



Caracterização das Assinaturas de Radar e da Atividade Elétrica de Relâmpagos de Tempestades com Granizo no Estado de São Paulo
Characterization of Radar Signatures and Lightning from Hailstorms in the State of São Paulo

Eduardo Ximenes de Abreu¹; Enrique Vieira Mattos¹ & Vinicius Banda Sperling²

¹Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais, Avenida BPS 1303, Pinheirinho, Itajubá, MG, 37500-903, Brasil

²Centro de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, Estrada Dr. Altino Bondensan 500, Eugênio de Melo, São José dos Campos, SP, 12247-016, Brasil

E-mails: duduximenes6@hotmail.com; enrique.vmatos@gmail.com; vini.meteorologia@gmail.com

DOI: http://doi.org/10.11137/2020_X_XX_XX; Recebido: 14/08/2019 Aceito: 28/10/2019

Resumo

Tempestades com granizo tipicamente estão associadas à nuvens de grande desenvolvimento vertical (Cumulonimbus), com intensas taxas de precipitação e ventos fortes em superfície, que podem causar diversos prejuízos ao meio urbano e rural. Este trabalho analisou a evolução de alguns parâmetros provenientes das assinaturas do radar meteorológico e atividade elétrica de nove tempestades que causaram precipitação de granizo em superfície no estado de São Paulo, entre dezembro de 2016 e março de 2017. Os parâmetros de radar analisados foram: Conteúdo de Água Líquida Verticalmente Integrado (VIL), densidade de VIL (DVIL), altura máxima do eco de 20 dBZ (Ecotop20dBZ), altura máxima do eco de 35 dBZ (Ecotop35dBZ), Altura de Waldvogel (AW) e máximo valor da refletividade em toda coluna de precipitação iluminada pelo radar (MAXPIX). Esses parâmetros foram calculados através dos dados de refletividade (Z) do radar meteorológico Doppler de São Roque (São Paulo). As informações sobre a ocorrência de descargas de retorno intra-nuvem (IN) e nuvem-solo (NS) foram obtidas da rede *Earth Network*. Dentre os resultados, foi possível analisar a evolução dos parâmetros de radar e atividade elétrica, antes, durante e depois do momento em que se registrou o granizo em superfície para cada tempestade selecionada. O parâmetro AW acusou com 20 min de antecedência uma alta probabilidade de ocorrência de precipitação de granizo para todas as tempestades.

Palavras-chave: Radar meteorológico; Altura de Waldvogel; atividade elétrica

Abstract

Hailstorms are typically associated with high vertical development clouds (Cumulonimbus), with intense precipitation rates and high surface winds, which can cause severe damage to urban and rural environments. This work analyzed the evolution of some parameters from the weather radar signatures and electrical activity of nine storms that caused surface hail precipitation in the state of São Paulo, between December 2016 and March 2017. The analyzed radar parameters were: Vertically Integrated Liquid Water Content (VIL), VIL Density (DVIL), maximum echo height of 20 dBZ (Ecotop20dBZ), maximum echo height of 35 dBZ (Ecotop35dBZ), Waldvogel Height (WH) and maximum reflectivity value in every radar-illuminated precipitation column (MAXPIX). These parameters were calculated using reflectivity data (Z) from São Roque Doppler weather radar. Information about the occurrence of intra-cloud (IC) and cloud-ground (CG) return discharges was obtained from the *Earth Network*. Among the results, it was possible to analyze the evolution of the radar parameters and electrical activity before, during and after the recorded surface hail for each selected storm. Parameter WH reported a high probability of hailstorm for all storms 20 min in advance.

Keywords: Weather radar; Waldvogel Height; electrical activity

1 Introdução

As perdas humanas e materiais decorrentes das condições de tempo estão tipicamente associadas à fenômenos adversos produzidos pelas tempestades. Essas tempestades são formadas por uma ou mais nuvens do tipo Cumulonimbus (Cb), que se iniciam, desenvolvem-se (estágio maduro) e se dissipam. Dependendo das condições da atmosfera, como por exemplo: a quantidade de vapor d'água e instabilidade termodinâmica e/ou dinâmica, uma nuvem robusta pode ser formada com potencial para propiciar precipitação intensa, relâmpagos, rajadas de vento e em alguns casos extremos, queda de granizo (Wallace & Hobbs, 2006).

Alguns estudos de casos recentes de tempestades no Brasil (Campos & Maria, 2014; Cera *et al.*, 2016; Riquetti, *et al.*, 2018; Caldana *et al.*, 2019) relataram algum tipo de dano associado e dentre esses, uma das causas foi a precipitação do granizo.

Berezuk (2009) documentou uma tempestade de granizo ocorrida em 2008 na cidade de Maringá, localizada no estado do Paraná. Essa tempestade causou estragos em mais de mil residências sendo registradas aproximadamente trezentas ocorrências de emergência. Tal tempestade isolada dizimou lavouras de fumo de mais de 600 agricultores, totalizando um prejuízo de R\$ 5.000.000,00 (cinco milhões de reais).

Efeitos importantes também são decorrentes dos relâmpagos. Por exemplo, estima-se que em média 120 pessoas morrem por ano em decorrência dos relâmpagos no Brasil (Cardoso *et al.*, 2014). Dessa forma, é de suma importância o estudo dessas tempestades convectivas que produzem granizo e descargas elétricas, para que essas informações possam subsidiar alertas de curto e curtíssimo prazo de tempo severo para a sociedade, com propósito de amenizar os seus impactos e minimizar os prejuízos materiais.

O estudo e monitoramento dessas tempestades com granizo e relâmpagos apresentaram um avanço significativo com o advento dos

radares meteorológicos (Rinehart, 2004, Queiroz, 2008; Held *et al.*, 2010; Medina & Machado, 2017; Beltrán, 2017; Mattos *et al.*, 2017; Sperling, 2018; Lopes, 2019). Os radares representam um dos mais importantes instrumentos para a avaliação das assinaturas produzidas por hidrometeoros das nuvens (partículas formadas nas nuvens, como: gotas de chuva, cristais de gelo, granizo e gotas de chuva). Através da radiação retroespalhada pelos hidrometeoros e dependendo do tipo de radar (isto é, polarização simples ou dupla), pode-se estimar a quantidade, tamanho, forma e orientação dos hidrometeoros presentes nas nuvens precipitantes (Rinehart, 2004). Essas informações tornaram-se importantes para o desenvolvimento de parâmetros que possam auxiliar na tomada de decisão para possíveis alertas de curto e curtíssimo prazo de tempo severo.

Greene & Clark (1972) propuseram que a massa de água líquida presente dentro de uma tempestade poderia ser estimada utilizando os dados de refletividade (Z) provenientes da varredura volumétrica do radar. Os autores definiram que as análises de VIL (*Vertically Integrated Liquid-Water Content*) fornecem um novo meio de identificação e possível previsão de tempestades severas e que seu rápido aumento parece ser um indicador do súbito desenvolvimento de tempestades severas. Adicionalmente, Waldvogel *et al.* (1979) sugeriram que a diferença de altura entre o nível máximo de 45 dBZ e o nível de congelamento (0 °C), poderia caracterizar células de tempestades com potencial para produzir granizo. Através do estudo do crescimento de granizo, os autores estabeleceram que, se essa diferença fosse maior que 1,4 km, então o granizo dentro da nuvem poderia crescer e atingir o solo. Esse novo parâmetro foi denominado como Altura de Waldvogel (AW).

Nos últimos anos alguns estudos têm sido realizados no Brasil a respeito da relação entre as assinaturas de radar e a ocorrência de granizo (Queiroz; 2008; Held *et al.*, 2010; Medina & Machado, 2017; Beltrán, 2017; Sperling, 2018; Lopes, 2019). Sperling (2018) avaliou os processos

físicos e elétricos dominantes durante a formação e ocorrência de sistemas convectivos associados à queda de granizo nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul. No estudo do ciclo de vida de dezesseis tempestades de granizo, o autor verificou que as células isoladas e de grande extensão vertical possuem grande potencial para produzir granizo grande e que as mesmas apresentam um rápido ciclo de vida. Mais recentemente, Lopes (2019) avaliou cinco tempestades com granizo na Região Metropolitana de Campinas através de relâmpagos e três radares Doppler. O diâmetro máximo dos granizos documentados foi de aproximadamente 22,4 mm e as tempestades apresentaram uma extensa coluna de granizo e correntes ascendentes de até 30 ms^{-1} antes do granizo atingir a superfície.

Medina & Machado (2017) propuseram um modelo Lagrangeano de previsão imediata do tempo para tempestades intensas na região Sudeste do Brasil utilizando radar polarimétrico Banda X. O modelo emprega treze parâmetros e limiares para a região de fase mista das nuvens como: refletividade diferencial (ZDR) e fase diferencial específica (KDP) negativa, baixa correlação ($\rho < 0,9$) e alta refletividade ($Z > 35 \text{ dBZ}$).

Embora existam alguns trabalhos recentes relacionando as características observadas por radar e granizo (Beltrán, 2017; Sperling, 2018; Lopes, 2019), ainda se tem uma lacuna no entendimento sobre as principais assinaturas de radar preponderantes antes da ocorrência da precipitação do granizo em superfície. Os estudos existentes utilizam-se de um limitado número de casos de tempestades, o que pode afetar a significância estatística dos resultados. Além disso, no Brasil a rede de radares ainda é pouco densa e os registros oficiais de ocorrência de granizo em superfície são bastantes escassos e esparsos, pois o Brasil não possui registros oficiais de tempo severo. Nesse sentido, com o intuito de contribuir para o entendimento desses fenômenos, este trabalho selecionou nove tempestades, com o propósito de analisar a evolução das assinaturas de radar e atividade elétrica das tempestades durante o ciclo de vida das nuvens precipitantes.

2 Dados e Metodologia

2.1 Dados

Os registros de ocorrência de granizo em superfície utilizados neste estudo foram provenientes de relatos midiáticos (portal G1-Globo, <https://g1.globo.com/>), dos quais eram apresentadas informações como o local e o horário de ocorrência da precipitação de granizo, e do banco de dados de casos significativos fornecidos pelo Projeto SOS-CHUVA (<http://soschuva.cptec.inpe.br/soschuva/>). Foram selecionadas nove tempestades que apresentaram registros de granizo em sete municípios, entre o período de dezembro de 2016 e março de 2017. A Tabela 1 mostra os eventos selecionados bem como o município, a data e o horário (UTC) do início da precipitação do granizo em superfície conforme o relato das mídias. Todos os registros de granizo em superfície ocorreram após às 17:00 UTC (15:00 HL - hora local), abrangendo o período vespertino, indicando a importância da termodinâmica (convecção), como um mecanismo de modulação diurna da atmosfera na formação dessas tempestades de verão. A Figura 1 mostra registros fotográficos do granizo em superfície de três tempestades.

A avaliação das características das assinaturas de radar das tempestades foi realizada empregando-se dados do radar meteorológico de São Roque. O radar de São Roque é um radar Doppler Banda S (2,7 a 2,9 GHz), que está localizado na cidade de São Roque/SP nas coordenadas $23^{\circ} 36' 07''$ de latitude sul e $47^{\circ} 05' 39''$ de longitude oeste, a uma altitude de aproximadamente 1147 m. Durante o período do estudo o radar operou com uma resolução temporal de 10 min e largura do feixe de 2° e com uma máxima frequência de repetição de pulso (do inglês *Pulse Repetition Frequency*, PRF) de 600 Hz. Os dados volumétricos foram transformados de coordenadas polares para coordenadas cartesianas, gerando o produto *Constant Altitude Plan Position Indicator* (CAPPI) com resolução espacial horizontal e vertical de 1 km, totalizando 13 CAPPIs entre 3 e 15 km de altura. Esses dados foram fornecidos pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Tempestade	Município	Data	Horário (UTC)
1	Campos do Jordão	18/12/2016	17:00
2	Campinas	18/12/2016	17:20
3	São Paulo	18/12/2016	17:20
4	Jundiaí	30/01/2017	17:10
5	Sorocaba	31/01/2017	19:10
6	São Paulo	22/02/2017	19:40
7	São Paulo	24/02/2017	19:50
8	Taubaté	14/03/2017	17:30
9	Sumaré	14/03/2017	19:00

Tabela 1 Descrição das tempestades selecionadas neste estudo com a data e horário (UTC) dos eventos relatados pelas mídias jornalísticas.



Figura 1 Registros fotográficos do momento do granizo em superfície das tempestades do dia:
A. 18/12/2016 às 17:20 UTC (Campinas);
B. 31/01/2017 às 19:10 UTC (Sorocaba);
C. 14/03/2017 às 19:00 UTC (Sumaré).
Fonte: Globo-G1, cortesia de Thales Ferreira e Jornal O Liberal (2017).

Para o estudo das propriedades elétricas das tempestades, foram utilizados os dados de descargas de retorno (*return strokes*) da rede *Earth Network*. Essa rede de detecção possui sensores instalados nas regiões sul, sudeste, nordeste e parte da região centro-oeste do Brasil, que são capazes de registrar em tempo real as descargas de retorno ocorridos no interior das nuvens (descarga de retorno intra-nuvem, IN) e entre a nuvem e a superfície

(descarga de retorno nuvem-solo, NS). Os dados foram fornecidos pela empresa CLIMATEMPO e foram disponibilizados em arquivos diários em formato ASCII contendo as seguintes informações: localização, horário, tipo de descarga (NS ou IN) e pico de corrente. A Figura 2 mostra a região de abrangência do radar de São Roque (raio de 240 km) e a localização das tempestades avaliadas neste estudo.

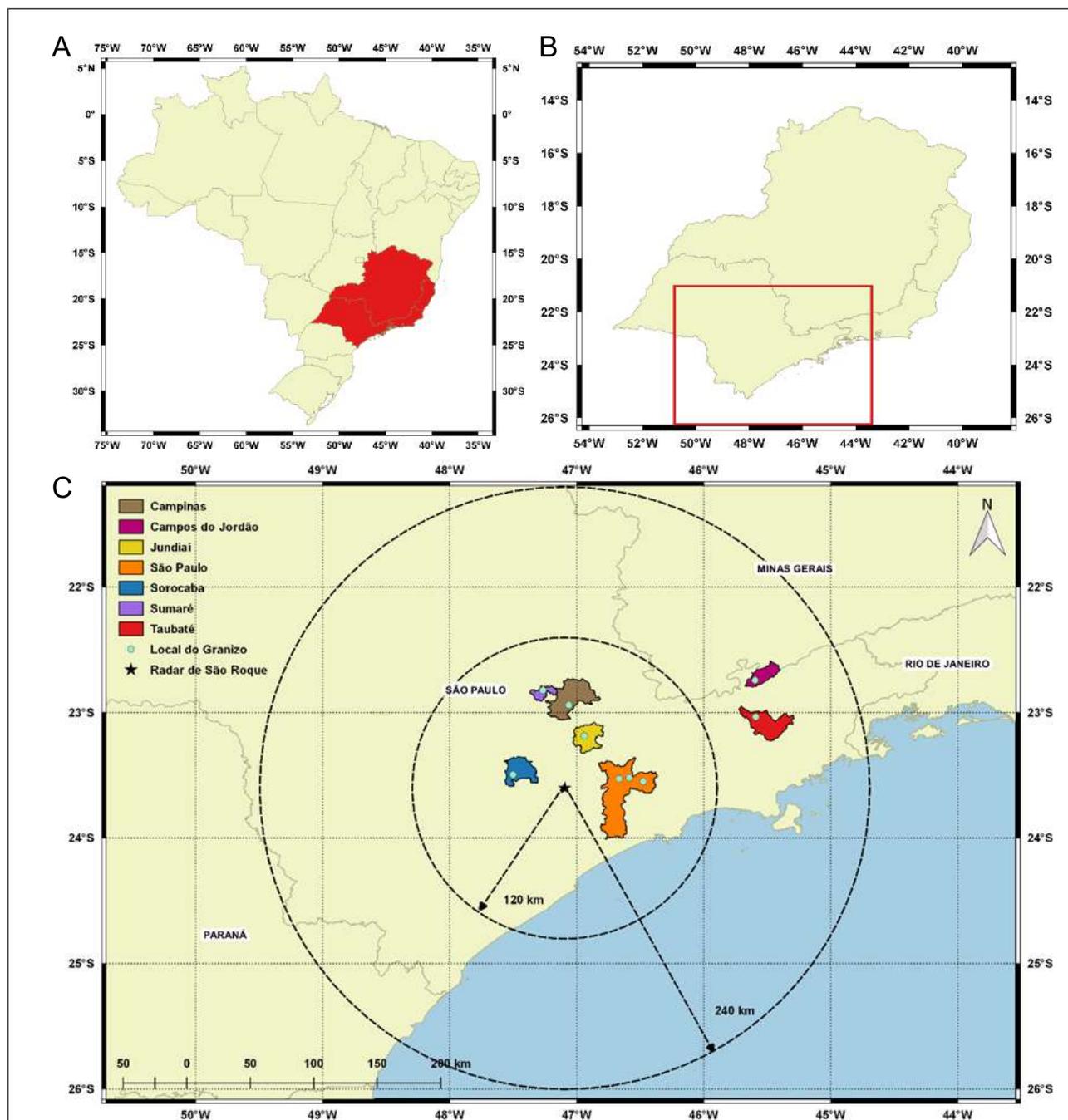


Figura 2 Região de estudo: A. Mapa do Brasil com destaque na região sudeste (em vermelho); B. mapa da região sudeste; C. mapa com a região de estudo (estado de São Paulo). Pontos na cor azul claro na Figura 2C indicam a localização das tempestades no momento do registro do granizo em superfície e as regiões coloridas representam a área do município que registrou a queda do granizo. Os círculos representam distâncias de 120 e 240 km ao radar de São Roque.

2.2 Metodologia

2.2.1 Identificação das Tempestades

Para a identificação e o acompanhamento da evolução das tempestades foram utilizados os horários de ocorrência do registro de granizo em superfície (mostrado na Tabela 1) e imagens de CAPPI de 3 km de altura de refletividade do radar de São Roque. Para cada horário e localização do registro de granizo identificou-se a respectiva tempestade na imagem de CAPPI de 3 km do radar e monitorou-se a evolução da tempestade num intervalo de 1 hora antes e 1 hora depois do

registro de granizo em superfície. Totalizando-se assim 2 horas de acompanhamento manual de cada tempestade, com passo de tempo a cada 10 min. A delimitação espacial da tempestade foi realizada aplicando-se um quadrado centrado no ponto geométrico da tempestade. As latitudes e longitudes desse quadrado para cada passo de tempo foram utilizadas para extrair as informações de cada tempestade. A Figura 2 mostra o acompanhamento realizado para a tempestade ocorrida no município de Jundiaí/SP no dia 30 de janeiro de 2017 às 17:10 UTC (15:10 hora local).

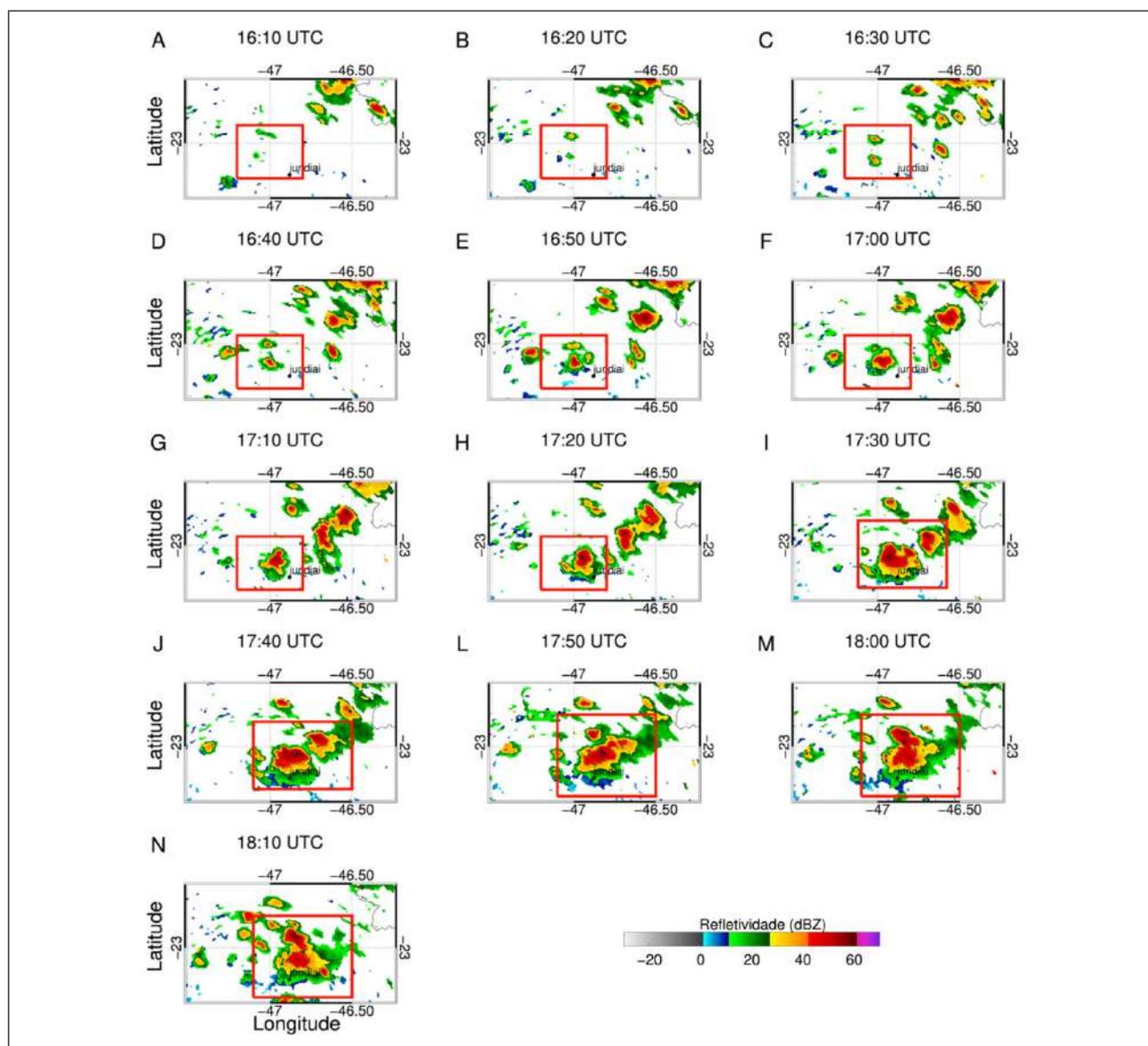


Figura 3 Imagens CAPPI em 3 km de altura de refletividade (dBZ) da tempestade ocorrida em Jundiaí no dia 30 de janeiro de 2017: A. 16:10 UTC; B. 16:20 UTC; C. 16:30 UTC; D. 16:40 UTC; E. 16:50 UTC; F. 17:00 UTC ; G. 17:10 UTC ; H. 17:20 UTC; I. 17:30 UTC; J. 17:40; L. 17:50 UTC ; M. 18:00 UTC; N. 18:10 UTC. O registro do granizo em superfície ocorreu às 17:10 UTC. O quadrado na cor vermelha representa a região que delimita a área da tempestade.

2.2.2 Determinação das Propriedades das Tempestades

Através do uso do CAPPI de refletividade entre 3 e 15 km, foram calculados alguns parâmetros de radar com o objetivo de analisar a evolução dos mesmos ao longo de duas horas do ciclo de vida das tempestades. Os parâmetros analisados foram: (i) Conteúdo de Água Líquida Verticalmente Integrado (*Vertically Integrated Liquid Water Content*, VIL), (ii) altura máxima da refletividade de 20 dBZ (EcoTop20dBZ), (iii) altura máxima da refletividade de 35 dBZ (EcoTop35dBZ), (iv) Densidade de VIL (DVIL), (v) Altura de Waldvogel (AW) e (vi) máximo valor da refletividade em toda coluna de precipitação iluminada pelo radar (MAXPIX).

O primeiro parâmetro calculado foi o VIL. Esse parâmetro foi proposto por Greene & Clark (1972) e expressa a quantidade de massa de água líquida por área (kg/m^2), sendo calculado através da seguinte formulação:

$$VIL = 3,44 \cdot 10^{-6} \int_{\text{basedanuvem}}^{\text{topodanuvem}} Z_e^{\frac{4}{7}} dH, \quad (1)$$

em que H é a altura em metros e Z_e é a refletividade em mm^6/m^3 . Para este estudo, a base da nuvem e o topo da nuvem foram definidos como sendo as alturas de 3 e 15 km, respectivamente.

A estimativa da altura do topo da tempestade foi realizada através do cálculo do parâmetro Eco top de 20 dBZ (EcoTop20dBZ). Esse parâmetro representa a altura máxima (em km) dos ecos de 20 dBZ e mostra a profundidade dos sistemas precipitantes. O EcoTop35dBZ expressa a informação sobre até que altitude se observa uma Z intensa ($Z = 35$ dBZ), indicando uma grande concentração de hidrometeoros.

Amburn & Wolf (1997) observaram que tempestades com topos altos e valores elevados de VIL, nem sempre estavam associados com queda

de granizo, e tempestades com topos e VIL baixos podiam ocasionar esse fenômeno. Para resolver essa contrariedade os autores sugeriram um novo parâmetro, a Densidade de VIL (DVIL). Esse parâmetro é derivado de VIL, possui unidade de gramas por metro cúbico (g/m^3), sendo expresso por:

$$DVIL = \frac{VIL}{\text{EcoTop20dBZ}} \cdot 10^3, \quad (2)$$

sendo o EcoTop20dBZ a altura máxima em metros do eco com 20 dBZ de refletividade.

Waldvogel *et al.* (1979) definiram um parâmetro que utiliza a altura do nível com de 45 dBZ (Altura(45dBZ)) acima da camada de derretimento (camada acima da isoterma de 0 °C, Altura (0°C)), servindo como um indicativo para a presença de granizo no interior da nuvem. Denominado de Altura de Waldvogel, AW possui unidades de quilômetro (km) e é expresso como:

$$AW = \text{Altura}(45\text{dBZ}) - \text{Altura}(0^\circ\text{C}), \quad (3)$$

em que Altura (45 dBZ) é a altura da refletividade de 45 dBZ em km e Altura (0 °C) é a altura da isoterma de 0 °C em km. O sexto e último parâmetro calculado é o MAXPIX. Esse campo representa o máximo valor de refletividade presente, limitada em 15 km de altura.

A análise da evolução desses parâmetros ao longo de um período de 2 horas do ciclo de vida das tempestades foi realizada extraindo-se o valor máximo do VIL, EcoTop20dBZ, EcoTop35dBZ, DVIL, AW e MAXPIX, dentro da caixa pré-selecionada de cada tempestade em cada passo de tempo. Nessa metodologia, os parâmetros extraídos podem não necessariamente pertencer ao mesmo pixel (menor unidade de uma imagem de radar), no entanto, pertencem a mesma tempestade. A utilização do valor máximo de cada parâmetro auxilia no monitoramento das regiões mais intensas

dentro de uma tempestade, as quais via de regra, são aquelas mais propícias à ocorrência do granizo.

2.2.3 Cálculo dos Parâmetros Elétricos

Baseado nos critérios aplicados por Goodman *et al.* (2005) e McCaul Jr. *et al.* (2009) as descargas de retorno NS (*return stroke*) da rede *Earth Network* foram agrupadas em relâmpagos NS (*flashes*) aplicando-se um limiar temporal e espacial de 0,5 e 20 km, respectivamente. Nos arquivos de relâmpagos (*flashes*) o pico de corrente e polaridade são referentes a primeira descarga de retorno dos relâmpagos NS. Os relâmpagos IN e NS foram acumulados dentro do intervalo temporal de varredura do radar (10 min) e considerando o limite espacial da tempestade (discutido na Seção 2.2.1). Os parâmetros dos relâmpagos utilizados foram: densidade (#/km² em 10min) dos relâmpagos IN e NS, polaridade e pico de corrente (kA) dos relâmpagos NS. Na ocorrência de mais de um relâmpago em determinado passo de tempo para a tempestade considerou-se o valor da mediana para o pico de corrente.

3 Resultados

3.1 Avaliação dos Casos: Evolução dos Parâmetros Físicos e Elétricos Durante o Ciclo de Vida das Tempestades

A primeira análise consistiu na avaliação da evolução dos parâmetros físicos (VIL, AW e EcoTop20dBZ) e elétricos (densidade de relâmpagos totais) das tempestades de granizo durante o período de duas horas do ciclo de vida (1 hora antes e 1 hora depois do registro do granizo em superfície). As Figuras 4, 5 e 6 mostram a evolução do VIL (linha contínua na cor azul), AW (linha contínua na cor laranja), altura máxima do eco de 20 dBZ (EcoTop20dBZ, linha contínua na cor vermelha) e a densidade de relâmpagos totais (IN + NS) por

km² acumulados num intervalo de 10 min (linha contínua na cor preta). A linha pontilhada na vertical (#granizo) representa o horário aproximado que o granizo atingiu o solo.

Os resultados mostram que, cinco das nove tempestades analisadas, já possuíam um forte desenvolvimento vertical uma hora antes do momento do granizo, de acordo com o parâmetro EcoTop20dBZ (altura do topo da nuvem), onde se nota que o topo das tempestades 1, 3, 5, 8 e 9 ultrapassavam a altitude de 10 km, retratando um estágio mais avançado com relação as demais tempestades (Figura 4A, 4C, 5B, 6B e 6C).

No decorrer do ciclo de vida, as tempestades foram se intensificando sendo possível notar um aumento nos parâmetros VIL e AW, indicando que a intensificação das correntes ascendentes no interior das tempestades propiciou um rápido aumento na concentração de hidrometeoros no interior das mesmas. Para as tempestades 1 e 2 (Figura 4A e 4B), o momento em que se registrou a precipitação do granizo foi aproximadamente 10 min antes do pico no valor de AW (8 km para ambas) e VIL (35 kg/m² e 45 kg/m²), em um momento em que ambos parâmetros estavam em pleno crescimento. Para as tempestades 4, 5, 7 e 9 (Figura 5A, 5B, 6A e 6C), esse momento coincidiu justamente com um horário de pico e para as tempestades 3, 6 e 8 (Figuras 4C, 5C e 6B) esse momento foi registrado 10 min depois. Portanto, não se observa um comportamento único desses parâmetros em ambas tempestades, mas de forma geral, o instante em que o granizo atingiu a superfície foi aproximadamente (\pm 10 min) no momento do pico desses parâmetros. O comportamento do VIL, foi semelhante as tempestades estudadas por Sperling (2018), onde o momento do granizo também foi reportado no momento de máxima atividade convectiva e máxima intensidade das correntes ascendentes.

A variação positiva nos valores do parâmetro VIL ao longo de duas horas do ciclo de vida das tempestades, por exemplo a tempestade 8 (Figura 6B), onde a massa de água líquida aumentou de 10 para 80 kg/m² em apenas 40 min, denota um desenvolvimento intenso (Greene & Clark, 1972). Alterações na quantidade de água líquida no interior das tempestades são informações importantes termodinamicamente, pois são acompanhadas por enormes variações de energia (Mason, 1957). Esse rápido aumento na disponibilidade de água líquida, favoreceu a formação e crescimento do granizo, evidenciando o desafio de emitir alertas de curto e curtíssimo prazo nesse rápido intervalo de tempo. Nesse sentido, o presente trabalho dá suporte para o desenvolvimento de ferramentas e limiares que podem antecipar o diagnóstico precoce de tempo severo.

O aumento da atividade elétrica dentro das nuvens durante o ciclo da vida das tempestades, foi favorecido pelas fortes correntes ascendentes e as colisões entre cristais de gelo e granizo na presença de água líquida superesfriada. Uma vez iniciada a precipitação do granizo, a densidade de relâmpagos totais por km² acumulados em intervalos de 10 min, tendeu a diminuir substancialmente em alguns sistemas devido ao enfraquecimento das correntes ascendentes. Esse comportamento pode ser observado nas Figuras 4A, 5A, 5C e 6A.

Todas as tempestades, com exceção das tempestades 1, 2 e 7, apresentaram o máximo da densidade de relâmpagos próximo ou durante o momento do registro de granizo em solo. No entanto é possível observar uma diferença significativa na quantidade de relâmpagos registrados em algumas tempestades. Por exemplo, para a tempestade 4 (Figura 5A) a densidade foi de aproximadamente 40 relâmpagos por km² em 10 min, enquanto que, para a tempestade 8 a densidade foi de apenas

1 relâmpago por km² em 10 min. É notório que os casos de tempestades 1, 2 e 7 apresentaram um comportamento diferente; isto é, máximo de relâmpagos após a registro de granizo em superfície. Essas tempestades apresentaram alguns núcleos convectivos e que provavelmente se uniram após o momento do granizo, propiciando um aumento na quantidade de gelo no interior da tempestade, e conseqüentemente aumentando a produção de relâmpagos.

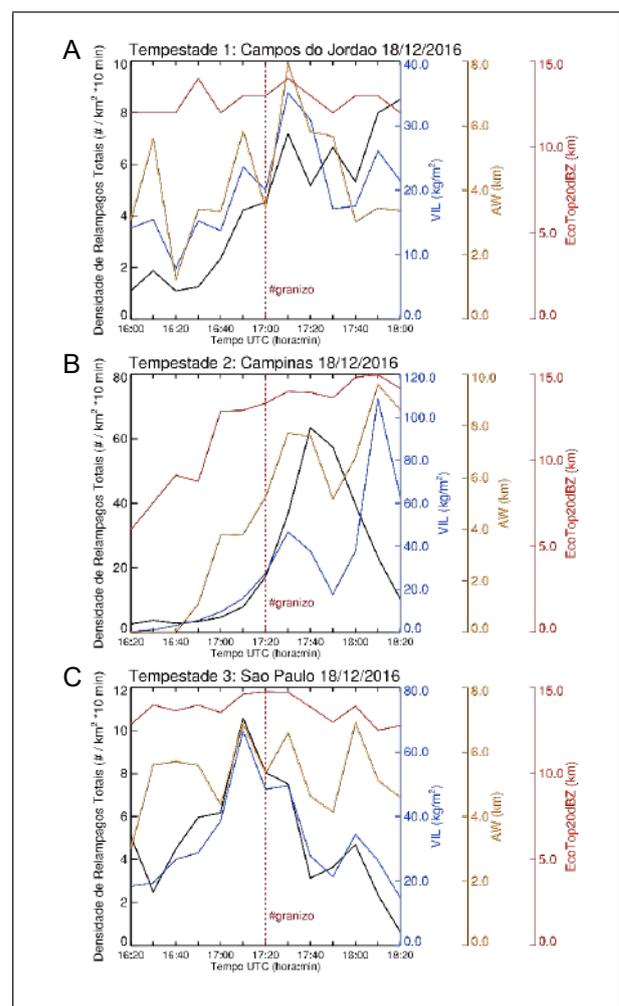


Figura 4 Evolução temporal da densidade de relâmpagos totais (#/km² em 10 min, linha na cor preta), Conteúdo de Água Líquida Verticalmente Integrado (VIL, kg/m², linha na cor azul), Altura de Waldvogel (AW, km, linha na cor laranja) e topo do eco de 20 dBZ (EcoTop20dBZ, km, linha na cor vermelha) para as tempestades com granizo:

- A. Tempestade 1 (Campos do Jordão 18/12/2019);
- B. Tempestade 2 (Campinas 18/12/2016);
- C. Tempestade 3 (São Paulo 18/12/2016).

A linha tracejada vertical na cor vermelha indica o momento do registro do granizo em superfície.

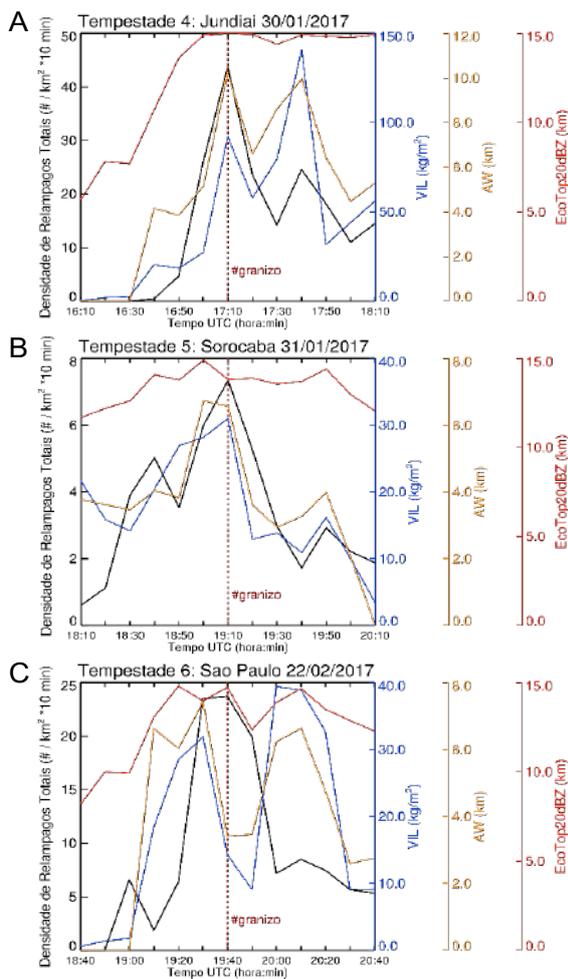


Figura 5 Similar a Figura 4, exceto para as tempestades:
 A. Tempestade 4 (Jundiá 30/01/2017);
 B. Tempestade 5 (Sorocaba 31/01/2017);
 C. Tempestade 6 (São Paulo 22/02/2017).

As tempestades 4 (Figura 5A) e 9 (Figura 6C) apresentaram valores bem distintos dos parâmetros microfísicos em relação aos demais casos, como por exemplo, altos valores de: densidade de relâmpagos (40 relâmpagos/km² em 10 min e 35 relâmpagos/km² em 10 min) e VIL (90 kg/m² e 110 kg/m²). Com o objetivo de analisar a estrutura vertical dessas duas tempestades que apresentaram maior intensidade (em relação aos valores de VIL e relâmpagos) que as demais, foi realizado uma análise da seção transversal vertical dessas tempestades no instante que o granizo foi registrado em superfície. As Figuras 7 e 8 mostram o CAPPI de 3 km de altura da refletividade do radar (Figuras 7A e 8A), o corte vertical longitudinal (Figuras 7B e 8B) e o corte

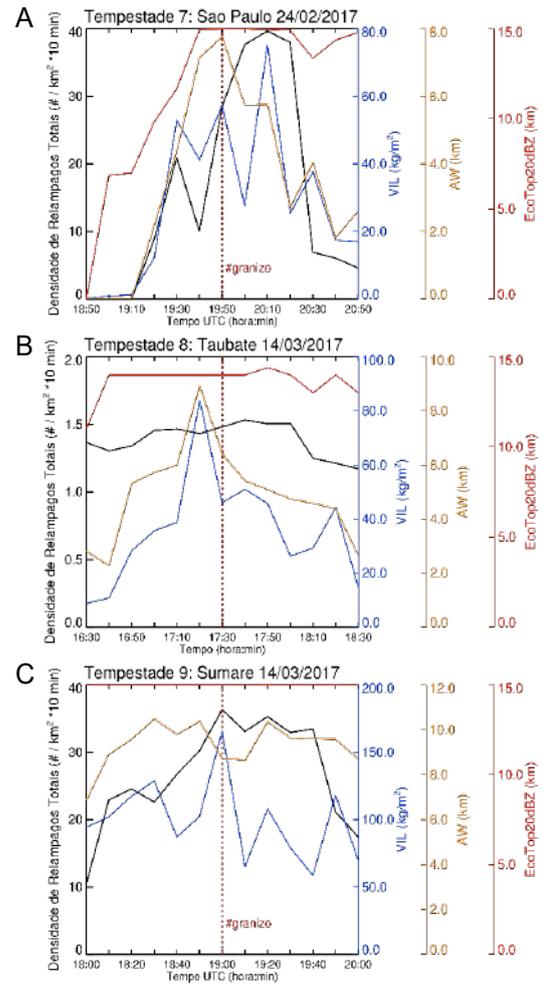


Figura 6 Similar a Figura 4, exceto para as tempestades:
 A. Tempestade 7 (São Paulo 24/02/2017);
 B. Tempestade 8 (Taubaté 14/03/2017);
 C. Tempestade 9 (Sumaré 14/03/2017).

vertical latitudinal (Figuras 7C e 8C), de ambas tempestades respectivamente. A tempestade 4 apresenta um núcleo convectivo pequeno (~ 2 km) e alta refletividade (~ 50 dBZ) (Figura 7A). Esses resultados mostram que tempestades compactas como aquelas estudadas por Mattos *et al.* (2017) podem apresentar altos valores de refletividade associados com gotas de chuva largas e granizo e consequentemente produzir relâmpagos. Ao analisar o corte longitudinal (Figura 7B) observa-se um núcleo de intensa refletividade (~ 65 dBZ) entre 6,5 e 9,9 km de altura a 7-9 km de distância da origem do corte vertical, indicando a existência de largas partículas de granizo dentro da zona de fase mista da tempestade (Straka *et al.*, 2000; Rinehart, 2004;

Medina & Machado, 2017). De fato, observa-se que valores altos (~ 45 dBZ) de refletividade alcançam até 15 km de altura e uma larga extensão horizontal (entre 2,5 e 8,5 km de distância), sugerindo a existência de fortes correntes ascendentes. No corte

latitudinal (Figura 7C) a região de alta refletividade (~ 45 dBZ) também é observada, porém possui uma menor profundidade (atinge até 12 km de altura), enquanto que regiões com intensa refletividade (60 dBZ) são ausentes.

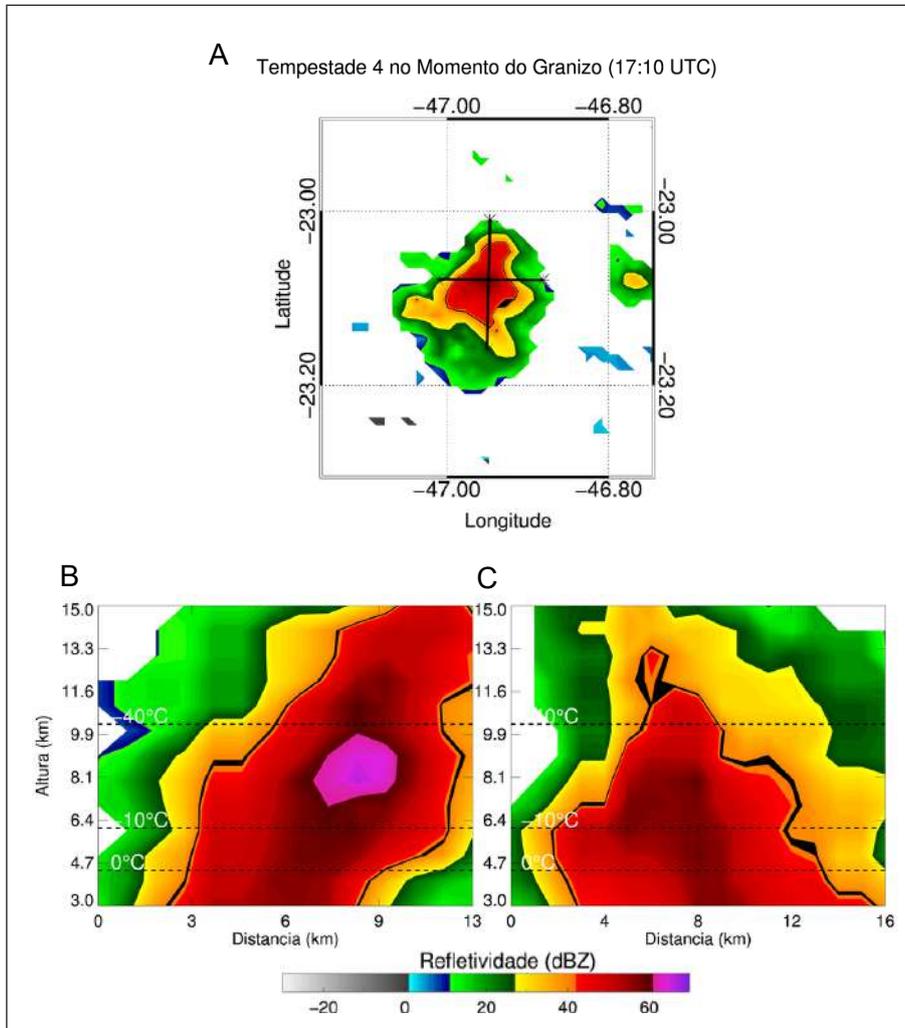


Figura 7 A. CAPPI de refletividade em 3 km de altura no momento que o granizo foi registrado em superfície para a tempestade que atingiu o município de Jundiaí no dia 30 de janeiro de 2017 às 17:10 UTC. Seção transversal vertical da refletividade (dBZ) na direção: B. longitudinal e C. latitudinal referente à Figura 7A. As linhas nas cores pretas na Figura 7A representam a seção transversal vertical da refletividade na direção longitudinal e latitudinal.

A Figura 8 mostra que diferentemente da tempestade 4, a tempestade 9 possui caráter multicelular. Pode-se observar grande extensão (45 km de comprimento, no seu eixo maior), com um núcleo extenso com moderada refletividade (45 dBZ) e dois núcleos menores mais intensos (65 dBZ). O núcleo que apresentou o registro do granizo foi o mais intenso (65 dBZ) e com extensão maior (5 km). A seção transversal vertical longitudinal (Figura 8B) e latitudinal (Figura 8C) da refletividade do radar sugerem a ocorrência de largas partículas de gelo (intensa refletividade de aproximadamente 65 dBZ) desde 8 km de altura até a superfície entre 7 e 12 km de distância entre os pontos selecionados.

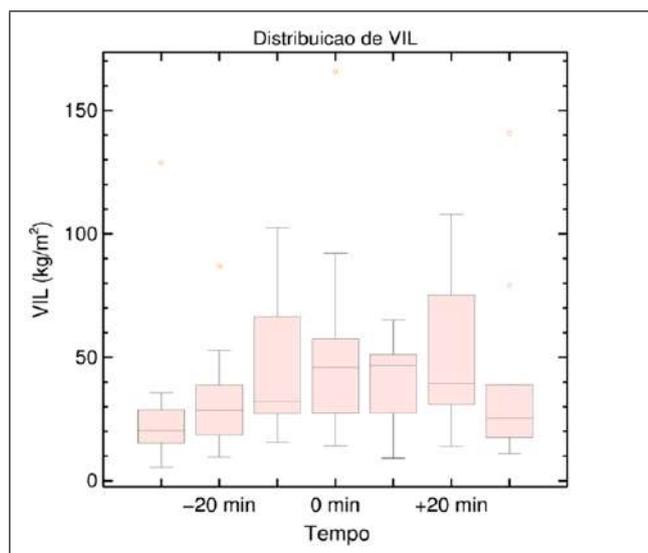
Tipicamente tempestades multicelulares possuem altos valores de CAPE (*Convective Available Potential Energy*) e cisalhamento vertical do vento (Joe *et al.*, 2012), que em conjunto com intensas correntes ascendentes e um forte processo de formação de gelo podem propiciar a ocorrência de granizo. O máximo de refletividade (65 dBZ) alcança a isoterma de até -16 °C, nível esse conhecido como o nível de balanço. Esse resultado é semelhante ao encontrado por Mattos *et al.* (2017), e consistente com as observações de Atlas (1966) e Lhermitte & Williams (1985), que discutiram que nessa região a velocidade terminal média das partículas é igual a velocidade das correntes ascendentes. Assim, esse

nível favorece a formação de grandes partículas de precipitação, como granizo e pedras de gelo suspensas no topo das correntes ascendentes.

3.2 Avaliação Geral: Análise da Distribuição dos Parâmetros Físicos e Elétricos das

Tempestades

A Figura 9 mostra a evolução da distribuição de VIL das tempestades. Nota-se um rápido aumento no valor de VIL (principalmente na mediana) desde uma hora antes até o momento do granizo, atingindo valor de aproximadamente 45 kg/m². Além disso, é notável a ocorrência de valores de VIL acima de 100 kg/m² antes da ocorrência do granizo. Embora os valores permaneçam altos após o registro de



A Figura 10 mostra a distribuição da Altura de Waldvogel (AW, em km). Os resultados mostram um rápido crescimento da espessura da camada de gelo antes do momento do granizo, com valor (7 km) máximo da mediana 10 min antes. Esse aumento seguido da diminuição da camada de gelo (entre -10 min e 0 min) mostra uma diminuição na espessura da camada de gelo dentro da nuvem. No entanto, a espessura da camada de gelo ainda continuou com valores elevados após o momento do granizo (mínimo valor da mediana de 5 km). É notório que a partir do tempo -20 min, a probabilidade da

granizo em superfície (que pode estar associado à uma pequena defasagem na exatidão do momento do granizo ou união entre tempestades vizinhas), observa-se uma sutil diminuição nos valores após esse momento, atingindo limiares da mediana de aproximadamente 25 kg/m². Adicionalmente, a não existência de um padrão bem definido da evolução das propriedades dos sistemas precipitantes, provavelmente deve-se à ocorrência de tempestades de diferentes escalas espaciais e consequentemente possuindo características dinâmicas e microfísicas diferentes. No entanto, os resultados são coerentes com alguns estudos (Queiros, 2008; Sperling, 2018), de que a rápida e grande disponibilidade de água líquida nos momentos iniciais das tempestades, propiciam a formação de partículas de gelo com grande potencial para precipitação.

Figura 9 Diagrama *boxplot* do Conteúdo de Água Líquida Verticalmente Integrado (VIL, em kg/m²) em função do ciclo de vida considerando as nove tempestades. O tempo de 0 min (eixo x), representa o momento que o granizo foi registrado na superfície.

queda de granizo era alta em todas as tempestades (AW > 1,4 km) (Waldvogel *et al.*, 1979).

De qualquer forma, tanto o parâmetro VIL quanto AW, alcançaram valores elevados nesse intervalo de 1 hora, quando comparado com a literatura (Greene & Clark, 1972; Waldvogel *et al.*, 1979). Estes são, alguns dos parâmetros que refletem a disponibilidade de água líquida e gelo, que na presença de fortes correntes ascendentes, são fatores fundamentais para a ocorrência de relâmpagos (Reynolds *et al.*, 1957).

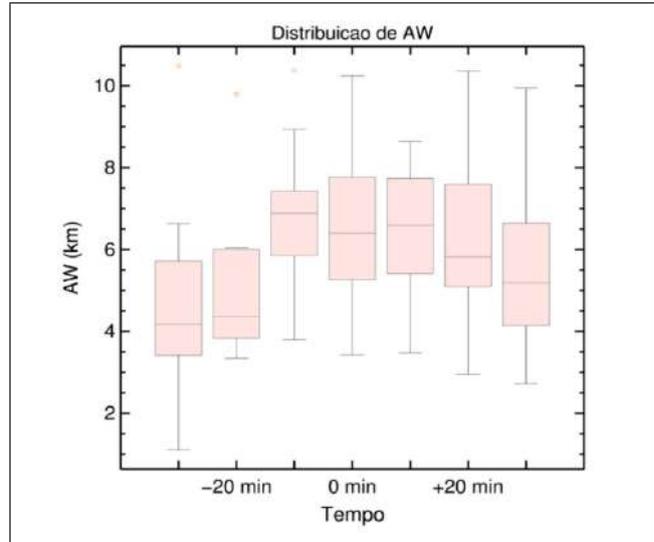


Figura 10 Diagrama *boxplot* da Altura de Waldvogel (AW, em km) em função do ciclo de vida considerando as nove tempestades. O tempo de 0 min (eixo x), representa o momento que o granizo foi registrado na superfície.

A evolução da densidade de relâmpagos IN (Figura 11A) e relâmpagos NS negativos (Figura 11B) possuem características semelhantes. Observa-se um abrupto aumento (de 2 até 15 relâmpagos/km² em 10 min) no intervalo de tempo entre -30 min e 0 min (momento do granizo). Esse rápido aumento na quantidade de relâmpagos antes do momento do granizo também foi observado por

estudos avaliando o *Lightning Jump* (LJ) (Goodman *et al.*, 1988; Williams *et al.*, 1989; Gatlin, 2007; Schultz *et al.*, 2009; Gatlin & Goodman, 2010; Schultz *et al.*, 2011; Albrecht *et al.*, 2012). O LJ tem sido utilizado como parâmetro precursor de eventos severos associados à queda de granizo, ventos intensos em superfície e até mesmo tornados.

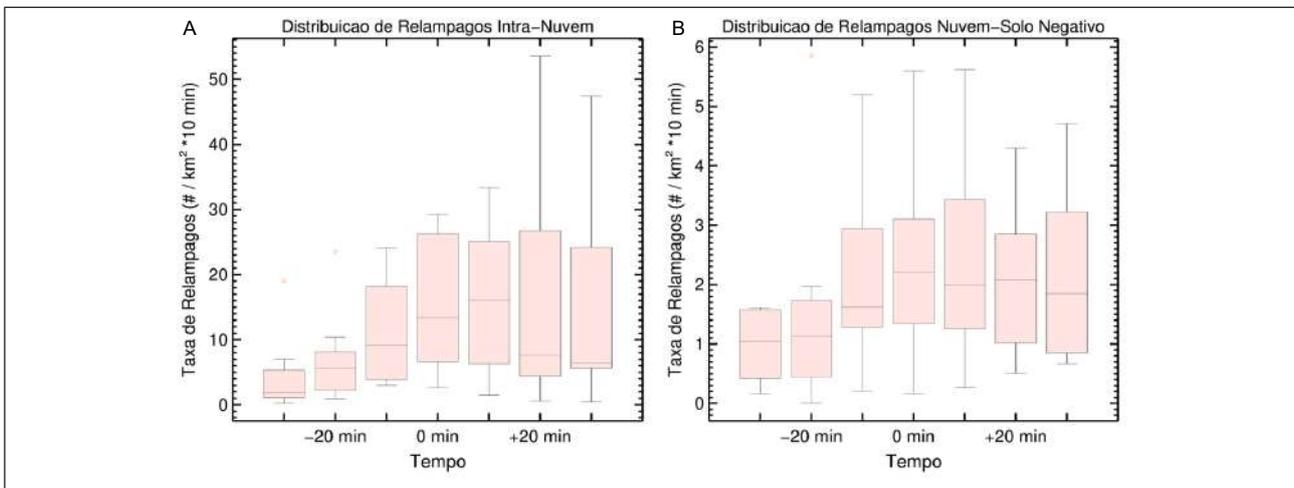


Figura 11 Diagrama *boxplot* da densidade (#/km² em 10 min) de relâmpagos: A. intra-nuvem e B. nuvem-solo negativo em função do ciclo de vida considerando as nove tempestades. O tempo de 0 min (eixo x), representa o momento que o granizo foi registrado na superfície.

A Figura 12 mostra a evolução da distribuição do pico de corrente (kA) dos relâmpagos NS negativos discutidos na Figura 11B. Em termos da mediana, o pico de corrente diminui (isso é, valores mais negativos) de -11 kA para -14 kA entre 20 min e 10 min antes do momento do granizo (atingindo um valor mínimo de -18,5 kA), indicando um forte processo de eletrificação. Após a ocorrência do granizo, o pico de corrente aumenta (isso é, valores mais positivos), e apresenta uma tendência de diminuição até 30 min depois. Esses valores

são menores em relação aos encontrados por Williams *et al.* (2016) para os relâmpagos iniciais em tempestades compactas. De fato, 10 min antes da ocorrência do granizo a tempestade encontra-se já bem desenvolvida e como discutido por Chronis *et al.* (2015) o pico de corrente é proporcional ao potencial da nuvem, e nos momentos próximos à ocorrência do granizo a tempestade possui um forte potencial elétrico capaz de produzir relâmpagos de alta intensidade.

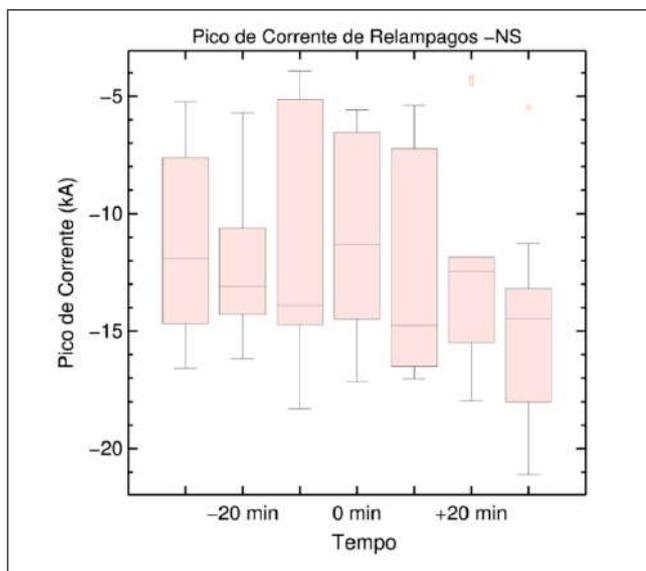


Figura 12 Diagrama *boxplot* do pico de corrente dos relâmpagos nuvem-solo negativos (kA) em função do ciclo de vida considerando as nove tempestades. O tempo de 0 min (eixo x), representa o momento que o granizo foi registrado na superfície.

A Tabela 2 mostra os valores da mediana encontrados para os seis parâmetros de radar das tempestades e a densidade e pico de corrente dos relâmpagos avaliados neste estudo. Esses resultados evidenciam que a mediana seguiu uma tendência de aumento, atingindo os maiores valores no momento do granizo ou após 10 min do evento.

Posteriormente, esses valores diminuem gradativamente. Essa síntese reforça a possibilidade de identificação do momento da ocorrência do granizo em superfície utilizando estes parâmetros físicos com aplicações para previsão imediata de tempo severo para a cidade de São Paulo e regiões próximas.

Tempo	VIL (kg/m ²)	DVIL (g/m ³)	AW (km)	EcoTop-35dBZ (km)	EcoTop-20dBZ (km)	MAXPIX (dBZ)	IN (#/km ² em 10 min)	-NS (#/km ² em 10 min)	PC -NS (kA)
-30 min	20,4	2,0	4,2	11,2	14,0	57	2	1	-12
-20 min	28,5	2,7	4,4	11,2	13,6	61	6	1	-13
-10 min	31,9	3,0	6,9	12,9	14,6	60	9	1	-14
granizo	46,0	3,3	6,4	13,1	14,7	60	13	2	-12
+10 min	46,6	3,6	6,6	13,3	14,0	61	16	2	-15
+20 min	39,5	2,9	5,8	12,5	14,0	61	7	2	-12
+30 min	25,4	2,5	5,2	12,1	14,0	60	6	2	-15
Desvio Padrão	9,5	0,5	1,0	0,8	0,4	1,3	4,4	0,5	1,3

Tabela 2 Percentis de 50% dos parâmetros físicos das tempestades para o intervalo de 1 hora. São mostrados os seguintes parâmetros: VIL, DVIL, AW, EcoTop35dBZ, EcoTop20dBZ, MAXPIX e densidade de relâmpagos IN, densidade de relâmpagos -NS e pico de corrente (PC) dos relâmpagos -NS.

4 Conclusão

Este trabalho teve como objetivo analisar a evolução das assinaturas de radar e propriedades elétricas de nove tempestades que causaram a precipitação do granizo no estado de São Paulo. Foram avaliados a evolução de seis parâmetros de radar (VIL, DVIL, AW, EcoTop20dBZ, EcoTop35dBZ e MAXPIX) e dois parâmetros elétricos (densidade

e pico de corrente), antes, durante e depois do momento em que foram registradas as ocorrências de granizo em superfície.

As análises mostraram que as tempestades apresentaram um aumento nos parâmetros VIL, AW e EcoTop20dBZ desde o momento inicial de acompanhamento, até antes do momento do granizo. Essa tendência positiva reflete o rápido desenvolvimento das tempestades (~ 1 h) com a

presença de fortes correntes ascendentes, aporte de gotas de chuva grandes e a formação e crescimento das partículas de gelo (granizo). O máximo de relâmpagos totais (IN e NS) ocorreu próximo do momento do registro do granizo em superfície, indicando a possibilidade do uso da densidade de relâmpagos totais como preditor da ocorrência de granizo em superfície. Adicionalmente, a análise de duas tempestades mais intensas mostrou altos valores de refletividade ocorrendo próximo a superfície ($Z > 50$ dBZ), indicando a presença de granizo.

A análise da composição de todas as tempestades mostrou a existência de uma variabilidade nos valores dos parâmetros estudados entre as tempestades, causada pela diferença de intensidade que ambas alcançaram.

Segundo o parâmetro AW, a probabilidade da ocorrência de precipitação do granizo, se mostrou alta para todas as tempestades numa antecedência de 20 min, tornando esse, um parâmetro eficaz na previsão deste fenômeno para este estudo.

A densidade de relâmpagos IN e NS e o pico de corrente apresentam máximos valores próximo do momento de ocorrência do granizo. De fato, a intensa formação de partículas de gelo num ambiente com intensas correntes ascendentes no interior das nuvens pode propiciar uma forte taxa de colisão entre as partículas de gelo e como consequência natural produzir alta densidade de relâmpagos e com alta intensidade.

Para trabalhos futuros, sugere-se expandir essas análises para outras regiões do Brasil, através do estudo de outras tempestades de granizo, a fim de se, aprimorar o entendimento quantitativo das mesmas com relação as assinaturas de radar e a atividade elétrica preponderantes para a ocorrência do fenômeno.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pelo fornecimento dos dados de radar e ao pesquisador do CPTEC Thiago Biscaro pelo auxílio no processamento dos dados de radar. Agradecemos também a empresa CLIMATEMPO pelo fornecimento dos dados de relâmpagos.

6 Referências

- Albrecht, R.I.; Moralez, C.A.R.; Anselmo, E.M.; Neves, J. R., Mattos, E.; Biscaro, T.; & Machado, L.A.T. 2012. Thunderstorm Characteristics of Summer Precipitating Systems During CHUVA-GLM Vale do Paraíba Field Campaign. In: 16th INTERNATIONAL CONFERENCE ON CLOUDS AND PRECIPITATION, Leipzig, Germany, 2012. Proceedings, Leipzig, Universität Leipzig.
- Amburn, S.A. & Wolf, P.L. 1997. VIL Density as a Hail Indicator. *Weather and Forecasting*, 12(3): 473-478.
- Atlas, D. 1966. The Balance Level in Convective Storms. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 23(6): 635-651.
- Beltrán, R.P. 2017. *Características da Precipitação e Atividade Elétrica de Tempestades Severas da Região Metropolitana de São Paulo*. Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, 113p.
- Berezuk, A.G. 2009. Eventos Extremos: Estudo da Chuva de Granizo de 21 de Abril de 2008 na Cidade de Maringá-PR. *Revista Brasileira de Climatologia*, 5: 153-164.
- Caldana, N.F.S.; Rudke, A.P.; Silva, I.; Nitshe, P.R.; Caramori, P.H. 2019. Gênese, Impacto e a Variabilidade das Precipitações de Granizo na Mesorregião Centro-Sul Paranaense, Brasil. *Caderno de Geografia*, 29(56): 61-80.
- Campos, C.R.J. & Maria, D.M. 2014. Ocorrência de Granizo Associada a um SCM que Afetou o Rio Grande do Sul em Agosto de 2006. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, 37(1): 46-60.
- Cardoso, I.; Pinto Jr. O.; Pinto, I.R.C.A. & Holle, R.L. 2014. Lightning Casualty Demographics in Brazil and their Implications for Safety Rules. *Atmospheric Research*, 135: 374-379.
- Cera, J.C.; Streck, N.A.; Zanon, A. J.; Rocha, T.S.M.; Cardoso, Â.P.; Ribeiro, B.S.M.R.; Fensterseifer, C.A.J. & Becker, C.C. 2016. Dano por Granizo na Cultura da Soja em Condições de Lavoura: Um estudo de Caso. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 31(2): 211-217.
- Chronis, T.; Lang, T.J.; Koshak, W.; Blakeslee, R.J.; Christian, H.; Mccaul, E. & Bailey, J. 2015. Diurnal Characteristics of Lightning Flashes Detected over the São Paulo Lightning Mapping Array, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(23): 799-808.
- Gatlin, P. 2007. *Severe Weather Precursors in the Lightning Activity of Tennessee Valley Thunderstorms*. Program Atmospheric Science, The University of Alabama in Huntsville, Dissertação de Mestrado, 87p.
- Gatlin, P.N.; Goodman, S.J. 2010. A Total Lightning Trending Algorithm to Identify Severe Thunderstorms. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27(1): 3-22.
- Globo-G1. 2016. Temporal com Granizo Causa Pontos de Alagamento em Campinas, SP. Disponível em: < <http://g1.globo.com/sp/campinas-regiao/noticia/2016/12/temporal-com-granizo-causa-pontos-de-alagamento->

- em-campinas-sp.html>. Acesso em: 10 out. 2018.
- Goodman, S.J.; Blakeslee, R.; Christian, H.; Koshak, W.; Bailey, J.; Hall, J.; Mccaul, E.; Buechler, D.; Darden, S.; Burks, J.; Bradshaw, T. & Gatlin, O. 2005. The North Alabama Lightning Mapping Array: Recent Severe Storm Observations and Future Prospects. *Atmospheric Research*, 76(1): 423-437.
- Goodman, S.J.; Buechler, D.E.; Wright, P.D. & E Rust, W.D. 1988. Lightning and Precipitation History of a Microburst-Producing Storm. *Geophysical Research Letters*, 15(11): 1185-1188.
- Greene, D.R. & Clark, R.A. 1972. Vertically Integrated Liquid Water. A New Analysis Tool. *Weather and Forecasting*, 100(7): 548-552.
- Held, G.; Gomes, A.M. & Naccarato K.P. 2010. The Structure and Behavior of Supercell Storms in the State of São Paulo, Brazil. In: 6th EUROPEAN CONFERENCE ON RADAR IN METEOROLOGY AND HYDROLOGY, Sibiu, Romania.
- Joe, P.; Dance, S.; Lakshmanan, V.; Heizenreder, D.; James, P.; Lang, P.; Hengstebeck, T.; Feng, Y.; Li, P.W.; Yeung, H.; Suzuki, O.; Doi, K. & Dai, J. 2012. Automated Processing of Doppler Radar Data for Severe Weather Warnings. In: BECH, J. & CHAU, J.L. *Doppler Radar Observations - Weather Radar, Wind Profiler, Ionospheric Radar, and Other Advanced Applications*. Editora InTech, p. 33-74.
- Jornal O Liberal. 2017. Sumaré e Nova Odessa Têm Chuva de Granizo. Disponível em: <<https://liberal.com.br/cidades/regiao/sumare-e-nova-odessa-tem-chuva-de-granizo-547287/>>. Acesso em: 10 out. 2018.
- Lhermitte, R. & Williams, E. 1985. Thunderstorm Electrification: A Case Study. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 90(4): 6071-6078.
- Lopes, C.C. 2019. *Microfísica, Cinemática e Eletrificação em Tempestades Tropicais que Geraram Granizo Durante o Projeto SOS-CHUVA*. Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, 105p.
- Mason, B.J. 1957. *The Physics of Clouds*. London, Oxford University Press, 481p.
- Mattos, E.V.; Machado, L.A.T.; Williams, E.R.; Goodman, S.J.; Blakeslee, R.J. & Bailey, J.C. 2017. Electrification Life Cycle of Incipient Thunderstorms. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(8): 4670-4697.
- Mccaul Jr., E.W.; Goodman, S.J.; Lacasse, K.M. & Cecil, D.J. 2009. Forecasting Lightning Threat Using Cloud-Resolving Model Simulations. *Weather and Forecasting*, 24(3): 709-729.
- Medina, B.L. & Machado, L.A.T. 2017. Dual Polarization Radar Lagrangian Parameters: a Statistics-Based Probabilistic Nowcasting Model. *Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards*, 89(2): 705-721.
- Naccarato, K.P. *Análise das Características dos Relâmpagos na Região Sudeste do Brasil*. 2005. Programa de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Tese de Doutorado, 362p.
- Queiroz, A.P. 2008. *Monitoramento e Previsão Imediata de Tempestades Severas Usando Dados de Radar*. Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Dissertação de Mestrado, 114p.
- Queiroz, A.P.; Cruz, J.S.; Carvalho, P.R.B. & França, V.D.J. 2012. Estudo de Caso de Granizo no Distrito Federal com a Utilização de Índices de Instabilidades. *Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica*. Disponível em: <<https://www.redemet.aer.mil.br/uploads/2014/04/GranizoDF.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2018.
- Reynolds, S.E.; Brook M. & Gourley, M.F. 1957. Thunderstorm Charge Separation. *Journal of Meteorology*, 14(5): 426-436.
- Rinehart, R.E. 2004. *Radar for Meteorologists*. Nevada, Rinehart Publications. 482p.
- Riquetti, N.V.; Dorneles, V.R. & Nunes, A.B. 2018. Estudo do Caso de Precipitação Intensa Sobre Foz do Iguaçu-PR em Setembro de 2015. *Revista Brasileira de Climatologia*, 22: 589-606.
- Schultz, C.J.; Petersen, W.A. & Carey, L.D. 2009. Preliminary Development and Evaluation of Lightning Jump Algorithms for the Real-Time Detection of Severe Weather. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(12): 2543-2563.
- Schultz, C.J.; Petersen, W.A. & Carey, L.D. 2011. Lightning and Severe Weather: A Comparison Between Total and Cloud-to-Ground Lightning Trends. *Weather and Forecasting*, 26(5): 744-755.
- Sperling, V.B. 2018. *Processos Físicos e Elétricos das Tempestades de Granizo na Região Sul do Brasil*. Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Tese de Doutorado, 187p.
- Straka, J.M.; Zrnić, D.S. & Ryzhkov, A.V. 2000. Bulk Hydrometeor Classification and Quantification Using Polarimetric Radar Data: Synthesis of Relations. *Journal of Applied Meteorology*, 39(8): 1341-1372.
- Waldvogel, A.; Federer, B. & Grimm, P. 1979. Criteria for the Detection of Hails Cells. *Journal of Applied Meteorology*, 18(12): 1521-1525
- Wallace, M.J. & Hobbs, V.P. 2006. *Atmospheric Science: An Introductory Survey*. New York, Academic Press, 504p.
- Williams, E.R.; Mattos, E.V. & Machado, L.A.T. 2016. Stroke Multiplicity and Horizontal Scale of Negative Charge Regions in Thunderclouds. *Geophysical Research Letters*, 43(10): 5460-5466.
- Williams, E.R.; Weber, M.E. & Orville, E.E. 1989. The Relationship Between Lightning Type and Convective State of Thunderclouds. *Journal of Geophysical Research*, 94(11): 13213-13220.