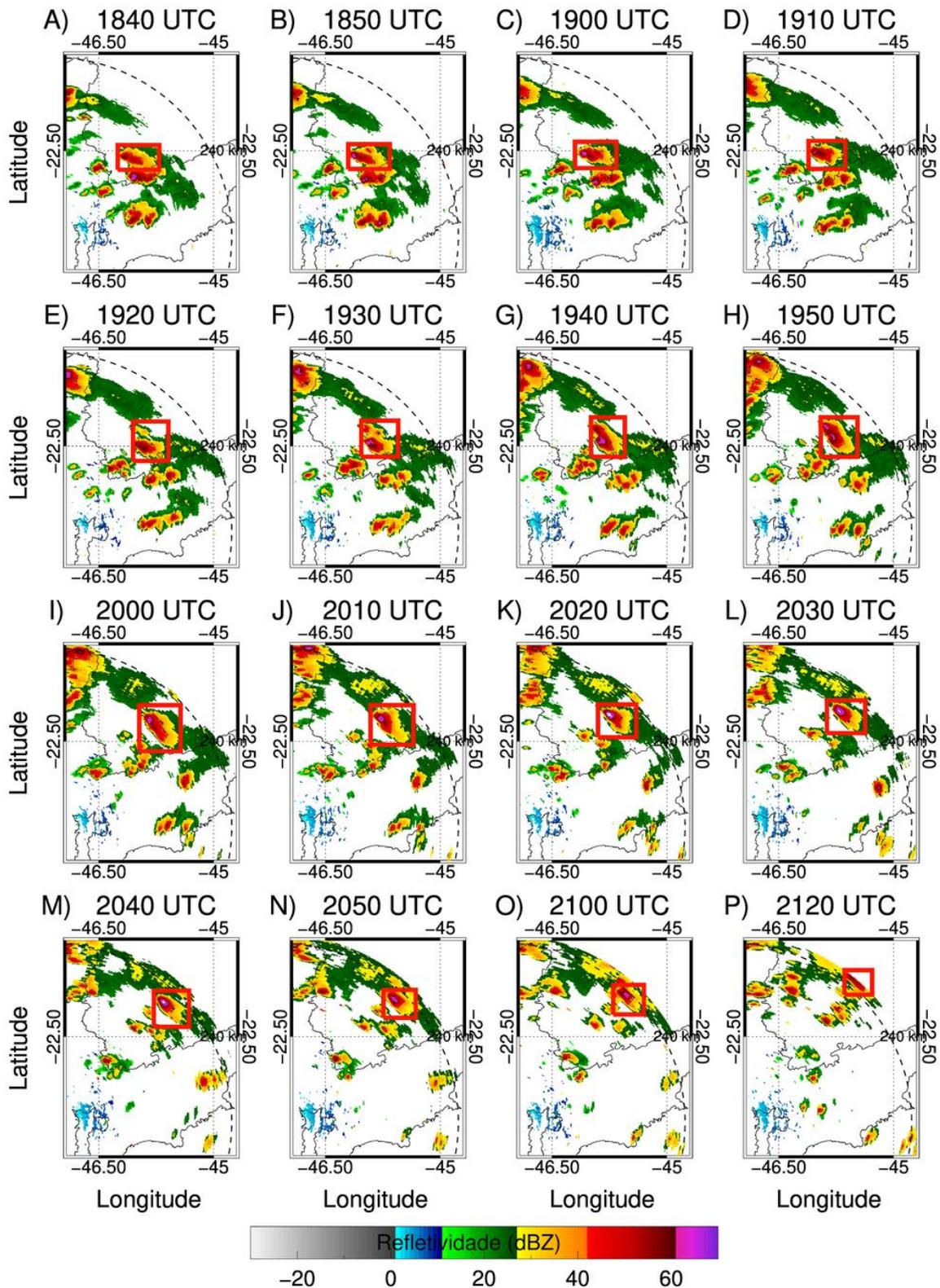


Figura 7 - Constant Altitude Plan Position Indicator (CAPPI) de refletividade (dBZ) em 3,0 km de altura para o dia 24 de outubro de 2019 entre 1840 e 2120 UTC. O quadrado na cor vermelha representa a delimitação da área da tempestade que foi rastreada manualmente.

Com o objetivo de avaliar a evolução das propriedades físicas estimadas por radar, foi aplicado o método lagrangeano para o rastreamento da célula convectiva associada a tempestade em análise. Para isso, foi analisado as seguintes variáveis

dentro do retângulo mostrado nas Figuras 6 e 7: i) total de relâmpagos IN e NS, ii) área da tempestade e valores máximos de iii) refletividade, iv) Eco top de 20 dBZ (km), v) Eco Top de 35 dBZ (km), vi) Conteúdo Integrado Verticalmente de Água Líquida (VIL,  $\text{kg m}^{-2}$ ), vii) Densidade de VIL (DVIL,  $\text{g m}^{-3}$ ) e viii) Altura de Waldvogal (AW, km). Os resultados são mostrados na Figura 8.

Ao analisar os resultados observa-se que a tempestade apresenta o máximo de relâmpagos intra-nuvem (#3500/ 10 min) e nuvem-solo (#300/ 10 min) aproximadamente ocorrendo cerca de 20 min antes da observação de granizo em superfície. Este pico na quantidade de relâmpagos totais (intra-nuvem e nuvem-solo), antecedendo o evento de tempo severo em superfície é semelhante ao *Lightning Jump* (GOODMAN *et al.*, 1988; SCHULTZ *et al.*, 2011). Este fenômeno ocorre como consequência da rápida intensificação da corrente ascendente, associada a forte convecção no interior da tempestade.

A disponibilidade de condensação associada à rápida intensificação da velocidade da corrente ascendente na nuvem auxilia a formação de cristais de gelo que, ao colidirem entre si possibilitam a formação de partículas de gelo maiores (*graupel* ou granizo) e a taxa de colisão destas, definem a estrutura elétrica da nuvem e influenciam fortemente a formação de descargas elétricas (SPERLING, 2018). Quando o fluxo da corrente de ar ascendente da tempestade enfraquece ou não suporta o peso das partículas de gelo, estas caem em forma de precipitação. Como as pedras de granizo e *graupel* estão associadas a grandes partículas podem não derreter completamente em gotas de chuva e acabam por chegarem ao solo ainda na fase de gelo.

A Figura 8 mostra a evolução temporal dos relâmpagos IN e NS, Eco Top de 20 dBZ, área da tempestade e refletividade (dBZ). Observa-se que a atividade elétrica associada à tempestade que atingiu a cidade de SRS apresentou um rápido aumento na taxa de relâmpagos totais. O valor de refletividade no início da tempestade é relativamente alto, e após algum tempo, quando a tempestade atinge a maturação são observados valores máximos de refletividade. À medida que a tempestade vai se dissipando a refletividade começa a perder intensidade, mas não é possível observar esse momento na figura, já que a tempestade saiu do raio de alcance do radar antes de decair. A profundidade da nuvem, dada pelo Eco Top de 20 dBZ, indica que durante a maturação a tempestade estava com cerca de 11 km de profundidade.

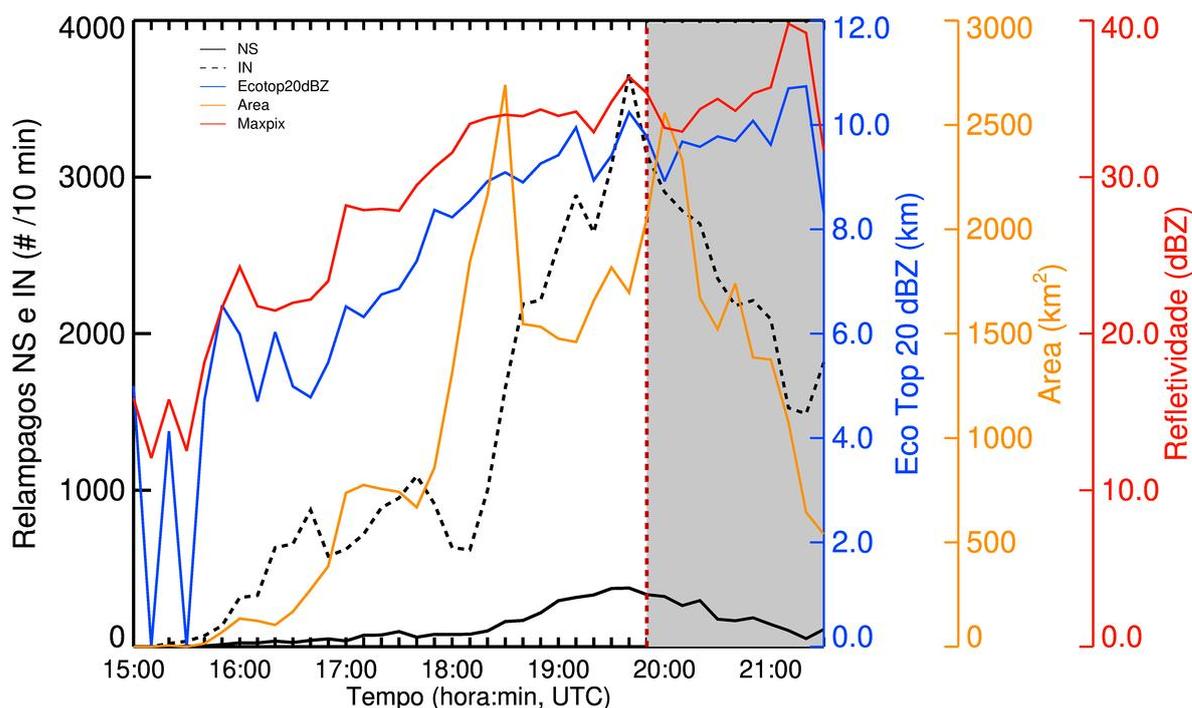


Figura 8 - Evolução temporal dos relâmpagos intra-nuvem (curva tracejada preta, relâmpagos/10 min) e nuvem-solo (curva contínua preta, relâmpagos/10 min), área da tempestade (curva contínua amarela, km<sup>2</sup>), refletividade máxima (curva contínua vermelha, dBZ) e eco top de 20 dBZ (curva contínua azul, km) para a tempestade no dia 24 de outubro de 2019. A linha tracejada vermelha marca o horário do de início do granizo em superfície.

É notável, analisando-se a Figura 9, que VIL e DVIL aumentam gradativamente conforme a tempestade se intensifica. Eles apresentam um salto a partir das 1930 UTC (pouco antes do granizo cair). O aumento de relâmpagos IN inicia-se pouco antes, por volta das 1810 UTC. Esta grande produção de hidrometeoros e subsequente aumento na atividade elétrica é um padrão típico observado em tempestades que produzem tempo significativo. Mudanças abruptas nas variáveis VIL e DVIL são fortes indicadoras do fortalecimento ou decaimento da corrente de ar ascendente da tempestade.

Segundo Gomes e Held (2004), tempestades com DVIL maior que  $2,3 \text{ g m}^{-3}$  estão associadas com ventos intensos e granizo. Logo, ainda sobre a Figura 9, nota-se que o DVIL na tempestade de estudo não ultrapassou  $1,0 \text{ g m}^{-3}$  em seu momento de maior intensidade, indicando assim que a tempestade que atingiu a cidade de SRS não foi tão intensa. O VIL máximo não ultrapassou  $13 \text{ kg m}^{-2}$  que é considerado um valor baixo para a ocorrência de granizo.

A Altura de Waldvogel (AW) é um parâmetro adicional que pode ser analisado na identificação de granizo dentro da nuvem. Segundo Waldvogel et al. (1979) quando a AW ultrapassa 1,4 km o granizo dentro da nuvem pode crescer e atingir a superfície.

A Figura 9 mostra que a AW ultrapassou 6 km em seu momento de mais intenso, indicando que o granizo presente nesta tempestade possuía potencial de crescimento para atingir o solo.

O primeiro eco com refletividade  $\geq 35$  dBZ é detectado pouco antes das 1600 UTC e a partir deste momento é mantido a tendência de crescimento da área da tempestade, indicando crescimento nas partículas de precipitação em tamanho e número. Além disso, sugerindo o crescimento intenso da corrente ascendente através da região de fase mista, o que favorece a formação de grandes pedras de granizo. Através das grandezas das variáveis produzidas pela análise da estrutura da precipitação do sistema que atingiu SRS foi observado que a maior atividade elétrica foi registrada cerca de 20 min antes da incidência de severidade em superfície (2000 UTC).

Conforme o sistema evolui para o estado dissipativo, percebe-se a diminuição nas variáveis VIL e DVIL, provavelmente associados à queda das partículas de granizo no interior da tempestade e como consequência de partículas que atingiram a superfície. Apesar da redução nestas variáveis é possível notar que a área apresenta redução logo após o evento de granizo (vide a Figura 8), isso devido ao fato de a tempestade ter saído da área do radar e não ter sido possível averiguar seu total desaparecimento.

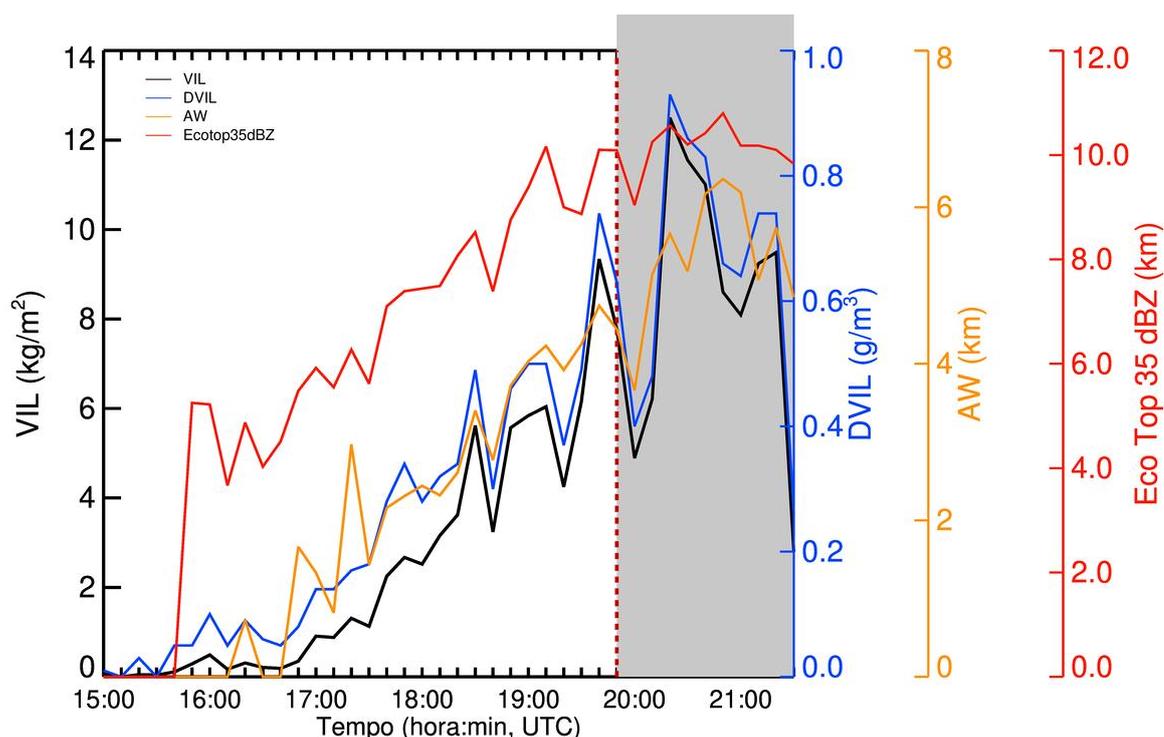


Figura 9 - Evolução temporal do máximo *Vertically Integrated Liquid Water Content* - VIL (curva contínua preta, kg/m<sup>2</sup>), densidade de VIL - DVIL (g/m<sup>3</sup>), altura de Waldvogal – AW (curva contínua laranja, km) e eco top de 35 dBZ (curva contínua vermelha, km) para a tempestade no dia 24 de outubro de 2019. A linha tracejada vermelha marca o horário de início do granizo em superfície.

Na Figura 10, é mostrado o CAPPI de 3,0 km de altura de refletividade para o momento em que a tempestade apresentou máxima refletividade. Observa-se que na região onde foi realizada a seção transversal vertical tem-se refletividade acima de 65 dBZ, indicando a ocorrência de largas pedras de granizo. Para o horário das 2000 UTC foram realizadas duas seções transversais verticais, como indicado na figura 10. Esta análise possibilita avaliar a extensão vertical, horizontal e interna da tempestade.

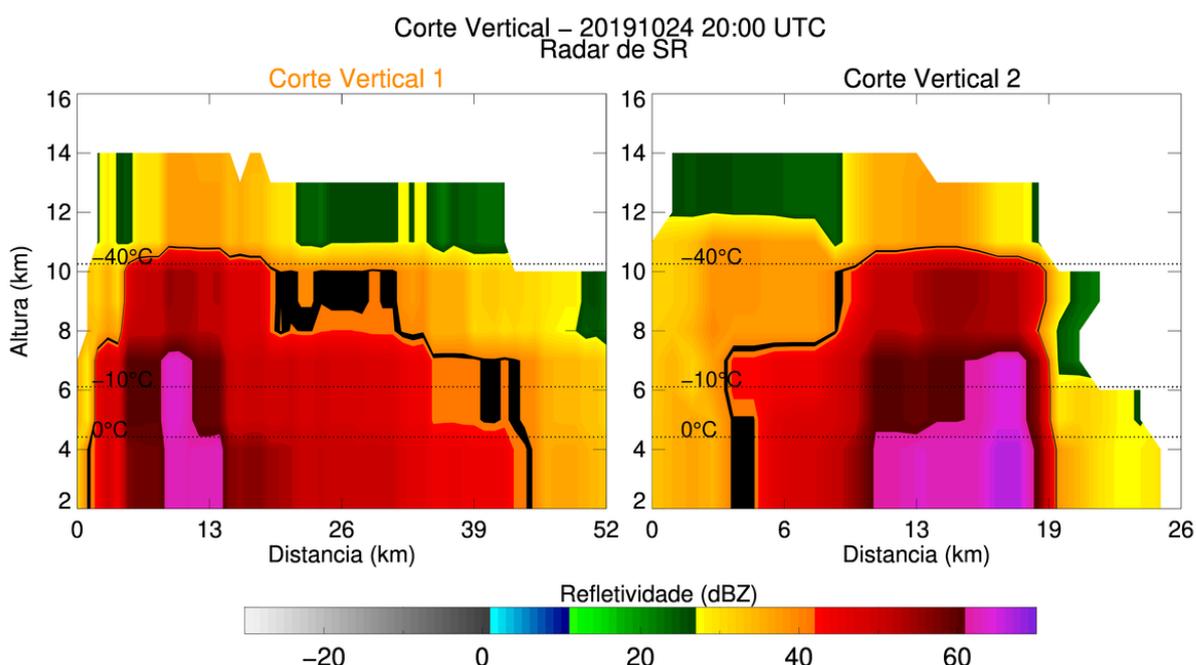


Figura 10 - Corte vertical no produto CAPPI no instante de maior atividade convectiva do evento (2000 UTC) 24/10/2019.

A Figura 11 mostra as duas seções transversais verticais realizadas na tempestade no horário das 2000 UTC, registrado como o momento de maior intensidade convectiva da tempestade. O sistema apresentou extensão vertical de 14 km e horizontal de até 52 km, com refletividade entre 25 e 70 dBZ, tendo este núcleo mais intenso se estendido de 2 a 7 km de altura. Esta região com alta refletividade indica a ocorrência de granizo no interior da nuvem de tempestade, desde da base da nuvem (2 km de altura) até atingindo a fase mista da tempestade.

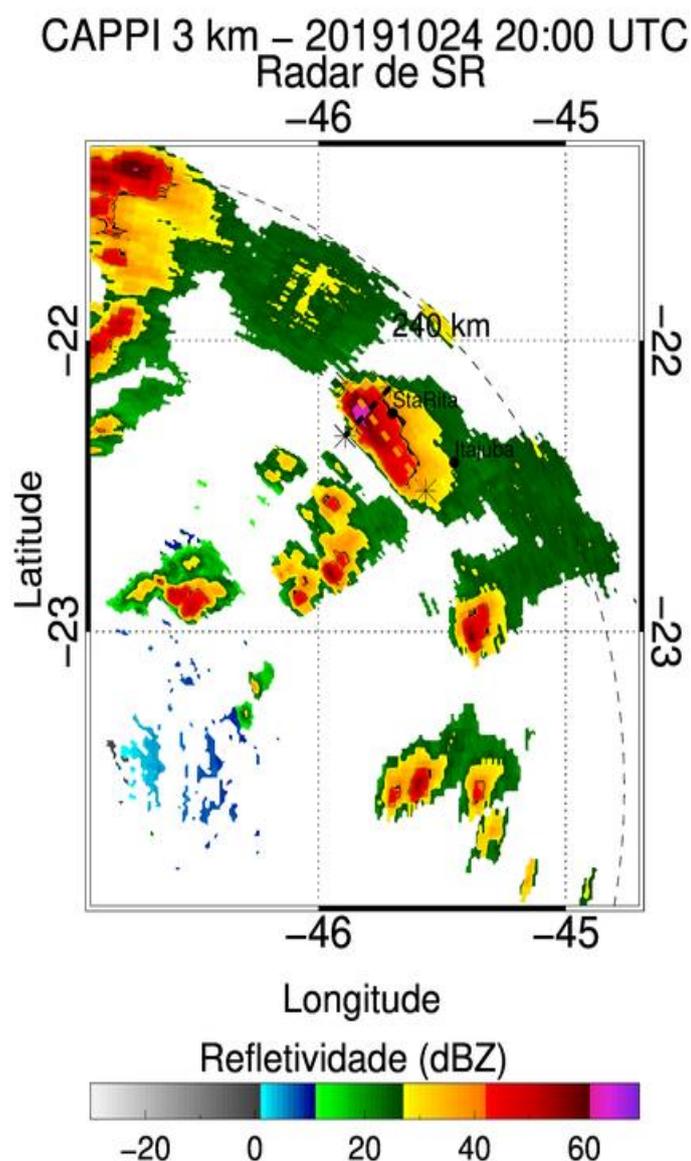


Figura 11 - Linhas pontilhadas pretas mostram a região onde foi feito o corte vertical da figura 10.

#### 4. CONCLUSÃO

Este estudo avaliou as características sinóticas e físicas associadas a uma tempestade que produziu granizo na cidade de Santa Rita do Sapucaí - MG na tarde de 24 de outubro de 2019. Além disso foi mensurado as características da estrutura precipitante do evento. Os principais resultados obtidos estão listados na sequência:

- Análise Sinótica: indica que o ambiente propício à tempestade teve contribuição dinâmica (divergência de massa em altos níveis) e termodinâmica (aquecimento local da superfície e presença de umidade na coluna atmosférica);

- Estrutura da Precipitação: a tempestade foi isolada devido ao tempo curto de duração, além de ser típico deste tipo de sistema a redução rápida dos parâmetros VIL, DVIL e os raios totais, após o registro do fenômeno de granizo na superfície, sugerindo o enfraquecimento da corrente ascendente, que diminui rapidamente a produção de hidrometeoros e a taxa de raios totais, dentro da nuvem. Ou seja, torna-se evidente que quanto maior o valor dos parâmetros microfísicos da precipitação (refletividade, VIL e DVIL) e elétrico (densidade de taxa de raios totais), maior o tamanho das pedras de gelo (granizo) observadas na superfície;
- O DVIL na tempestade de estudo não ultrapassou  $1,0 \text{ g m}^{-3}$  em seu momento de maior intensidade, indicando assim que a tempestade que atingiu a cidade de SRS não foi tão intensa comparada as tempestades de outras regiões;
- A AW ultrapassou 6 km em seu momento de mais intenso, indicando que o granizo presente nesta tempestade possuía potencial de crescimento para atingir o solo.

A tempestade que atingiu o município de Santa Rita do Sapucaí teve impactos sem precedentes sobre a população, tanto econômico quanto social. Isto evidencia a necessidade e a importância do monitoramento de eventos de tempo severo em curto/curtíssimo prazo de tempo, não apenas para os santa-ritenses, mas para toda a população do Brasil.

Para trabalhos futuros seria interessante realizar o cálculo do Número de Richardson, a fim de obter-se a altura da camada turbulenta para o melhor entendimento da estrutura e dos processos físicos e dinâmicos que ocorrem no interior desta camada.

## 5. REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA, C.R.; Linha de Instabilidade da Amazônia: Estudo de caso e importância das características do perfil do vento na sua formação e desenvolvimento. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 33, p. 197-226, 2011.

ASHFAQ *et al.*; Robust late twenty-first century shift in the regional monsoons in RegCM-CORDEX simulations. **CLIMATE DYNAMICS**, v. xx, p. xx, 2020.

BARNES, G.; **Severe Local Storms in the Tropics**. In: DOSWELL, C. A. (Ed.). **Severe Convective Storms**. Boston, MA: American Meteorological Society, 2001. p. 359–432.

BEAL, A. *et al.*, **Climatology of hail in the triple border Parana, Santa Catarina (Brazil) and Argentina**. Atmospheric Research (2018), <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104747>

BEDKA, K.; **Overshooting Cloud Top Detections Using Msg Seviri Infrared Brightness Temperatures and Their Relationship To Severe Weather Over Europe** - Atmospheric Research, 99, 175-189, fevereiro, 2011.

BELTRAN, R. P.; **Características da precipitação e atividade elétrica de tempestades severas da Região Metropolitana de São Paulo**. 2017. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Meteorologia, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

BEZERRA, J. M.; **Configuração meteorológica do verão (2013-2014) anormalmente quente das regiões Sul e Sudeste do Brasil**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2016.

CAMPOS, B. *et al.*; **Circulações Locais Induzidas pela Topografia no Vale do Paraíba e na Serra da Mantiqueira: um Estudo de Caso para o Período entre os dias 16 e 22 de agosto de 2010**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 9, p. 753-765, 2016.

CAVALCANTI, I. F. A.; RAIÁ, A.; ROZANTE, J. R.; **REGIME DE PRECIPITAÇÃO NA REGIÃO DE MONÇÃO DA AMÉRICA DO SUL EM SIMULAÇÕES DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS**. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – CPTEC/INPE, Cachoeira Paulista, dez. 2016.

CLARK, R.A. & GREENE, D.R. 1972. **Vertically Integrated Liquid Water**. A New Analysis Tool. *Weather and Forecasting*, 100(7): 548-552.

CECIL, D. J.; BLANKENSHIP, C. B.; **Toward a global climatology of severe hailstorms as estimated by satellite passive microwave imagers**. *Journal of Climate*, v. 25, n. 2, p. 687–703, 2012.

ESTADO DE MINAS. **Chuva de granizo arrasa cidade do Sul de Minas; uma pessoa morre**. 2019. Disponível em:

<[https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2019/10/24/interna\\_gerais,1095636/chuva-de-granizo-arrasa-cidade-do-sul-de-minas-uma-pessoa-morre.shtml](https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2019/10/24/interna_gerais,1095636/chuva-de-granizo-arrasa-cidade-do-sul-de-minas-uma-pessoa-morre.shtml)>. Acesso em: 11 fev. 2020.

GAN, M. A. *et al.*; **Monção da América do Sul**. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – CPTEC/INPE, São José dos Campos, nov. 2016.

GATTI, E. C.; **ESTUDO DE SISTEMAS DE MESOESCALA EM SANTA CATARINA NO PERÍODO PRIMAVERA/VERÃO 2018-2019**. 2019. 91 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharel em Meteorologia, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

HERSBACH, H. *et al.*; 2019: **ECMWF Global Reanalysis: hello ERA5, goodbye ERA-Interim**. ECMWF Newsletter 159, in press.

GOMES, A. M.; HELD, G. **Determinação e avaliação do parâmetro densidade VIL para alerta de tempestades**. In: XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia. 2004.

GOMES, A.M.; HELD, G. **Identificação, Rastreamento e Previsão de Tempestades Severas Parte I: Evento de Granizo**. Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, Florianópolis, SC, 2006.

INATEL (Santa Rita do Sapucaí). **Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel**. Disponível em: <<https://www.inatel.br/home/santa-rita-do-sapucaí>>. Acesso em: 11 fev. 2020.

IBGE. **Censo 2010**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/santa-rita-do-sapucaí/panorama>>. Acesso em: 11 fev. 2020.

JAYARATNE *et al.*, 1983. **Laboratory studies of the charging of soft-hail during ice crystal interactions**. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 109: 609-630.

JOHN, R. H.; DOSWELL, C. A.; **Severe local storms forecasting**. *Weather and Forecasting*, v. 7, p. 588-612, 1992. 63.

JORNAL G1. **Mulher morre após queda de árvore durante chuva em Santa Rita do Sapucaí, MG**. 2019. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mg/sul-de-minas/noticia/2019/10/24/mulher-morre-apos-queda-de-arvore-durante-chuva-em-santa-rita-do-sapucaí-mg.ghtml>>. Acesso em: 11 fev. 2020.

LEAL, D. L. *et al.*; **Análise de Tempestade Potencialmente Severa utilizando dados de Radar Meteorológico**. *Revista Geonorte*, v. 1, p. 855-866, 2012.

LIMA, L. C. de; GERTRUDES, M. M.; **Tempestades: Tipos e identificação de tempestades por imagens de radar e satélite**. 2013. 40 f. TCC (Graduação) - Curso de Técnico em Meteorologia, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MACHADO, L.B.T. *et al.*, 2009; **Relationship Between Cloud-ground Discharge and Penetrative Clouds: A Multi-channel Satellite Application**. Atmospheric Research, 93: 304-309.

MARENGO, J. A. *et al.*; **Changing Trends in Rainfall Extremes in the Metropolitan Area of São Paulo: Causes and Impacts**. FRONTIERS IN EARTH SCIENCE, v. xx, p. xx, 2020.

MARTINS *et al.*, 2017. **Climatology of destructive hailstorms in Brazil**. Atmos. Res., 184, 126 –138.

MARSHALLI, J.S. & PALMER, W. 1948. **The Distribution of Raindrops with Size**. Journal of Meteorology, 5: 165-166.

MATTOS, E. V. *et al.* 2020; **Caracterização de uma Tempestade Intensa Ocorrida na Região de Bauru-SP**. ANUÁRIO DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS (UFRJ), v. 43, p. 85-106, 2020.

MELO, J. A. A. de; **CARACTERIZAÇÃO DE UMA LINHA DE INSTABILIDADE AMAZÔNICA UTILIZANDO RADAR POLARIMÉTRICO DURANTE O PROJETO CHUVA – BELÉM**. 2016. 112 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

MOLLER, A. R.; **Severe local storms forecasting**. In: Severe Convective Storms, C. A. Doswell III (Ed.), American Meteorology Society, Monograph v. 28, n. 50, p. 433- 480, 2001. 63.

NASCIMENTO, E. L.; **Previsão de tempestades severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: uma estratégia operacional adotável no Brasil?** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 20, p. 121-140, 2005.

PINHEIRO, H. R. *et al.*; **Aplicação de uma ferramenta objetiva para previsão de tempo severo em ambiente operacional**. Revista Brasileira de Meteorologia, 2013. (29) 2.

REBOITA, M. S. *et al.*; **Caracterização atmosférica quando da ocorrência de eventos extremos de chuva na região sul de Minas Gerais**. Revista Brasileira de Climatologia, v. 21, p. 20-37, 2017.

REBOITA, M. S. *et al.*; **Regimes de Precipitação na América do Sul: Uma Revisão Bibliográfica**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 25, p. 185-204, 2010.

REGIS, M. V.; **Estudo de um evento convectivo de tempo severo no sul de Minas Gerais - MG**. 2017. 55 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciências Atmosféricas, Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017.

REYNOLDS *et al.*, 1957. **Thunderstorm Charge Separation**. Journal of Meteorology, 14: 426-436.

RINEHART, R.E. 2010: **Radar for Meteorologists**. Nevada Missouri, Rinehart Publications, 482p.

RIQUETTI, N.B. *et al.*; **Estudo do caso de precipitação intensa sobre Foz do Iguaçu - PR em setembro de 2015**, Revista Brasileira de Climatologia, v.22, p. 589 - 606, 2018.

SANTA RITA DO SAPUCAÍ. CÂMARA MUNICIPAL. **Câmara Municipal de Santa Rita do Sapucaí**. Disponível em: <<https://www.santaritadodosapucaimg.leg.br/institucional/a-cidade>>. Acesso em: 11 fev. 2020.

SANTOS, D. F. ; REBOITA, M. S.; **Jatos de baixos níveis a leste dos Andes: Comparação entre duas reanálises**. Revista Brasileira de Climatologia, v. 22, p. 340-362, 2018

SCHMETZ, J. *et al.*; 1997. **Monitoring Deep Convection and Convective Overshooting**. Advances in Space Research, 19(3): 433-441.

SILVA DIAS, M.A.; GRAMMELSBACHER, E.; **A possível ocorrência do tornado em São Paulo no dia 26 de abril de 1991: um estudo de caso**. Revista Brasileira de Meteorologia, v.6, p.513-522, 1991.

SILVA, J. P. R. *et al.*; **CARACTERIZAÇÃO DA ZONA DE CONVERGÊNCIA DO ATLÂNTICO SUL EM CAMPOS ATMOSFÉRICOS RECENTES**. Revista Brasileira de Climatologia, v. 25, 2019.

SILVA, J. P. R.; **Zona de Convergência do Atlântico Sul: climatologia e análise sinótica**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Ciências Atmosféricas) - Universidade Federal de Itajubá.

SILVA NETO, C. P. da.; **ABORDAGEM DESCRITIVA DE TOPO DE SISTEMAS CONVECTIVOS BASEADA EM COMBINAÇÕES DE DIFERENÇAS DE TEMPERATURA DE CANAIS DO METEOSAT-9 E MODELO NUMÉRICO**. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Meteorologia, Instituto de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2014.

SPERLING, V.B.; **PROCESSOS FÍSICOS E ELÉTRICOS DAS TEMPESTADES DE GRANIZO NA REGIÃO SUL DO BRASIL**. 2018. 211 f. Tese (Doutorado) - Curso de Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.

STENSRUD, D. J. *et al.*; **Discriminating between tornadic and non-tornadic thunderstorms using mesoscale model output**. Wea. Forecasting, v. 12, p. 613-632, 1997.

TAVARES, J. P. N.; MOTA, M. A. S. da.; **Condições termodinâmicas de eventos de precipitação extrema em Belém-PA durante a estação chuvosa**. Revista Brasileira de Meteorologia, [s.l.], v. 27, n. 2, p. 207-218, jul. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0102-77862012000200007>.

UOL NOTÍCIAS. **Chuva de granizo mata mulher e muda paisagem em cidade de MG. 2019.** Disponível em: <<https://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2019/10/25/chuva-de-granizo-mata-idosa-e-muda-paisagem-em-cidade-de-mg.htm>>. Acesso em: 11 fev. 2020.

VERA, C. *et al.*; 2006: **Toward a Unified View of the American Monsoon Systems.** *J. Climate*, 19. 4977-5000.

WALDVOGEL, A. *et al.*; **Criteria for the detection of hail cells.** *Journal of Applied Meteorology*, v. 18, n.12, p. 1521-1525, 1979.

WANG, X. *et al.*; **Wet periods in northeastern Brazil over the past 210 kyr linked to distant climate anomalies.** *Nature*, v.432, p. 740-743, 2004.

WEISMAN, M. L.; KLEMP, J. B.; 1984: **The structure and classification of numerically simulated convective storms in directionally varying wind shears.** *Mon. Wea. Rev.*, 112, 2479-2498.