

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

EDUARDO XIMENES DE ABREU

DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE GOTAS DE CHUVA EM TEMPESTADES
COM E SEM DESCARGAS ELÉTRICAS NA CIDADE DE SÃO PAULO

SÃO PAULO

2022

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

EDUARDO XIMENES DE ABREU

**DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE GOTAS DE CHUVA EM TEMPESTADES
COM E SEM DESCARGAS ELÉTRICAS NA CIDADE DE SÃO PAULO**

“Versão corrigida. O original encontra-se disponível na unidade.”

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

Área de concentração: Meteorologia

Orientador: Prof^o Dr^o Carlos Augusto Morales Rodriguez

SÃO PAULO

2022

“Tudo é possível, o impossível apenas demora mais.”

Dan Brown.

A meus pais, Romero e Maria,
meus tios, Giovani e Vanilda, e minha noiva,
Geisianne.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e por iluminar sempre o meu caminho.

Agradeço aos meus tios, Giovani e Vanilda, por abrirem as portas de sua casa para que eu pudesse me estabelecer na cidade de São Paulo.

Agradeço ao Professor Morales pelo convite para esta pesquisa, e pelos anos de muita paciência e orientação para comigo.

Agradeço a CAPES pela bolsa de mestrado.

Agradeço ao Laboratório de Micrometeorologia do IAG e ao Departamento de Geografia da FFLCH pelos dados pluviométricos utilizados nesta pesquisa.

Agradeço aos Professores do IAG por todo o conhecimento que eu adquiri durante as disciplinas obrigatórias.

Agradeço a minha noiva, Geisianne, por sempre me apoiar e incentivar concluir esta dissertação.

Agradeço a toda a minha família.

RESUMO

Este estudo fez uma análise da distribuição de tamanho de gotas de chuva (DSD) observada em sistemas precipitantes com descargas elétricas (tempestades elétricas) e sem descargas elétricas na cidade de São Paulo a partir de medidas de um radar de apontamento vertical (*micro rain radar* – MRR) durante o período de dezembro de 2015 à março de 2020. Durante este período foram selecionados 94 sistemas precipitantes que resultaram em 117,87 horas de observações (42.431 DSDs), sendo que 43 foram classificadas como tempestades com descargas elétricas e 51 sem descargas elétricas. Independente da atividade elétrica, a DSD pode ser representada por uma função gama com parâmetro de forma negativo. As tempestades com descargas elétricas têm taxa de precipitação e diâmetros medianos maiores do que as tempestades sem descargas elétricas, ou seja, 7,15 mm/h contra 3,11 mm/h e 1,44 mm contra 1,17 mm respectivamente. Quando se analisa a distribuição de frequência de ocorrência, observa-se que 59% das DSDs das tempestades com descargas elétricas têm taxa de precipitação inferior a 2 mm/h, enquanto que as tempestades sem descargas elétricas têm 73% das observações. Já para taxas de precipitação maiores que 10 mm/h, as tempestades com descargas elétricas têm mais de 18% das observações, enquanto que as tempestades sem descargas elétricas ficam restritas a 9% das medidas. As tempestades com descargas elétricas têm maior concentração de gotas acima de 2 mm de diâmetro e as tempestades sem descargas elétricas para diâmetros menores que 2 mm. Ao analisar a variação da DSD em função da atividade elétrica (ciclo de vida), observou-se que as taxas de precipitação são mais altas durante o estágio de desenvolvimento (9,03 mm/h), seguido da maturação (7,81 mm/h) e dissipação (5,02 mm/h). Já no diâmetro mediano, temos que a fase de dissipação apresentou o maior valor, ou seja, 1,57 mm, seguido da maturação com 1,53 mm e 1,48 mm no desenvolvimento. Por fim, analisou-se como a DSD variava em função da polaridade do campo elétrico. As tempestades elétricas com campo elétrico negativo tinham 81% das observações com taxa de precipitação inferior a 10 mm/h, já as com campo elétrico positivo eram 91% das medidas. As tempestades com campo elétrico negativo têm maior concentração de gotas com diâmetros maiores que 2,3 mm, já as tempestades elétricas com campo elétrico positivo tinham maiores concentrações para diâmetros menores que 1,7 mm. As tempestades com campo elétrico negativo têm diâmetro mediano de 1,53 mm, enquanto que as com campo elétrico positivo têm 1,45 mm. Estes resultados indicam que nas tempestades com descargas elétricas existe um predo-

mínio do processo de acreção que é potencializado durante o processo de colisão seguido de coalescência abaixo da base da nuvem. Já os sistemas sem descargas elétricas, o processo de agregação predomina e produz cristais de gelo menos densos que derretem e aumentam a eficiência de quebra das gotas em detrimento da coalescência. Por fim, a atividade elétrica e a polaridade do campo elétrico indicam que na fase de desenvolvimento e maturação e campo elétrico positivo há um predomínio do processo de acreção, enquanto que na dissipação e campo elétrico negativo a agregação domina.

Palavras-chave: descargas elétricas; micro radar de chuva; distribuição de tamanho de gotas de chuva; tempestades; campo elétrico vertical.

ABSTRACT

This study analyzed the rain drop size distribution (DSD) observed in thunderstorms (with lightning) and rain storms (without lightning) in the city of São Paulo, based on measurements of a vertical pointing radar (micro rain radar – MRR), during the period from December 2015 to March 2020. During this period, 94 precipitating systems were identified that resulted in 117.87 hours of observations (42,431 DSDs), of which 43 were classified as thunderstorms and 51 rain storms. Regardless of the electrical activity, the DSD can be represented by a gamma function with a negative shape factor. Thunderstorms show greater rain rate and median diameters than rain storms, i.e, 7.15 mm/h versus 3.11 mm/h and 1.44 mm versus 1.17 mm respectively. When analyzing the frequency distribution of occurrence, it is observed that 59% of DSDs of thunderstorms have a precipitation rate of less than 2 mm/h, while rain storms have 73% of observations. For precipitation rates greater than 10 mm/h, thunderstorms have more than 18% of observations, while rain storms are restricted to 9% of measurements. Thunderstorms have a higher concentration of droplets above 2 mm in diameter and rain storms for diameters smaller than 2 mm. When analyzing the variation of DSD as a function of electrical activity (life cycle), it was observed that precipitation rates are higher during the development stage (9.03 mm/h), followed by mature (7.81 mm /h) and dissipation (5.02 mm/h) stages. In the median diameter, the dissipation phase presented the highest value, that is, 1.57 mm, followed by mature with 1.53 mm and 1.48 mm in developing stages. Finally, it was analyzed how the DSD varied as a function of the polarity of the electric field. Thunderstorms with a negative electric field had 81% of the observations with a precipitation rate of less than 10 mm/h, while those with a positive electric field were 91% of the measurements. Thunderstorms with a negative electric field have a higher concentration of droplets with diameters greater than 2.3 mm, whereas electric storms with a positive electric field had higher concentrations for diameters smaller than 1.7 mm. Thunderstorms with a negative electric field have a median diameter of 1.53 mm, while those with a positive electric field are 1.45 mm. These results indicate that in thunderstorms there is a predominance of the accretion process that is potentiated during the collision process followed by coalescence below the cloud base. On the other hand, rain storms, the aggregation process predominates and produces less dense ice crystals that melt and increase the droplet breaking efficiency at the expense of coalescence. Finally, the electrical activity and the polarity of the electric field indicate that in the

developing and mature stages and positive electric field there is a predominance of the accretion process, while in the dissipation and negative electric field the aggregation dominates.

Keywords: lightning; micro rain radar; raindrop size distribution; thunderstorms; vertical electric field.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.0	- Diagrama ilustrando algumas etapas que ocorrem durante o processo de colisão e coalescência. Fonte: adaptado do portal eletrônico da Plymouth Sate University.....	25
Figura 2.1	- Diagrama ilustrando os efeitos da (a) coalescência, (b) quebra, (c) coalescência e quebra, (d) acreção, (e) evaporação, (f) corrente ascendente e (g) corrente descendente, na distribuição de tamanho de gotas. Fonte: adaptado de Rosenfeld & Ulbrich (2003).....	29
Figura 2.2	- Esquema de uma célula convectiva em seus três estágios do ciclo de vida: (a) estágio cumulus, (b) estágio maduro e (c) estágio dissipativo. Fonte: adaptada de Wallace e Hobbs (2006).....	31
Figura 3.1	- Exemplo de duas ondas (sinal transmitido e recebido) dente de serra observadas pelo MRR para aferir a distância do alvo. Na figura T é o período da onda e f representa a frequência. Fonte: adaptado de METEK (2006).....	35
Figura 3.2	- Campo elétrico medido com CS110 durante um período de 24 horas de bom tempo, na região de Logan, Utah, em 27 de julho de 2005. Fonte: Campbell, 2017.....	39
Figura 3.3	- Campo elétrico atmosférico monitorado por um CS110 durante uma tempestade local, na região de Logan, Utah, em 2 de agosto de 2005. Fonte: Campbell, 2017.....	39
Figura 3.4	- Mapa da região de estudo: (a) mapa mostrando a posição latitudinal da região estudada, (b) município de São Paulo (contornos em preto) e localização dos sensores da LINET (losangos azuis) e (c) região do município de São Paulo (contornos em preto).....	40
Figura 3.5	- Mapa com a localizações do MRR e o pluviômetro do LabMicro (ponto vermelho) e o pluviômetro da FFLCH (ponto ama-	

	relo). Fonte: Google (2021).....	41
Figura 4.0	- Diagrama de dispersão e reta de regressão para o ADP medidos pelos pluviômetros LabMicro FFLCH. Nos diagramas está informado a equação de regressão, a quantidade de amostras (Na), o coeficiente de determinação (R ²) e o coeficiente de correlação Pearson (r).....	44
Figura 4.1	- Diagramas de dispersão e reta de regressão para o ADP medidos pelo MRR e os pluviômetros (a) LabMicro e (b) FFLCH. Nos diagramas está informado a equação de regressão, a quantidade de amostras (Na), o coeficiente de determinação (R ²), o ERRO e o coeficiente de correlação Pearson (r).....	45
Figura 4.2	- Similar a Figura 3.1, porém, este diagrama combina as medições dos pluviômetros LabMicro (círculos verdes) FFLCH (losangos roxos).....	46
Figura 4.3	- Histograma de frequência relativa e frequência acumulativa da diferença absoluta (DA, barras e linhas em roxo) e o erro percentual (ERRO, barras e linhas em verde) entre o MRR e os pluviômetros LabMicro e FFLCH.....	47
Figura 4.4	- Evolução da chuva (PA a cada 5 min) para o evento ocorrido no dia 01 de novembro de 2019, observados realizadas pelo MRR (barras em cinza), pluviômetro LabMicro (linhas com marcadores em verde) e o pluviômetro FFLCH (linhas com marcadores em roxo). No gráfico está informado a precipitação acumulada total durante a chuva (PA), a DA e o ERRO, com relação ao MRR, para os dois pluviômetros.....	48
Figura 4.5	- Similar a Figura 4.4, porém para o dia 10 de dezembro de 2019.....	48
Figura 4.6	- Diagrama de dispersão e reta de regressão para o ADP medidos pelo MRR e os pluviômetros LabMicro (círculos verdes)	

	FFLCH (losangos roxos), para os dias que passaram pelo controle de qualidade. No diagrama está informado a equação de regressão, a quantidade de amostras (N_a), o coeficiente de determinação (R^2), o ERRO e o coeficiente de correlação Pearson (r).....	49
Figura 4.7	- Histograma de frequência relativa e frequência relativa acumulada da diferença absoluta (DA, barras e linhas em roxo) e o erro percentual (ERRO, barras e linhas em verde) entre o MRR e os pluviômetros LabMicro e FFLCH, para os dias que passaram pelo controle de qualidade.....	50
Figura 4.8	- Similar a Figura 4.5, porém, para o dia 30 de dezembro de 2017.....	51
Figura 4.9	- Esquema ilustrativo, mostrando e descrevendo de maneira direta, os passos seguidos e executados para a seleção dos eventos de chuva associados com tempestades com descargas elétricas e sem descargas elétricas.....	52
Figura 4.10	- Gráfico de barras mostrando a evolução da atividade elétrica (número de descargas elétricas por minuto, barras em azul) e da chuva (precipitação acumulada em 1 min, barras em cinza) observada no dia 22 de dezembro de 2015 a uma distância máxima de 50 km do MRR. Os quadrantes 1, 2 e 3 se referem, respectivamente, aos três estágios da atividade elétrica durante o ciclo de vida desta tempestade.....	54
Figura 4.11	- Variação temporal do campo elétrico em superfície (linha marrom) observado no dia 3 de outubro de 2018. As linhas verticais pretas indicam o momento em que a média móvel de 3 minutos se tornou negativa ou positiva, e as linhas verticais vermelhas, indicam o período de duração da chuva (início e fim). A linha preta indica a média móvel de 3 min.....	55

Figura 5.1	- Histograma de frequência (barras) e frequência acumulativa (linhas) da taxa de precipitação (mm/h) para as tempestades com (azul claro) e sem descargas elétricas (cinza).....	59
Figura 5.2	- Similar a Figura 5.1, porém, para todo o conjunto amostral de R.....	60
Figura 5.3	- Painel com a distribuição de tamanho de gotas em função das classes de R (A-H) para as tempestades com (azul claro) e sem descargas elétricas (cinza). Para cada classe de R é mostrada a informação do número de amostras (Na) e a taxa de precipitação média (R, em mm/h) de cada tempestade.....	62
Figura 5.4	- Gráfico de contorno mostrando a diferença percentual (DIF, em %) da concentração média de gotas em intervalos de R (mm/h) para as tempestades com e sem descargas elétricas.....	64
Figura 5.5	- Similar a Figura 5.3, porém, para intervalo de R igual a 10 mm/h.....	65
Figura 5.6	- Painel com gráfico boxplot mostrando a distribuição do diâmetro mediano das gotas (Dm) em função dos intervalos de R (mm/h) para as tempestades com (azul claro) e sem descargas elétricas (cinza). A Figura também fornece, para cada classe de R (mm/h), o número de espectros (amostras de DSD) e o diâmetro mediano médio. As classes de R demarcadas por um ponto vermelho remetem ao intervalo onde as médias amostrais foram consideradas diferentes (teste t Student para 90% de confiança).....	66
Figura 5.7	- Similar a Figura 4.4, porém, para intervalos de R igual a 10 mm/h.....	67
Figura 5.8	- Histograma de frequência (barras) e frequência acumulativa (linhas) da taxa de precipitação (mm/h) para a estágio 1 (amarelo), estágio 2 (vermelho) e estágio 3 (cinza).....	69

Figura 5.9	- Similar a Figura 4.13, porém, para intervalo de classe de R de 10 mm/h.....	69
Figura 5.10	- Painel com a distribuição de tamanho de gotas em função das classes de R (A-H) para as chuvas do estágio 1 (amarelo), estágio 2 (vermelho) e estágio 3 (cinza). Para cada classe de R é mostrada a informação do número de amostras (Na) e a taxa de precipitação média (R, em mm/h) de cada tempestade.....	72
Figura 5.11	- Gráfico de contorno mostrando a diferença percentual (DIF, em %) da concentração média de gotas em intervalos de R (mm/h) entre as chuvas do (a) estágio 1 e estágio 2, (b) estágio 2 e estágio 3, e (c) estágio 3 e estágio 1.....	74
Figura 5.12	- Similar a Figura 5.11, porém, para intervalo de R igual a 10 mm/h. (a) Estágio 1 e estágio 2, (b) estágio 2 e estágio 3, e (c) estágio 3 e estágio 1.....	75
Figura 5.13	- Painel com gráfico boxplot mostrando a distribuição do diâmetro mediano das gotas (Dm) em função dos intervalos de R (mm/h) para as chuvas do estágio 1 (amarelo), estágio 2 (vermelho) e estágio 3 (cinza). As classes de R demarcadas pelos pontos verdes, lilás e vermelho, remetem respectivamente aos intervalos onde as médias amostrais foram consideradas iguais (teste t Student para 90% de confiança) entre os estágios 1 e 2, estágios 2 e 3 e os estágios 1 e 3.....	77
Figura 5.14	- Similar a Figura 5.13, porém, para intervalos de R igual a 10 mm/h.....	78
Figura 5.15	- Histograma de frequência (barras) e frequência acumulativa (linhas) da taxa de precipitação (mm/h) para o campo elétrico positivo (vermelho-vinho) e negativo (preto).....	80
Figura 5.16	- Similar a Figura 5.15, porém, para intervalo de classe de R de 10 mm/h.....	80

Figura 5.17	- Painel com a distribuição de tamanho de gotas em função das classes de R (A-H) para as chuvas do grupo positivo (vermelho-vinho) e negativo (preto). Para cada classe de R é mostrada a informação do número de amostras (Na) e a taxa de precipitação média (R, em mm/h) de cada tempestade.....	83
Figura 5.18	- Gráfico de contorno mostrando a diferença percentual (DIF, em %) da concentração média de gotas em intervalos de R (mm/h) para as chuvas do grupo positivo e negativo.....	84
Figura 5.19	- Similar a Figura 5.18, porém, para intervalo de R igual a 10 mm/h.....	85
Figura 5.20	- Painel com gráfico boxplot mostrando a distribuição do diâmetro mediano das gotas (Dm) em função dos intervalos de R (mm/h) para as chuvas do grupo positivo (vermelho-vinho) e negativo (preto). As classes de R demarcadas por um ponto vermelho remetem ao intervalo onde as médias amostrais foram consideradas iguais (teste t Student para 90% de confiança).....	86
Figura 5.21	- Similar a Figura 4.20, porém, para intervalos de R igual a 10 mm/h.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	- Tabela com a descrição dos conjuntos de chuva e as correspondentes informações: número de tempestades associadas, número de amostras (N_a) e horas de amostragem (h).....	56
Tabela 5.1	- Tabela com os valores da média, desvio padrão e o valor obtido para o teste t Student (T Obtido) da taxa de precipitação (mm/h) e diâmetro mediano (mm) para as tempestades com e sem descargas elétricas.....	68
Tabela 5.2	- Tabela com os valores da média, desvio padrão e o valor obtido para o teste t Student (T Obtido) da taxa de precipitação (mm/h) e diâmetro mediano (mm) para as chuvas do estágio 1, estágio 2 e estágio 3.....	79
Tabela 5.3	- Tabela com os valores da média, desvio padrão e o valor obtido para o teste t Student (T Obtido) da taxa de precipitação (mm/h) e diâmetro mediano (mm) para as chuvas do grupo positivo e negativo.	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADP	-	Acumulado diário de precipitação (mm)
CCN	-	<i>Cloud Condensation Nucleus</i>
CG	-	<i>Cloud-to-Ground</i>
CN	-	Campo elétrico negativo
CP	-	Campo elétrico positivo
DA	-	Diferença Absoluta (mm)
DIF	-	Diferença percentual (%)
Dm	-	Diâmetro mediano (mm)
DSD	-	<i>Rain Drop Size Distribution</i>
ERRO	-	Erro absoluto percentual (%)
FFLCH	-	Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas
GPS	-	<i>Global Positioning System</i>
IAG	-	Instituto de Astronomia Geofísica e Ciências Atmosféricas
IC	-	<i>Intra-Cloud</i>
LabMicro	-	Laboratório de Micrometeorologia
LINET	-	<i>Lightning Network</i>
LWC	-	<i>Liquid Water Content</i> (g/m ³)
METEK	-	<i>Meteorologische Messtechnik GmbH</i>
MRR	-	<i>Micro Rain Radar</i>
PA	-	Precipitação acumulada (mm)
R	-	Taxa de precipitação (mm/h)
TOA	-	<i>Time of Arrival</i>
USP	-	Universidade de São Paulo

Z - Refletividade do radar (dBZ)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
2.1. A NATUREZA DAS NUVENS.....	24
2.1.1. Nuvens Quentes	24
2.1.2. Nuvens Frias.....	26
2.2. PROCESSOS QUE MODIFICAM A DSD.....	27
2.3. TEMPESTADES ELÉTRICAS.....	28
3. DADOS	33
3.1. REGIÃO DE ESTUDO	33
3.2. MICRO RADAR DE CHUVA - MRR.....	34
3.2.1. Princípio Físico: Coleta dos Dados	34
3.2.2. Princípio Físico: Processamento dos Dados	35
3.3. REDE DE DETECÇÃO DE DESCARGAS ELÉTRICAS.....	37
3.4. PLUVIÔMETROS.....	37
3.5. FIELD DE MILL	38
4. METODOLOGIA	42
4.1. CONTROLE DE QUALIDADE DO MRR.....	42
4.1.1. Análise do Acumulado Diário de Precipitação	43
4.1.2. Pós Controle de Qualidade dos Dados	49
4.2. IDENTIFICAÇÃO DOS EVENTOS DE CHUVA.....	51
4.2.1 Tempestades Com e Sem Descargas elétricas	52
4.3. ESTÁGIOS DA ATIVIDADE ELÉTRICA DAS TEMPESTADES.....	53
4.4. CAMPO ELÉTRICO POSITIVO E NEGATIVO.....	54
4.5. RESUMO DAS CLASSIFICAÇÕES.....	56
4.6. DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS ANALISADAS.....	56
5. RESULTADOS	58
5.1 TEMPESTADES COM E SEM DESCARGAS ELÉTRICAS	58
5.1.1. Distribuição da Taxa de Precipitação.....	58
5.1.2. Distribuição do Tamanho de Gotas.....	60
5.1.3. Distribuição do Diâmetro Mediano.....	65
5.2. ESTÁGIOS DA ATIVIDADE ELÉTRICA DAS TEMPESTADES COM DESCARGAS ELÉTRICAS	68
5.2.1. Distribuição da Taxa de Precipitação.....	68
5.2.2. Distribuição do Tamanho de Gotas.....	70

5.2.3. Distribuição do Diâmetro Mediano.....	76
5.3. CAMPO ELÉTRICO POSITIVO E NEGATIVO.....	79
5.3.1. Distribuição da Taxa de Precipitação.....	79
5.3.2. Distribuição do Tamanho de Gotas.....	81
5.3.3. Distribuição do Diâmetro Mediano.....	85
6. CONCLUSÕES.....	89
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A distribuição do tamanho de gotas de chuva (do inglês, *Rain Drop Size Distribution*, DSD) representa o número de gotas, em função do seu tamanho. Os primeiros experimentos sobre as gotas de chuva surgiram da necessidade de mensurar a erodibilidade e a capacidade de infiltração do solo provocado pela chuva. Inicialmente, estes experimentos tentaram simular as gotas de chuva, pulverizando gotas de água em pequenas áreas de terra. Os resultados insatisfatórios obtidos através desta técnica, reforçaram a necessidade de coletar e mensurar as gotas de chuva durante a precipitação. Logo, com este problema, houve início aos estudos sobre as DSD.

Pioneiro nesta análise, Wiesner (1895) conseguiu medir e descrever o tamanho das gotas de chuva a partir da coleta das gotas de chuva em papel absorvente. Anos mais tarde, Bentley (1904) utilizou um recipiente com uma fina camada de farinha e assim foi possível quantificar o número e o tamanho de bolinhas de farinha que eram produzidas pelas gotas de chuva. Posteriormente, Lenard (1904) mostrou que as gotas de chuva poderiam ser estudadas através da sua frequência de ocorrência em diferentes tamanhos médios, já Defant (1905) conseguiu detalhar diferentes curvas ou padrões de DSD em 26 intervalos de tamanho.

Décadas mais tarde, Laws & Parsons (1943) coletaram amostras de chuva com diferentes intensidades (taxa de precipitação) e separaram as gotas em intervalos de tamanho. Este estudo indicou que a curva da DSD mudava em função da intensidade da chuva, sendo que à medida que a taxa de precipitação aumentava a concentração de gotas grandes também aumentava.

Posteriormente, Marshal & Palmer (1948) coletaram gotas de chuva em papéis de mata borrão e conseguiram discriminar a concentração de tamanho de gotas de chuva. Através desta nova técnica, mais rápida e eficiente, eles coletaram um grande número de eventos de chuva de verão na cidade de Ottawa, Canadá (latitude média). A partir deste conjunto de dados, Marshal & Palmer (1948) fizeram ajustes paramétricos que relacionava a DSD com a taxa de precipitação e obtiveram uma expressão do tipo exponencial, que mais tarde veio a ficar associada com precipitações estratiformes de latitudes médias.

Com o advento do disdrômetro eletromecânico, desenvolvido por Joss & Wal-

Waldvogel (1967), foi possível expandir as medidas da DSD para outras regiões do globo. Assim, vários experimentos mostraram que, a função exponencial de Marshall & Palmer (1948), não representava corretamente a concentração de gotas pequenas (< 1 mm) em DSDs oriundas de sistemas convectivos (regiões tropicais e subtropicais). Deste modo, foram propostas novas funções. Por exemplo, Diermenjain, (1969), Ulbrich (1983) e Atlas et al. (1984) descreveram uma função gama, já uma função log-normal foi proposta por Fang & Chen (1982), Ajayi & Olsen (1985) e Feingold & Levin (1986). Estas novas funções conseguiriam modelar de forma mais fiel a concentração das gotas pequenas (< 1 mm), mostrando que nestes sistemas o pico de concentração de gotas fica entre 1 e 2 mm de diâmetro.

Seguindo esta linha de pesquisa, os primeiros estudos no Brasil (região central do estado de São Paulo) também verificaram a curva característica da DSD observada na região. Wagner (1986) e Wagner & Massambani (1986) mostraram que a DSD não seguia uma função exponencial. Maciel & Assis (1990) ajustaram uma função log-normal para a DSD observada. Já Morales (1991) reforçou que a DSD não segue uma função exponencial negativa e sim uma função gama.

Já Waldvogel (1974) e Tokay & Short (1996) tiveram outro enfoque e conseguiram identificar e classificar as características da chuva (estratiforme e convectiva) através de observações da DSD. A partir de um ajuste na função exponencial de Marshall & Palmer (1948), Waldvogel (1974) analisou a variação do parâmetro N_0 que variava quando tinha a presença de banda brilhante. Já Tokay & Short (1996) analisaram a evolução temporal da variação dos parâmetros N_0 e λ da função gama durante a transição da chuva de convectiva para a porção stratiforme.

Nas últimas décadas, alguns estudos se empenharam em investigar as características da DSD, considerando em cada região de estudo, o tipo de chuva (convectiva ou stratiforme) (Foster & Pereira Filho, 2011), a natureza de formação (continental ou marítima) (Ulbrich & Atlas, 2007; Tenório et al., 2012), o efeito da variabilidade regional (Marzuki et al., 2013; Seela et al., 2017; Wu et al., 2019); a atuação de linhas de instabilidades (Maki et al., 2001), passagem de ciclones (Kim & Lee, 2017; Janapati et al., 2017) e estações do ano (Seela et al., 2018; Wen et al., 2017). Estes estudos mostraram como a DSD varia de acordo com cada proposta de investigação.

Por exemplo, Tenório et al. (2012) mostrou no seu estudo de caso (litoral do

nordeste brasileiro), que as tempestades continentais geram maiores (menores) concentrações de gotas com diâmetro acima (abaixo) de 2 mm em comparação as tempestades marítimas.

Por fim, as DSDs também foram estudadas em tempestades elétricas, nuvens que tem pelo menos uma descarga atmosférica durante o seu ciclo de vida. Pode-se destacar o trabalho pioneiro de Saylor et al. (2005) que observaram que os parâmetros Λ e N_0 da função exponencial proposta por Marshall & Palmer (1948) poderiam ser relacionados com as descargas elétricas observadas para inferir a taxa de chuva (R). Neste estudo, as equações derivadas mostraram uma boa relação, no entanto a inferência poderia ser mais eficaz se medidas de radar fossem utilizadas. Nos últimos 4-5 anos alguns estudos (Mudiar et al., 2018; Chakravarty et al., 2020; Chatterjee & Das, 2020; Mudiar et al., 2021a; Mudiar et al., 2021b) apontaram que as DSD eram modificadas quando da ocorrência de descargas elétricas ou quando estavam em ambientes eletrificados.

Mudiar et al. (2018) compararam as DSDs inferidas por um micro radar meteorológico (MRR) em 3 níveis de altitude (600, 1200 e 2400 m) para seis eventos de chuva com descargas elétricas e sem descargas elétricas. Os autores observaram que os eventos associados com descargas elétricas apresentaram maiores concentrações de gotas para diâmetros acima de 2 mm e menores concentrações para diâmetros abaixo de 1,5 mm. Por fim, os autores concluíram que as forças elétricas dentro da nuvem podem influenciar os processos de colisão/coalescência e quebra durante a queda da chuva.

Chakravarty et al. (2020) analisaram as diferenças na DSD para sistemas precipitantes com e sem descargas elétricas durante os períodos de pré-moção e monção da Índia. Durante o período pré-moção, as tempestades sem descargas elétricas apresentaram as maiores concentrações de gotas grandes, mas durante a monção foi observado o oposto. De acordo com estes autores, durante o período de pré-moção as tempestades sem descargas elétricas são menos desenvolvidas verticalmente (fracas correntes ascendentes) e, conseqüentemente, as gotas de chuva são menos impactadas pelos processos de quebra e evaporação. Já no período de monção, o campo elétrico presente nas tempestades eletrificadas é o fator fundamental para a maior concentração de gotas grandes observadas durante a chuva naquele período.

Chatterjee & Das (2020) compararam as DSDs médias para as tempestades com e sem descargas elétricas (24 eventos cada) e identificaram que, para as tempestades sem

descargas elétricas, as DSDs médias apresentaram maiores concentrações de gotas pequenas, enquanto que as tempestades com descargas elétricas tinham maior concentração de gotas de diâmetro acima de 2 mm.

Finalmente, Mudiar et al. (2021a) estudaram os efeitos dos íons do ar gerados pelas descargas elétricas dentro das tempestades e de acordo com os resultados obtidos, as descargas atmosféricas amplificam o efeito da força elétrica na taxa de crescimento das gotas de chuva abaixo do nível de congelamento que, conseqüentemente, induz um aumento na taxa de precipitação observada na superfície. Já Mudiar et al. (2021b) analisaram a variação da DSD com o campo elétrico na superfície para cinco sistemas precipitantes e encontraram uma relação entre o diâmetro mediano das gotas e a intensidade do campo elétrico, além de observar um aumento na concentração de gotas grandes após um pico de campo elétrico.

Ainda há muito que se investigar sobre a relação entre a DSD e as tempestades elétricas. Principalmente sobre a caracterização dos processos microfísicos atuantes e mais efetivos dentro das nuvens (colisão e coalescência, agregação e acreção), que modificam a DSD observada na superfície, sendo este, o enfoque desta pesquisa. Sendo assim, o presente trabalho visa contribuir com a literatura e servir de motivação para que outros trabalhos possam seguir esta linha de pesquisa. Neste sentido, o objetivo principal deste trabalho é o de investigar como a DSD varia em função das tempestades com descargas elétricas e sem descargas elétricas a fim de compreender como os processos microfísicos da chuva são alterados na presença de tempestades elétricas, polaridade do campo elétrico e atividade de descargas elétricas. Para auxiliar neste entendimento são propostas quatro perguntas para ajudar a elucidar este problema.

- i. *A DSD é diferente para tempestades com e sem descargas elétricas?*
- ii. *Que processos microfísicos, que interferem na DSD, podem ser observados nas tempestades com e sem descargas elétricas?*
- iii. *A atividade elétrica varia em função da DSD?*
- iv. *De acordo com a DSD observada, a polaridade do campo elétrico está associada com algum processo microfísico?*

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão dos conceitos fundamentais sobre a formação e o crescimento dos hidrometeoros dentro das nuvens, a formação das tempestades e o processo de eletrificação das tempestades elétricas.

2.1. A NATUREZA DAS NUVENS

As nuvens se formam quando o ar fica supersaturado com relação à água líquida ou, em alguns casos, em relação ao gelo. Na atmosfera o meio mais comum pelo qual a supersaturação é produzida, é através da ascensão de parcelas de ar, resultando em sua expansão e seu resfriamento adiabático. Nestas condições, o vapor d'água condensa em partículas suspensas no ar, dando início aos processos microfísicos que ocorrem durante o desenvolvimento das nuvens (Wallace & Hobbs, 2006). Nesta revisão, os processos microfísicos foram descritos conforme a classificação das nuvens: nuvens quentes¹e nuvens frias².

2.1.1. Nuvens Quentes

O processo no qual as primeiras partículas de nuvens se formam em nuvens quentes é chamado de nucleação, mais especificamente, nucleação heterogênea. Neste processo, o vapor de água presente no ambiente se condensa sobre a superfície de um núcleo de condensação de nuvem (CCN, do inglês, *Cloud Condensation Nucleus*). A nucleação é mais efetiva se o CCN for solúvel em água, pois a pressão do vapor de saturação sobre a solução líquida é geralmente menor do que aquela sobre uma superfície de água pura (Houze Jr, 2014).

Após a nucleação, as gotículas podem crescer (por condensação do vapor de água) ou diminuir (evaporação). Se a supersaturação do ambiente for grande o suficiente, a gotícula se torna “ativada” e começa a crescer, caso contrário ela evapora. Depois de ser ativada, a taxa com que a gotícula começa a crescer é expressa pela equação de difusão do vapor de água. Através desta equação, obtém-se que a taxa de crescimento das gotículas é inversamente proporcional ao seu raio. De acordo com esta equação, o

¹ São nuvens que se formam abaixo da isoterma de 0 °C na troposfera.

²São nuvens que se formam ou seu desenvolvimento ultrapassa a isoterma de 0 °C na troposfera.

crescimento das gotículas por condensação é eficaz até um raio de 10 μm , logo, este processo não é capaz de gerar gotas de chuva da ordem de 1 mm (Wallace & Hobbs, 2006).

Conforme as gotículas aumentam de tamanho e ganham massa, elas começam a precipitar no interior das nuvens com diferentes velocidades. Esse deslocamento vertical faz com que as gotículas colidam uma com as outras e ao colidirem, as gotas e gotículas maiores podem capturar as menores. Este processo é chamado de colisão e coalescência.

Estudos em laboratórios, mostraram que nem todas as colisões resultam em coalescência. A Figura 2.0 mostra quatro etapas durante um processo de colisão e coalescência.

A: a gota grande (gota coletora) precipita, e começa a colidir com as gotículas;

B: as colisões fazem com que a gota coletora cresça e se transforme em gota de chuva; as colisões aumentam, causando a captura de mais gotículas;

C: a gota grande se torna instável;

D: a gota grande se quebra, gerando a formação de uma gota média.

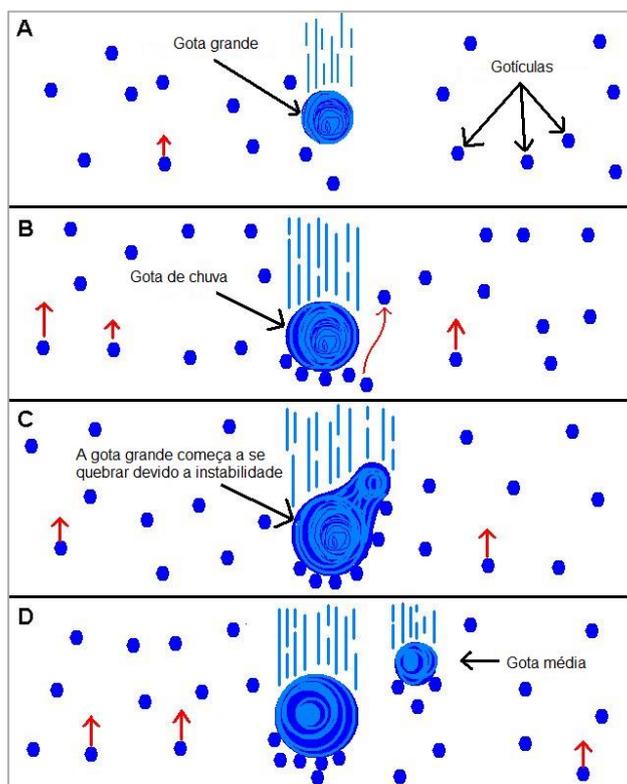


Figura 2.0 - Diagrama ilustrando algumas etapas que ocorrem durante o processo de colisão e coalescência. Fonte: adaptado do portal eletrônico da Plymouth State University.

A eficiência da colisão depende do raio da gota coletora e das gotículas coletadas e é mais eficiente quando o raio da gota coletora é superior a 20 μm . No entanto, a colisão por si só não garante a coalescência, pois várias outras interações são possíveis como: o rebatimento, a coalescência temporária e a coalescência seguida de quebra e quebra. Quando as gotas atingem diâmetros da ordem de milímetros, a força da gravidade é superior a força do arrasto e assim a gota precipita e temos o início da chuva (Wallace & Hobbs, 2006).

2.1.2. Nuvens Frias

À medida que a nuvem se expande e ultrapassa temperaturas inferiores a 0 °C, pode-se denominá-las de nuvens frias. Nesta região onde as temperaturas são negativas, há formação de gotas super-resfriadas, cristais de gelo, graupel e granizo.

Inicialmente, os cristais de gelo se formam através do congelamento de gotículas de água líquida ou através da deposição do vapor de água (nucleação). As partículas de gelo podem crescer a partir da fase de vapor ou a partir de colisões. Um dos mecanismos para o crescimento dos cristais de gelo em nuvens frias está no processo de Bergeron. Basicamente, o processo de Bergeron envolve a coexistência de vapor d'água, gotículas de água líquida e cristais de gelo. Em uma nuvem desse tipo, a pressão de vapor de água é menor do que a pressão de vapor saturado, o que significa que a água em estado líquido pode ser superesfriada, isto é, permanecer em estado líquido abaixo de 0 °C.

Por outro lado, os cristais de gelo podem existir mesmo em uma pressão de vapor menor do que a pressão de vapor de saturação, o que significa que eles podem crescer à custa das gotículas de água superesfriadas. Isso acontece porque a superfície dos cristais de gelo tem uma pressão de vapor menor do que a das gotículas de água, fazendo com que as moléculas de água das gotículas se depositem na superfície dos cristais de gelo e cresçam.

Dessa forma, o processo de Bergeron é responsável pela formação de cristais de gelo maiores e mais pesados que eventualmente caem da nuvem como neve ou granizo. As gotículas de água, por sua vez, podem evaporar completamente durante esse processo ou permanecer superesfriadas até que sejam suficientemente grandes para se trans-

formar em precipitação líquida.

As partículas de gelo também podem crescer através da colisão com gotas super-resfriadas que se congelam durante o contato (*riming*) ou por acreção que acabam produzindo as pedras de granizo. Neste processo, as gotas super-resfriadas se congelam sobre a superfície das partículas de gelo, transformando os cristais de gelo em graupel (granizo com diâmetro menor que 2 mm). Porém se cristais de gelo colidem entre si, podemos ter o processo de agregação que leva a formação de agregados e flocos de neve, por exemplo (Wallace & Hobbs, 2006).

A condição para precipitação dos hidrometeoros presentes nas nuvens frias é análogo as nuvens quentes. No entanto, as partículas de gelo ao alcançarem temperaturas mais quentes, derretem e geralmente chegam à superfície na forma de gotas de água líquida. Uma exceção a essa regra são as chuvas de granizo.

2.2. PROCESSOS QUE MODIFICAM A DSD

A seção anterior descreveu como as nuvens se formam e como os hidrometeoros crescem ou diminuem. Neste item, é discutido como estes processos microfísicos afetam as DSDs observadas na superfície durante um evento de chuva.

A forma da DSD é a consequência de vários processos microfísicos que atuam para a formação, crescimento, quebra ou dissipação dos hidrometeoros presentes no interior das nuvens. Para exemplificar estes processos, utilizou-se o trabalho de Rosenfeld & Ulbrich (2003), que assume inicialmente uma distribuição exponencial para verificar as modificações da DSD assim que um processo é ativado ou se torna predominante.

No processo de colisão e coalescência, as gotas maiores colidem com as gotículas menores e as capturam. Logo, ocorre um aumento na concentração de gotas médias e grandes e uma diminuição das gotas pequenas (Figura 2.1a). Por outro lado, as gotas pode ser rebater a parte, caso haja uma fina camada de ar entre elas. Mas a colisão ocasionar a quebra da gota maior o que contribui para aumentar a concentração de gotas médias e pequenas (Figura 2.1b) (Wallace & Hobbs, 2006). Caso os processos de coalescência e a quebra estejam ativos, o resultado será uma maior concentração de gotas

de tamanho médio (Figura 2.1c) (Rosenfeld & Ulbrich, 2003).

Outro processo muito importante que é exclusivo a nuvens frias é a acreção. As correntes ascendentes, que ocorrem em nuvens convectivas, transportam gotas para camadas mais frias durante a fase de crescimento da nuvem. Durante essa fase, as partículas de gelo presentes nesta camada, crescem pela coleta das gotas super-resfriadas (Houze Jr, 2014) e se isso acontecer de maneira homogênea haverá um deslocamento na curva da DSD em direção aos diâmetros maiores, causado pelo crescimento uniforme dos hidrometeoros (Figura 2.1d) (Rosenfeld & Ulbrich, 2003).

Ao sair da base da nuvem, observamos um ambiente subsaturado ($UR < 100\%$), logo a concentração total de gotas pode diminuir significativamente por causa da evaporação. Durante este processo, todas as gotas evaporam, mas a diminuição é mais acentuada para gotas pequenas (Figura 2.1e) (Rosenfeld & Ulbrich, 2003).

As correntes de ar presentes no interior das nuvens também modificam a DSD. Na presença de correntes ascendentes, haverá uma diminuição na taxa de precipitação o que é resultado de uma mudança na DSD. Essa mudança é mais perceptível para as gotas pequenas, pois devido sua menor massa, são facilmente elevadas para níveis mais altos na nuvem. Este efeito na DSD é semelhante ao da evaporação (Figura 2.1f). Já no caso da presença de correntes descendentes, o fluxo de precipitação aumenta, causando um aumento na concentração de gotas em todos os diâmetros. Neste caso, a concentração de gotas pequenas aumentará (Figura 2.1g) (Rosenfeld & Ulbrich, 2003).

2.3. TEMPESTADES ELÉTRICAS

As tempestades elétricas são formadas por uma ou mais nuvens do tipo cumulonimbus (Cb) e que produzem pelo menos uma descarga elétrica durante o seu ciclo de vida. Denominadas de nuvens convectivas, elas são formadas através da convecção em uma massa de ar instável. Seu ciclo de vida pode ser curto (menor que 1 h, para nuvens isoladas) ou durar mais de 2 horas em tempestades multicelulares (mais de uma nuvem Cb). Basicamente o ciclo de vida de um Cb é separado em 3 estágios: cumulus, maduro e dissipativo (Wallace & Hobbs, 2006).

No primeiro estágio (Figura 2.2a), cumulus, a nuvem consiste de uma pluma de ar quente ascendente. Nesta fase, as fortes correntes ascendentes transportam umidade

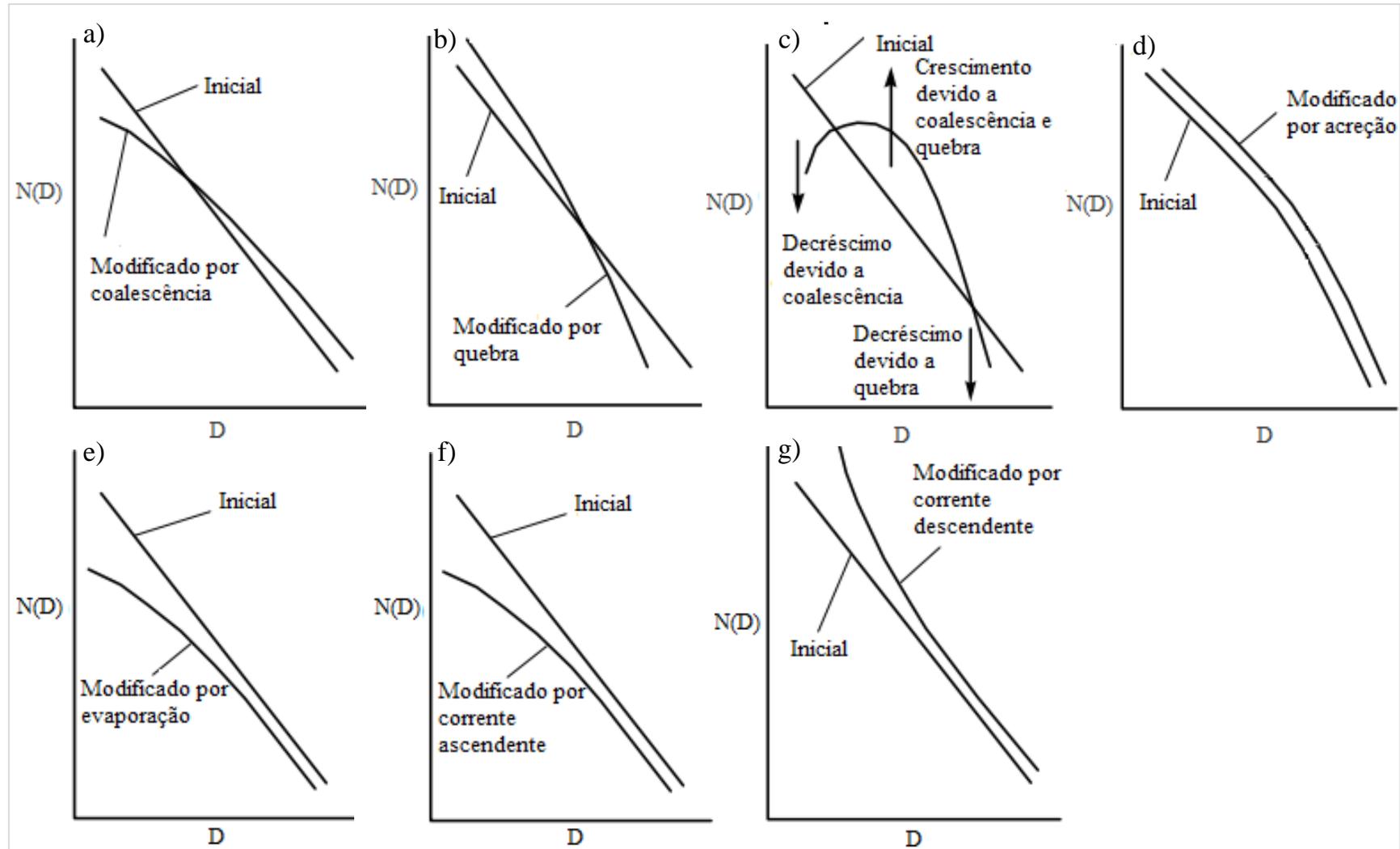


Figura 2.1 - Diagrama ilustrando os efeitos da (a) coalescência, (b) quebra, (c) coalescência e quebra, (d) acreção, (e) evaporação, (f) corrente ascendente e (g) corrente descendente, na distribuição de tamanho de gotas. Fonte: adaptado de Rosenfeld & Ulbrich (2003).

para altos níveis dentro da nuvem, favorecendo a saturação do meio e consequentemente a formação e o crescimento dos hidrometeoros (Houze, 2014). O estágio maduro (Figura 2.2b) caracteriza-se pelo início da precipitação e do fluxo de ar descendente. Neste estágio o topo da nuvem pode atingir alturas superiores a 10 km de altitude e conter uma grande concentração de cristais de gelo e granizo (Wallace & Hobbs, 2006).

No estágio de dissipação (Figura 2.2c), o topo da nuvem pode atingir tropopausa e a formação da bigorna pode ser notada. À medida que a precipitação se estende na nuvem, as correntes descendentes começam a predominar até que se ocupe praticamente toda a nuvem (Wallace & Hobbs, 2006). Neste estágio, a chuva pode assumir um caráter mais estratiforme (Houze Jr, 2014). Conforme a nuvem Cb se desenvolve verticalmente, vários centros de cargas de polaridade oposta (positiva e negativa) se formam e a nuvem como a ficar eletrificada. Por décadas os cientistas tentam explicar (através de experimento e observações) como este processo se desenvolve. Inicialmente foram propostas duas hipóteses a partir das medidas de campo elétrico na superfície e nas nuvens: Precipitação e Convecção (Williams, 1988).

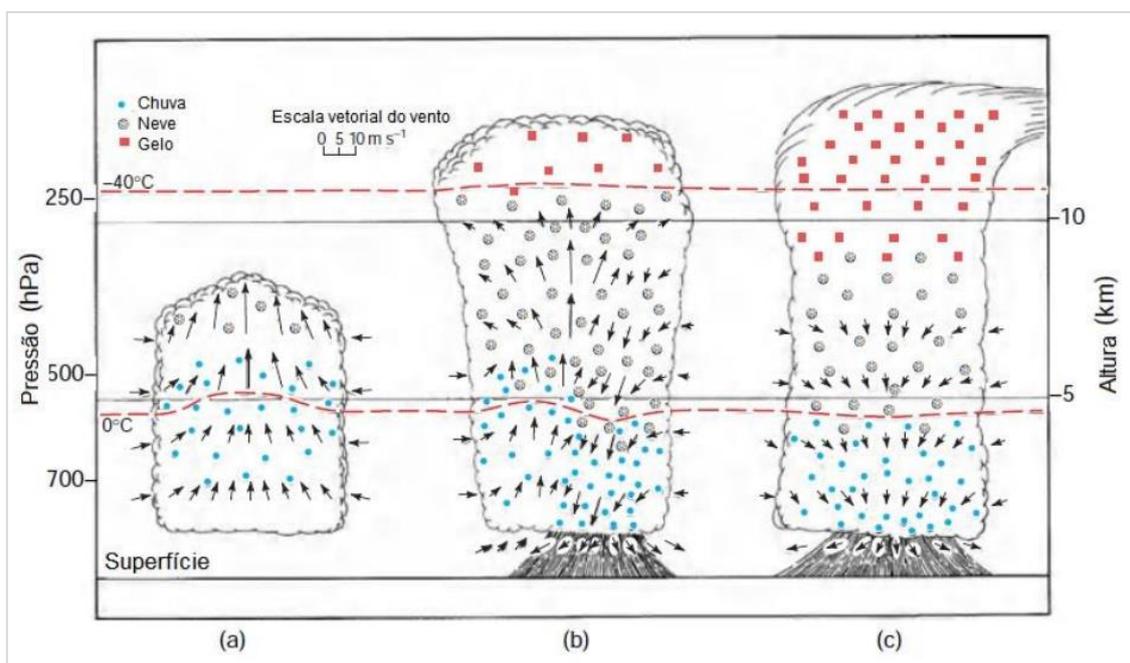


Figura 2.2 - Esquema de uma célula convectiva em seus três estágios do ciclo de vida: (a) estágio cumulus, (b) estágio maduro e (c) estágio dissipativo. Fonte: adaptada de Wallace e Hobbs (2006).

A hipótese da precipitação foi proposta inicialmente por Elster e Geitel em 1885 (Williams, 1988) para explicar a transferência de cargas entre os hidrometeoros polarizados inicialmente durante colisão das partículas. Uma vez que as partículas estavam polarizadas pelo campo elétrico da atmosfera, as cargas ficavam alinhadas e produziam

uma distribuição de cargas positiva na parte inferior da partícula e negativa na parte superior. Assim quando as partículas maiores, como gotas de chuva e pedras de granizo colidiam com as partículas menores, elas perdiam cargas positivas para as menores. Assim ao se separarem, as partículas menores tinham um excesso de cargas positivas e as maiores tinham um déficit, logo ficando carregadas negativamente.

No entanto, como o campo elétrico presente na atmosfera não é suficiente para polarizar as partículas, Grenet (1947) propôs que fontes externas de cargas elétricas poderiam ser responsáveis pela polarização dos hidrometeoros. Basicamente, a superfície da terra injeta grandes concentrações de íons positivos produzidos por decaimento radiativo e na alta atmosfera a ionosfera produz íons positivos e negativos durante o processo de ionização feito pelos raios cósmicos. Nesta conjectura, os íons positivos próximos da superfície da terra eram carregados para o interior das nuvens pelas correntes ascendentes e eram capturados pelos hidrometeoros. À medida que os íons positivos atingiam os níveis mais altos, eles atraíam os íons livres negativos formados na ionosfera e formavam uma camada de blindagem no topo da nuvem. Em seguida, as correntes ascendentes e descendentes favoreciam o deslocamento destes hidrometeoros carregados e aumentavam o campo elétrico dentro da nuvem e polarizam os hidrometeoros. Posteriormente, a transferência de cargas ocorria durante a colisão dos hidrometeoros tal qual a hipótese da precipitação.

Apesar da hipótese da convecção ter um melhor fechamento e não violar os princípios de cargas, as duas propostas não conseguiam explicar o aparecimento de centros de cargas negativos entre as isotermas de 0 e -20°C e as estruturas tripolares como observadas pelas medidas de balão (Marshall & Stolzenburg, 1998). Dessa forma, processos microfísicos associados aos mecanismos de crescimento dos hidrometeoros devem ser incorporados para explicar o aparecimento das cargas elétricas, ou seja, processos não indutivos. Dentre os diversos processos existentes, pode-se destacar o efeito termo elétrico e camada eletricamente dupla que auxiliam na transferência de carga durante a colisão dos cristais de gelo e gotículas de água super-resfriada com o graupel (Takahashi, 1978; Saunders et al., 2004). Durante este processo, o graupel adquire cargas positivas e negativas dependendo do conteúdo de água presente, da temperatura do ar durante a colisão e do tamanho dos cristais de gelo. Este mecanismo consegue então explicar a dependência com a temperatura e o aparecimento de diversos centros de cargas.

3. DADOS

Este capítulo descreve a região de estudo e as fontes de dados utilizados nesta pesquisa. Esta seção foi dividida da seguinte maneira: o item 3.1 apresenta a região de estudo; o item 3.2 descreve o micro radar de chuva e seu princípio de funcionamento; o item 3.3 apresenta a rede de sensores de observações de descargas elétricas; o item 3.4 e o item 3.5 detalha sobre os pluviômetros e medidor de campo elétrico (*field mill*), respectivamente.

3.1. REGIÃO DE ESTUDO

O conjunto de dados foi coletado no período de dezembro de 2015 a março de 2020 na cidade de São Paulo, capital do estado de São Paulo, localizada próxima ao Trópico de Capricórnio (Figura 3.5(a)). O município de São Paulo faz parte da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), situada na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê e próxima à duas regiões de Mata Atlântica preservada, a Serra da Cantareira (a norte) e a Serra do Mar no litoral (GEO-SP, 2004).

A região possui o clima subtropical úmido (Cwa), caracterizado por uma estação de inverno seco e uma estação de verão bastante chuvoso (Kopper & Geiger, 1928). A precipitação média anual é de 1400 mm (IAG, 2017). Este regime de precipitação é modelado pela atuação de sistemas meteorológicos, tais como, circulação de brisa marítima (Pereira Filho, 1999), sistemas frontais (Morais et al., 2010), Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (Silva Dias et al., 1991) entre outros. Silva et al (2009) fizeram uma descrição dos tipos de sistemas precipitantes mais atuantes na região, de acordo com sua intensidade de precipitação e morfologia, utilizando dados de radar meteorológico. Os autores mostraram que a precipitação associada aos núcleos isolados e a brisa marítima, se formam preferencialmente no período da tarde. Já a precipitação associada à banda dispersa, ocorrem com maior intensidade no período de ZCAS. A região de estudo também apresenta uma alta densidade de descargas elétricas (maior que $10 \text{ km}^{-2} \text{ ano}^{-1}$), que se concentram no período da tarde e noite e com maior atividade nos meses de verão (Albrecht et al., 2016).

3.2. MICRO RADAR DE CHUVA - MRR

Os dados de distribuição de tamanho de gotas de chuva foram coletados através de um micro radar meteorológico Doppler de frequência modulada (FM - CW) de onda contínua (MRR, do inglês, *Micro Rain Radar*) que opera com uma frequência de 24 GHz (METEK, 2009). O MRR é um instrumento produzido pela empresa alemã *Meteorologische Messtechnik GmbH* (METEK). Durante todo o período de coleta de dados, o MRR esteve instalado no prédio do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG - USP) ($-23,56^\circ$ e $-46,74^\circ$), na cidade de São Paulo (Figura 3.2(b)).

3.2.1. Princípio Físico: Coleta dos Dados

O MRR é um radar Doppler de apontamento vertical capaz de inferir diversos parâmetros associadas à precipitação (fator refletividade do radar, taxa de precipitação, conteúdo de água líquida e atenuação específica por chuva) em 31 intervalos de distância (Gates). Diferentemente dos radares pulsados, o MRR envia continuamente pulsos de energia com frequência modulada, sendo assim, a distância de um alvo não pode ser obtida de maneira usual, como os radares que atuam no modo pulsado. Para determinar esta distância, o MRR observa as mudanças de frequência entre o sinal transmitido e recebido pelo alvo. A Figura 3.1 ilustra dois sinais (transmitido e o eco recebido), em formato dente de serra, mostrando o desvio da frequência. Nota-se que devido ao atraso de tempo do eco recebido, a frequência é sempre maior do que a do sinal transmitido e a diferença entre essas frequências é proporcional à distância do alvo (METEK, 2009).

Durante a chuva, o MRR observa os sinais recebidos por cada gota presente no volume iluminado pelo radar. Assim, cada gota em sua devida posição no espaço, produz sinais estatisticamente independentes (potências espectrais), que somadas correspondem a potência total do eco retornado ao radar (espectro de potência). Sendo assim, os espectros de potências são formados por distribuições de frequências em 31 Gates (METEK, 2009).

As potências espectrais trazem consigo um componente estocástico, devido ao grande número de alvos distribuídos aleatoriamente dentro do volume iluminado. Sendo assim, o MRR gera 150 espectros de potências independentes a cada 6 segundos e cal-

cula o espectro de potência médio. Além disso, o MRR possui um módulo de estimativa de ruído que contribui ainda mais para a qualidade de suas amostras. Em contrapartida, o MRR não é capaz de inferior os movimentos verticais durante a chuva, assim ele assume que estes movimentos são nulos (METEK, 2009).

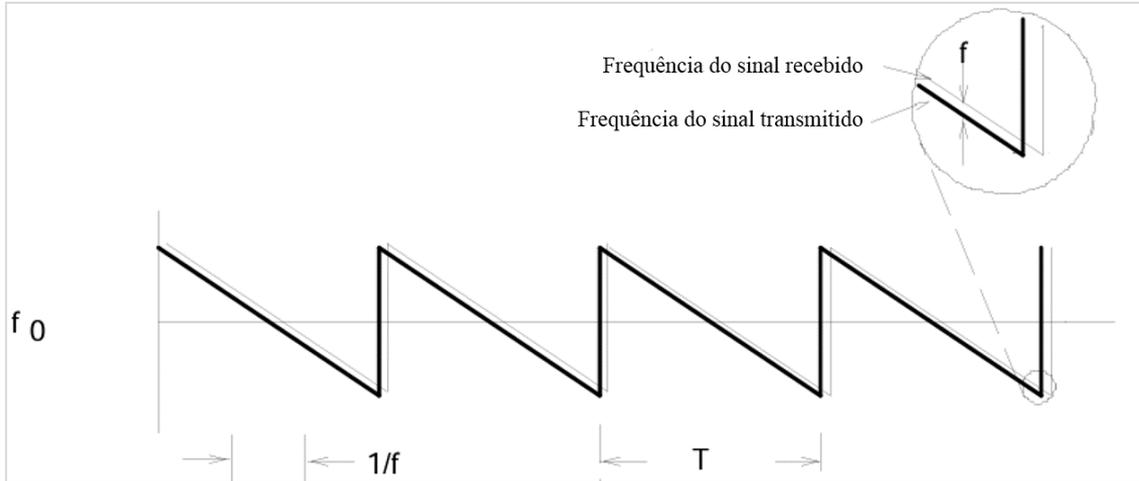


Figura 3.1 - Exemplo de duas ondas (sinal transmitido e recebido) dente de serra observadas pelo MRR para aferir a distância do alvo. Na figura T é o período da onda e f representa a frequência. Fonte: adaptado de METEK (2006).

3.2.2. Princípio Físico: Processamento dos Dados

Uma vez obtido os valores médios para uma grande distribuição de potências espectrais e para cada intervalo de distância (Gate), o MRR inicia o processo de conversão destas potências em parâmetros da chuva. Inicialmente, o espectro de potência ($f(n, i)$) para cada linha do espectro Doppler (n) e Gate (i) pode ser expresso em função da refletividade espectral $\eta(n, i)$:

$$\eta(n, i) = f(n, i)C \frac{i^2 \Delta h}{TF(i)} \quad (2.1)$$

onde $TF(i)$ é uma função de transmissão, Δh é resolução espacial e C é uma constante do radar. Para inferir as distribuições de tamanho de gota, o MRR utiliza a expressão da velocidade terminal (v) de gotas de diâmetro (D), calculada empiricamente por Gunn & Kintzer (1949) e ajustada analiticamente por Atlas et al. (1973) para incluir a correção de densidade do ar que depende da altura $\delta v(h)$:

$$\eta(D, i) = \frac{\eta(n, i) \partial v}{\Delta v \partial D'} \quad (2.2)$$

$$\Delta v = \Delta f \frac{\lambda}{2} = 0,1905 \frac{m}{s}, \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial D} = 6,18e^{-0,6D} \delta v(h), \delta v(h) = 1 + 3,810^{-5}h + 1,7110^{-9}h^2. \quad (2.4)$$

Ao normalizar a refletividade espectral ($\eta(D, i)$) pela seção transversal de retro-espalhamento ($\sigma(D)$) de uma gota de chuva de diâmetro D , obtém-se a concentração de gotas de com tamanho $D(N(D, i))$, ou seja, número de gotas por volume e diâmetro:

$$N(D, i) = \frac{\eta(D, i)}{\sigma(D)}. \quad (2.5)$$

O MRR fornece a concentração de gotas separadas em 64 classes de tamanho de diâmetro (0,246 - 5,03 mm) e em 31 níveis de altura (200 - 6400 m). A partir de $N(D, i)$ é calculada a refletividade (Z , em dBZ), a taxa de precipitação (R , em mm/h) e o conteúdo de água líquida (LWC , do inglês, *Liquid Water Content*, em g/m³):

$$Z = \int_0^{\infty} N(D)D^6 dD, \quad (2.6)$$

$$R = \frac{\pi}{6} \int_0^{\infty} N(D)D^3(v(D) - \omega) dD, \omega = 0 \quad (2.7)$$

$$LWC = \rho_w \frac{\pi}{6} \int_0^{\infty} N(D)D^3 dD, \quad (2.8)$$

sendo ρ_w a densidade da água, ω a velocidade do movimento vertical.

Como já mencionado, o MRR assume que durante a chuva não há a existência de movimentos verticais. Por esse motivo, algumas DSDs podem ser totalmente distintas da realidade, ocasionando um erro grosseiro durante as análises. Desta forma, é imprescindível que as medidas do MRR passem por algum controle de qualidade. Por exemplo, Tridon et al. (2011) desenvolveram um método para identificar o efeito das correntes descendentes e ascendentes na DSD. Este método se baseia na descontinuidade apresentada no espectro de refletividade em diversas alturas consecutivas. Uma descrição detalhada deste método pode ser encontrada na dissertação de mestrado de dos Santos, 2017.

Para evitar ao máximo a utilização de DSDs com possíveis erros e focalizar as análises para somente próximo da superfície, este trabalho optou-se por utilizar as DSDs

referentes ao nível de 400 m acima do MRR (segundo Gate). Apesar disso, foi mantida a aplicação de um método de controle dos dados. Este método foi baseado na comparação das medidas do acumulado diário de precipitação (ADP, em mm) entre o MRR e dois pluviômetros automáticos presentes na região de estudo (item 4.1).

3.3. REDE DE DETECÇÃO DE DESCARGAS ELÉTRICAS

Os dados de descargas elétricas utilizados neste estudo foram detectados pela rede LINET (*Lightning Detection Network*) (Beltz et al., 2009) instalada no Brasil (Morales et al., 2016; Morales, 2017), Figura 3.5b. A LINET utiliza um par de antenas ortogonais que medem o campo magnético gerado por uma descarga atmosférica na faixa de frequência do VLF/LF. As formas de onda do campo magnético são sincronizadas temporalmente pelo relógio de um GPS (do inglês, *Global Positioning System*) a uma taxa de 1 MHz. A LINET utiliza o método de tempo de chegada em três dimensões (3D TOA, do inglês, *Time of Arrival*) para localizar as descargas elétricas a partir de 4 antenas. Além da posição de origem das descargas elétricas, esta tecnologia distingue as descargas elétricas IC (do inglês, *Intra-Cloud*) e CG (*Cloud-to-Ground*), e infere a altitude das emissões IC, a polaridade e o pico de corrente elétrica. De acordo com Betz et al. (2009) a LINET tem uma eficiência de detecção de descargas elétricas superior à 90% e precisão melhor que 500 metros.

Para este estudo, foram utilizados apenas a localização das descargas elétricas (latitude e longitude) e o horário da ocorrência (tempo UTC).

3.4. PLUVIÔMETROS

Nesta pesquisa, foram utilizados os dados pluviométricos de dois pluviômetros automáticos, independentes e instalados em dois pontos distintos dentro do campus da USP na cidade de São Paulo. O primeiro pluviômetro pertence ao Laboratório de Micrometeorologia (LabMicro) do IAG e o segundo pluviômetro faz parte da estação meteorológica automática, pertencente ao Laboratório de Climatologia e Biogeografia do Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas (FFLCH). Foram obtidos todo o conjunto de dados diários disponíveis, destas duas fontes, para o período de dezembro de 2015 a março de 2020. Os dados correspondem a

acumulações de chuva (em mm de chuva) medidos a cada 5 min.

Ambos os pluviômetros estão localizados próximos ao MRR, sendo o pluviômetro do LabMicro no mesmo local e o pluviômetro da FFLCH a aproximadamente 1200 m de distância do MRR. O mapa da Figura 3.6 mostra o local exato dos instrumentos. Todo este conjunto de dados pluviométricos foi utilizado para avaliar e validar as medidas do MRR. A metodologia empregada e os resultados desta validação são apresentados no capítulo 4.1.

3.5. FIELD DE MILL

Medidas de campo elétrico em superfície foram coletadas por sensores de campo elétrico (field mill) instalados no mesmo local que o MRR. Este sensor foi produzido pela empresa Campbell Scientific, modelo CS110. Sensores como este são do tipo obturador alternado, possuindo uma taxa de amostragem de 1Hz.

O campo elétrico é uma quantidade vetorial, tendo tanto uma magnitude (intensidade do campo) quanto uma direção (direção da força exercida sobre uma carga de teste positiva). As unidades de campo elétrico são Newtons/Coulomb, que são equivalentes às unidades mais comumente expressas de Volt/metro (V/m). A magnitude do campo elétrico é equivalente ao gradiente de potencial (tensão).

Como grandes quantidades de cargas elétricas separadas estão associadas a tempestades, a componente vertical do campo elétrico atmosférico na superfície da Terra é útil para estudar nuvens eletrificadas e para alerta de descargas elétricas.

Em um dia claro (tempo bom), existe um número relativamente pequeno de íons positivos na atmosfera que dão origem a um campo elétrico da ordem de -100 a -200 V/m. O campo elétrico local durante um período de tempo bom de 24 horas medido com um medidor de campo elétrico CS110 é ilustrado na Figura 3.2.

A presença de nuvens carregadas resulta em aumentos significativos na magnitude do campo elétrico local em comparação com campos de tempo bom, com o sinal indicando a polaridade de carga dominante. A Figura 3.4 mostra a eletricidade atmosférica local durante uma tempestade local. Desvio e retorno às condições de campo de bom tempo são observados no início e no final desta tempestade. A mudança abrupta do

campo elétrico observada aproximadamente às 6h12 foi devido a uma descarga elétrica nuvem-solo observada na proximidade do medidor de campo elétrico.

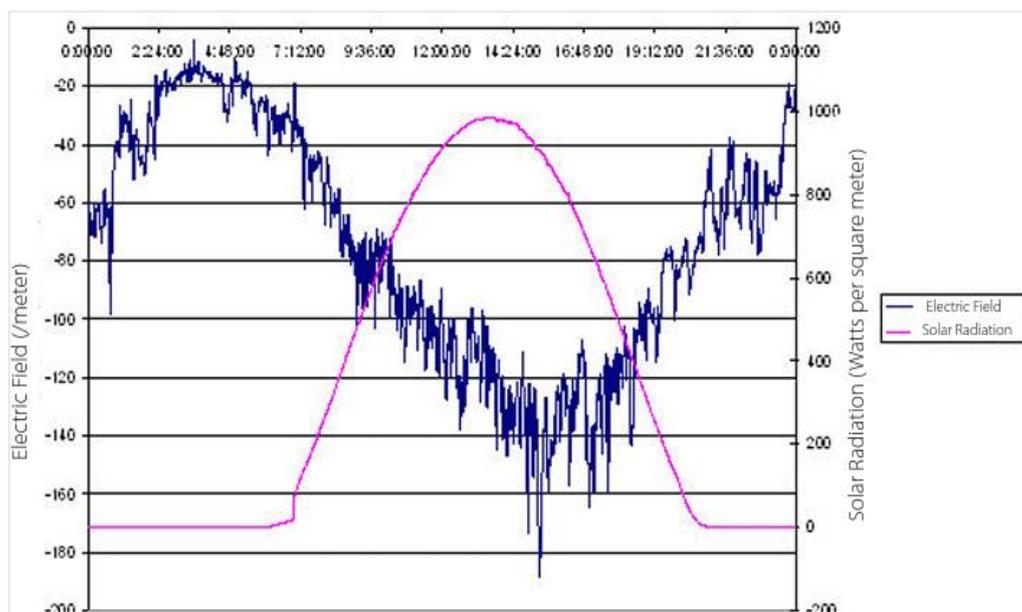


Figura 3.3 - Campo elétrico medido com CS110 durante um período de 24 horas de bom tempo, na região de Logan, Utah, em 27 de julho de 2005. Fonte: Campbell, 2017.

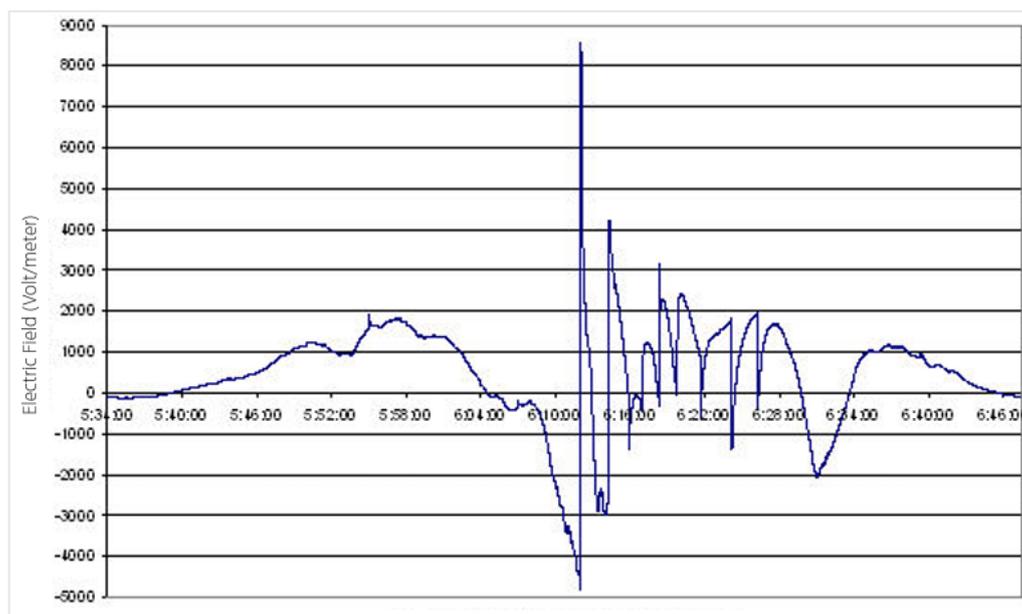


Figura 3.4 - Campo elétrico atmosférico monitorado por um CS110 durante uma tempestade local, na região de Logan, Utah, em 2 de agosto de 2005. Fonte: Campbell, 2017.

Para este estudo, as medidas de campo elétrico foram utilizadas para classificar os intervalos de chuva, com descargas elétricas associadas, de acordo com os centros de cargas dentro das tempestades (item 4.5).

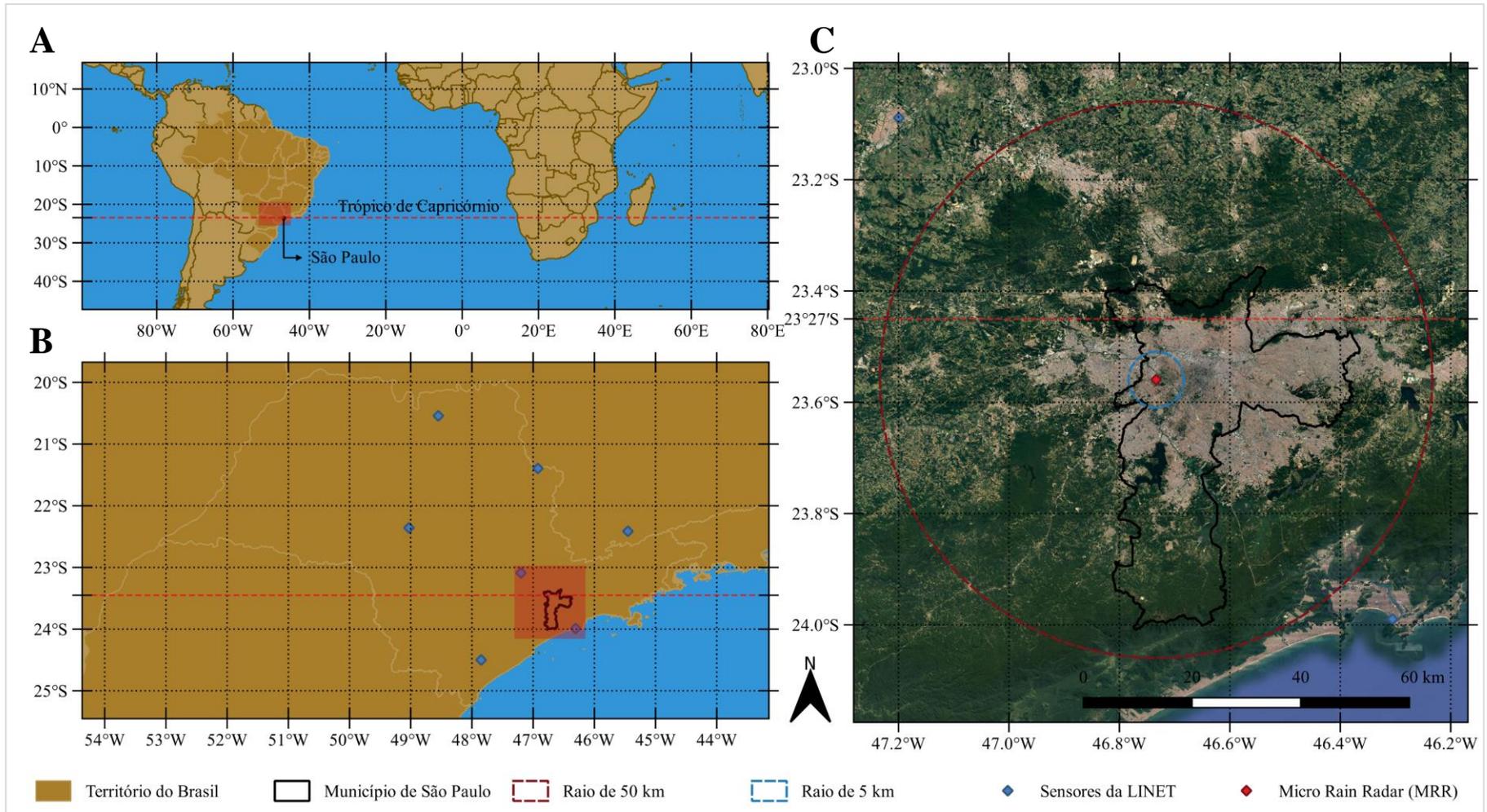


Figura 3.5 - Mapa da região de estudo: (a) mapa mostrando a posição latitudinal da região estudada, (b) município de São Paulo (contornos em preto) e localização dos sensores da LINET (losangos azuis) e (c) região do município de São Paulo (contornos em preto).

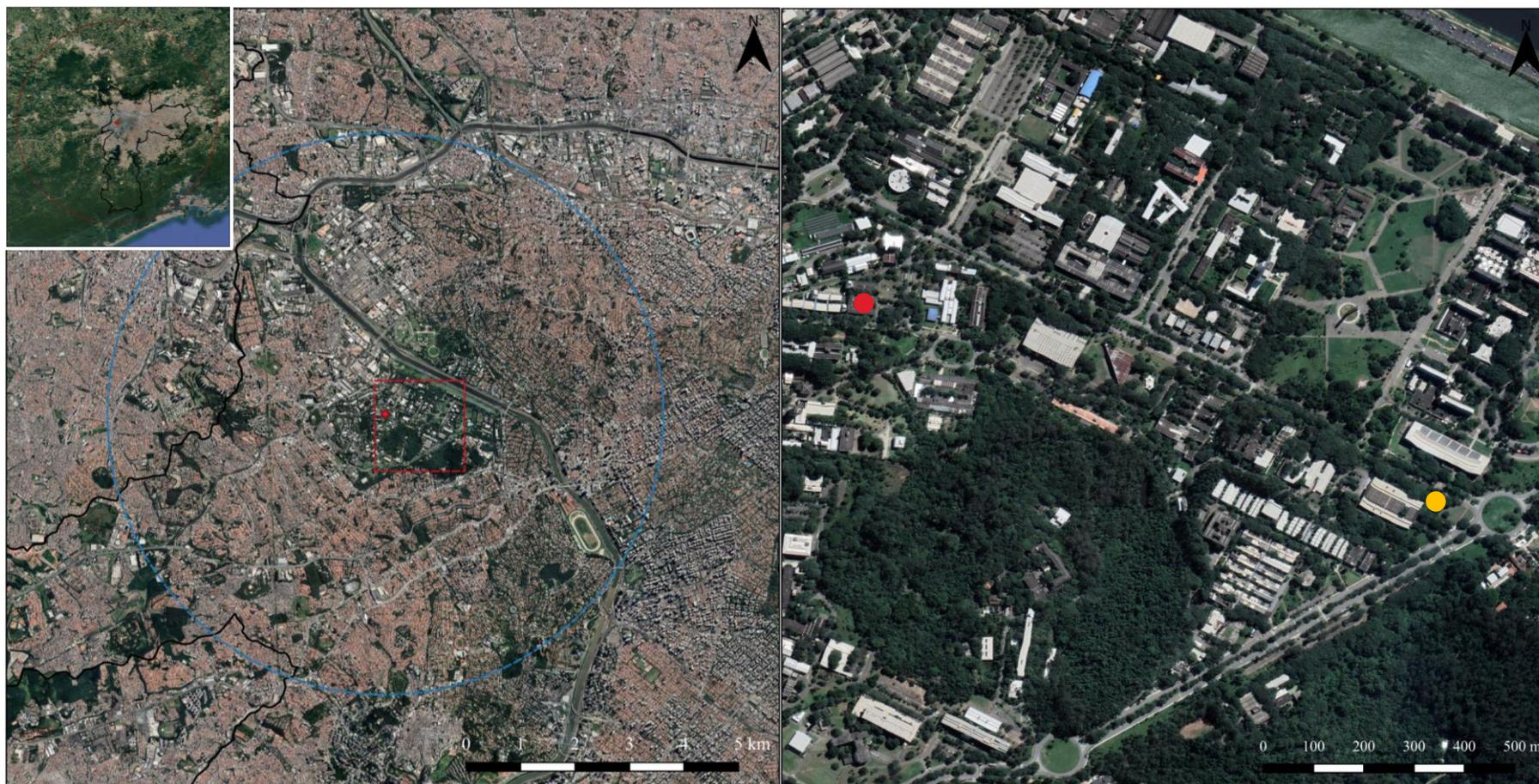


Figura 3.6 - Mapa com a localizações do MRR e o pluviômetro do LabMicro (ponto vermelho) e o pluviômetro da FFLCH (ponto amarelo). Fonte: Google (2021).

4. METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentado a metodologia adotada para a o controle de qualidade do MRR (item 4.1), a identificação dos eventos de chuva associados a tempestades com e sem descargas elétricas (item 4.2), a classificação dos intervalos de chuva de acordo com a severidade das tempestades (taxa de descargas elétricas) (item 4.3) e medidas de campo elétrico em superfície (item 4.4). Por fim, o item 4.5 descreve algumas informações sobre cada conjunto de eventos e intervalos de chuva, e o item 4.6 detalha as variáveis analisadas neste estudo.

4.1. CONTROLE DE QUALIDADE DO MRR

As medidas da DSD coletadas pelo MRR são a base desta pesquisa para o entendimento das características da chuva que se formam ou se deslocam sobre a RMSP. E como qualquer outro tipo de dado, requer um controle de qualidade, pois, dependendo das condições do instrumento (manutenção, calibração e etc), influência de fatores externos (ventos fortes, chuvas torrenciais e etc) e físicas (atenuação), as medidas podem ser afetadas. Sabendo-se das limitações que o MRR apresenta ao inferir as propriedades do perfil vertical de chuva (atenuação e ação das correstes descentes), é de se esperar que as medidas podem conter erros. Ao invés de aplicar as correções sugeridas por Tridon et al. (2011), para este estudo optou-se por comparar as medidas do MRR com 2 pluviômetros automáticos e independentes, a fim de selecionar os dias em que, por algum motivo, apresentaram valores muito discordantes no acumulado de chuva.

A identificação dos dias com erros foi baseada na comparação do total diário de precipitação. Basicamente as medidas de taxa de precipitação do MRR (R , em mm/h) e precipitação acumulada (PA) em 5 min (pluviômetros) foram convertidas para acumulado diário de precipitação (ADP) da seguinte forma:

$$(a) \quad ADP_{MRR} = \sum R \Delta t [mm], \quad \Delta t = 10 s \quad (3.1)$$

$$(b) \quad ADP_{Pluviômetros} = \sum PA [mm], \quad (3.2)$$

sendo R a taxa de precipitação (mm/s), Δt a resolução temporal (10 s) e PA a precipitação acumulada em 5 min.

O objetivo da utilização de dois pluviômetros automáticos e independentes na comparação e validação das medidas do MRR foi tornar esta análise mais confiável, já que até mesmo as medidas dos pluviômetros podem conter erros. Logo, nesta validação, foi assumido que as medidas do MRR sem erros seriam aquelas cuja o valor do ADP fosse próximo de ao menos um pluviômetro, pois, um dos pluviômetros poderia estar apresentando erros na medição, ou na melhor das hipóteses, próxima dos dois pluviômetros. Caso o MRR tivesse erros, a ADP seria diferente dos 2 pluviômetros. Para analisar a diferença entre o MRR e os pluviômetros, foram calculados (a) o erro absoluto percentual (ERRO, em %) e (b) a diferença absoluta (DA) dado pelas seguintes fórmulas:

$$ERRO = \frac{|ADP_{Pluviômetro} - ADP_{MRR}|}{ADP_{MRR}} 100 [\%] \quad (3.3)$$

$$DA = |ADP_{Pluviômetro} - ADP_{MRR}| [mm] \quad (3.4)$$

Logo, uma observação aceitável do MRR, seria aquela cujo valor para o ERRO e a DA forem próximos de zero. Entretanto, certos cuidados foram tomados, já que uma amostra com ERRO alto ($> 20\%$) pode apresentar uma DA baixa (< 2 mm), e o equilíbrio entre estes dois parâmetros se torna o mais ideal para se analisar todo o conjunto amostral. A próxima seção apresenta os resultados desta comparação.

4.1.1. Análise do Acumulado Diário de Precipitação

Nesta validação, com base nas observações do MRR, as amostras diárias com ADP menores que 1 mm não foram analisadas. Sendo assim, foram comparadas 278 amostras diárias de chuva.

A Figura 4.0 mostra a comparação do ADP entre os pluviômetros LabMicro e FFLCH para as 278 amostras diárias. Nota-se que o pluviômetro LabMicro apresentou de forma mais significativa, os maiores valores de ADP. De qualquer modo, os coefici-

entes de determinação e correlação de Pearson, indicam uma correspondência satisfatória entre os dois instrumentos.

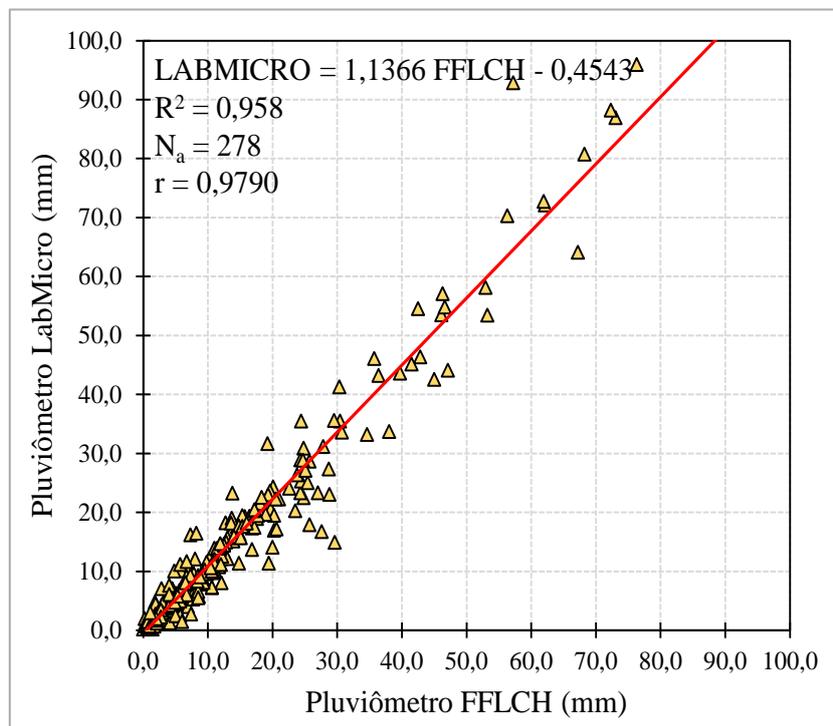


Figura 4.0 - Diagrama de dispersão e reta de regressão para o ADP medidos pelos pluviômetros LabMicro FFLCH. Nos diagramas está informado a equação de regressão, a quantidade de amostras (N_a), o coeficiente de determinação (R^2) e o coeficiente de correlação Pearson (r).

A Figura 4.1 apresenta o diagrama de dispersão comparando a chuva diária observada pelo MRR e o pelos pluviômetros (a) LabMicro e (b) FFLCH. Nota-se que (Figura 4.1a) existem amostras que apresentaram diferenças significativas (DA maior que 10 mm). A reta de regressão, indica que a chuva acumulada é maior para o pluviômetro LabMicro, e apresenta um ERRO médio de 35%.

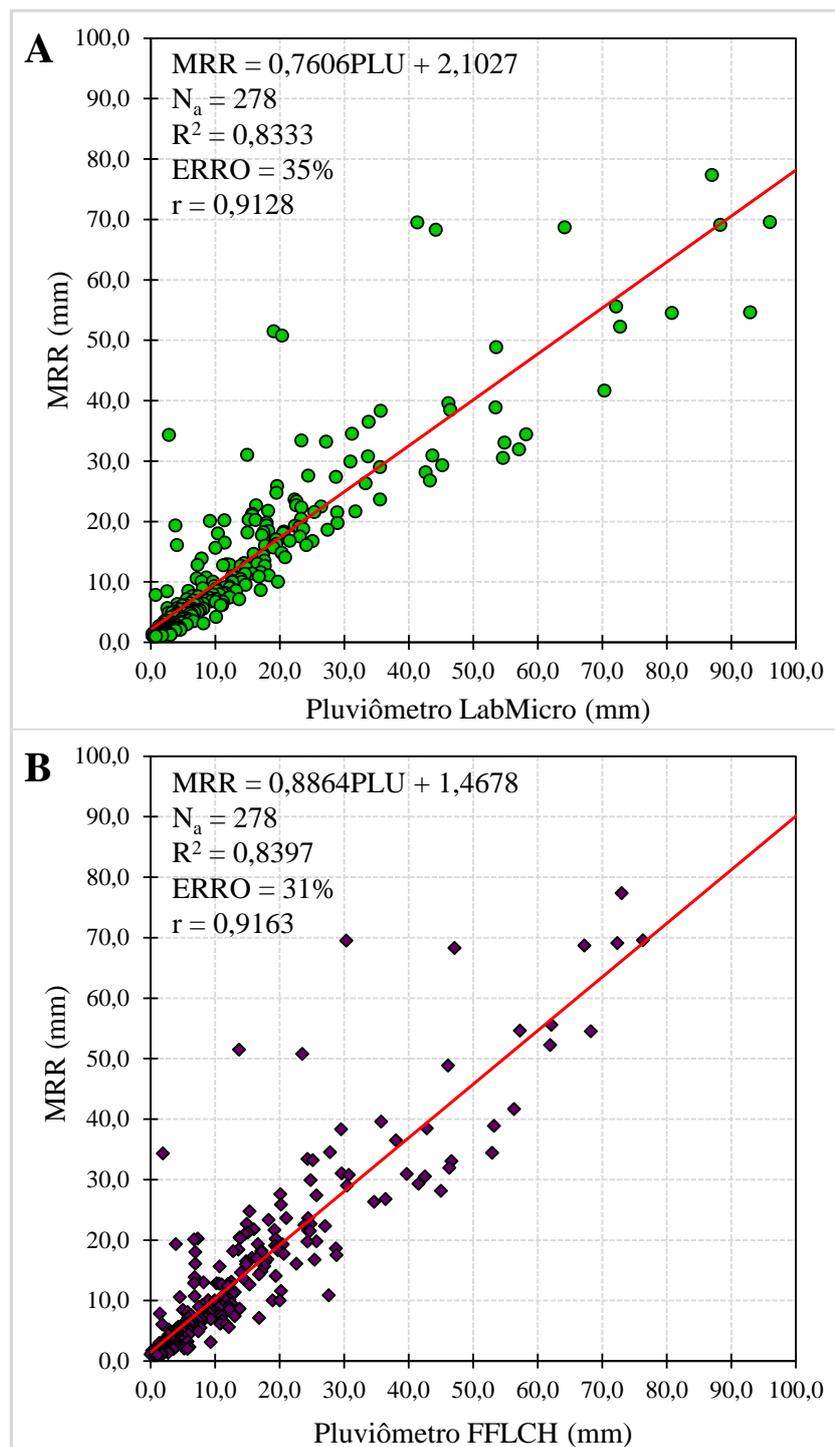


Figura 4.1 - Diagramas de dispersão e reta de regressão para o ADP medidos pelo MRR e os pluviômetros (a) LabMicro e (b) FFLCH. Nos diagramas está informado a equação de regressão, a quantidade de amostras (N_a), o coeficiente de determinação (R^2), o ERRO e o coeficiente de correlação Pearson (r).

Na comparação entre o MRR e o pluviômetro FFLCH (Figura 4.1b) também se observa amostras com diferenças significativas (DA maior que 10 mm), no entanto, pela reta de regressão, se nota uma melhor correspondência com relação ao pluviômetro LabMicro. Como resultado, o ERRO médio foi um pouco menor (31%).

A Figura 4.1 indica que se levado em consideração apenas um pluviômetro, certas amostras não teriam uma boa correspondência, mas que não necessariamente poderiam conter erros por parte do MRR. O erro neste caso poderia ter ocorrido no pluviômetro para aquela amostra específica. A partir desta hipótese, a Figura 4.2 apresenta a comparação combinada entre o MRR e os pluviômetros utilizando o valor de ADP com a diferença absoluta com relação ao MRR. Nota-se uma melhora na comparação, sendo que o ERRO médio é reduzido para (23%). Apesar desta melhora, algumas amostras ainda apresentam DA elevados (maiores que 10 mm).

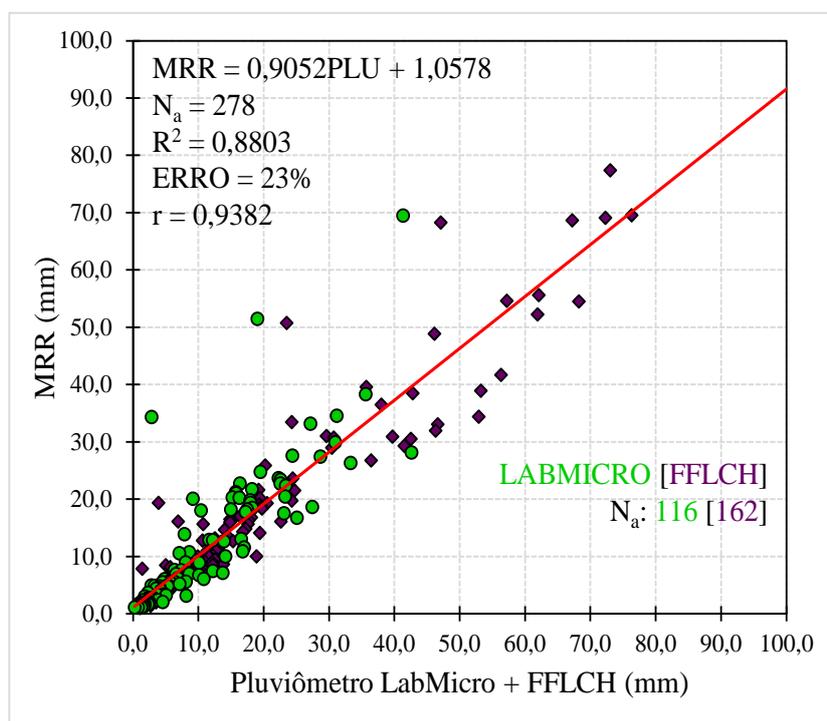


Figura 4.2 - Similar a Figura 3.1, porém, este diagrama combina as medições dos pluviômetros LabMicro (círculos verdes) FFLCH (losangos roxos).

A Figura 4.3 apresenta um histograma de frequência relativa e frequência acumulativa da diferença absoluta e o erro percentual entre o MRR e o pluviômetro, seja ele o pluviômetro LabMicro ou FFLCH. Percebe-se que aproximadamente 47% das amostras apresentam uma diferença absoluta inferior a 1 mm. Para uma DA de 2 mm, o montante corresponde a 68%. Por fim, 16% das amostras apresentaram uma diferença absoluta superior a 5 mm. Este resultado reforça uma correspondência satisfatória quando combinado as observações dos pluviômetros LabMicro e FFLCH.

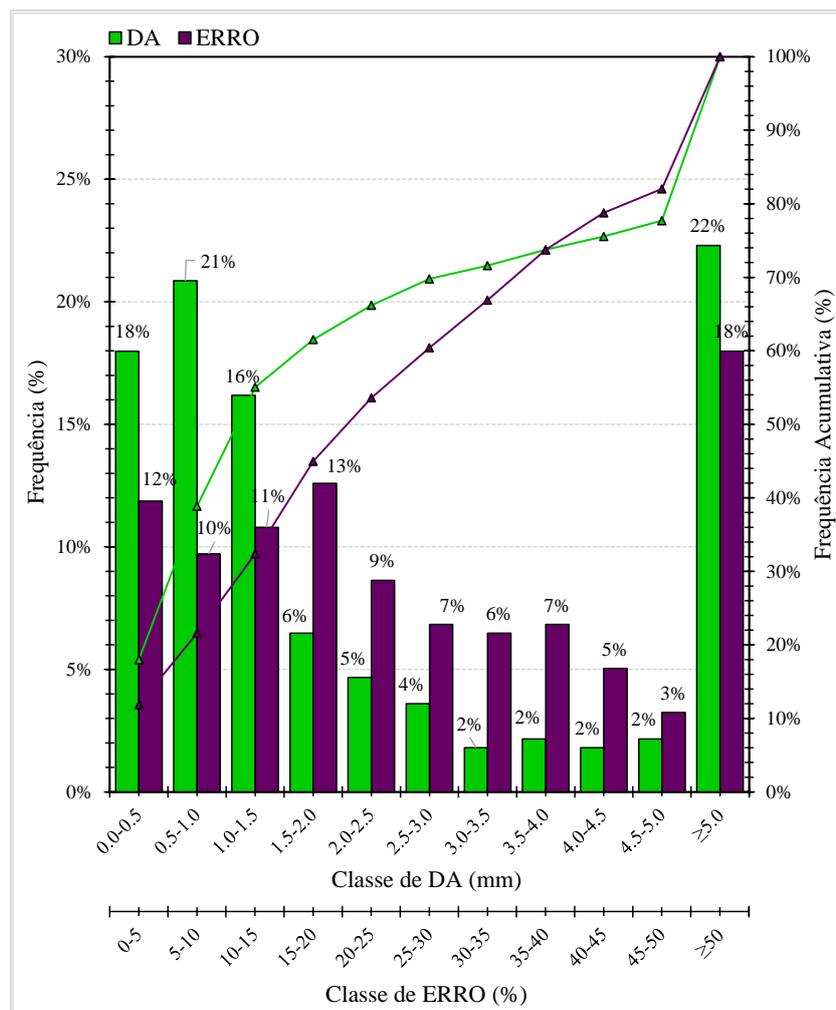


Figura 4.3 - Histograma de frequência relativa e frequência acumulativa da diferença absoluta (DA, barras e linhas em azul) e o erro percentual (ERRO, barras e linhas em verde) entre o MRR e os pluviômetros LabMicro e FFLCH.

Ainda na Figura 4.3, verifica-se que 57% das amostras apresentam um ERRO inferior a 20%, e 71% menor que 30%. Este resultado confirma uma correspondência satisfatória entre as medidas do MRR e dos pluviômetros. Em contrapartida, 22% das amostras apresentam um ERRO acima de 50%, podendo indicar erros na inferência da chuva. Por exemplo, as Figuras 4.4 e 4.5 mostram a evolução temporal da chuva para os dias 01 de novembro de 2019 e 10 de dezembro de 2019, respectivamente. Para estes dois exemplos, o volume de chuva observado pelo MRR difere entre os pluviômetros. No primeiro exemplo (Figura 4.5), durante a ocorrência da chuva, o MRR apresentou grandes acumulados de chuva e que não corroboram com as medidas dos pluviômetros, por exemplo: 18h00min, 18h10min, 18h20min e 18h30min. Nestes períodos que foram observados uma superestimativa, o MRR pode ter sofrido com a ação das correntes descendentes, resultando em uma superestimativa no tamanho das gotas de chuva ou mesmo uma correção de atenuação.

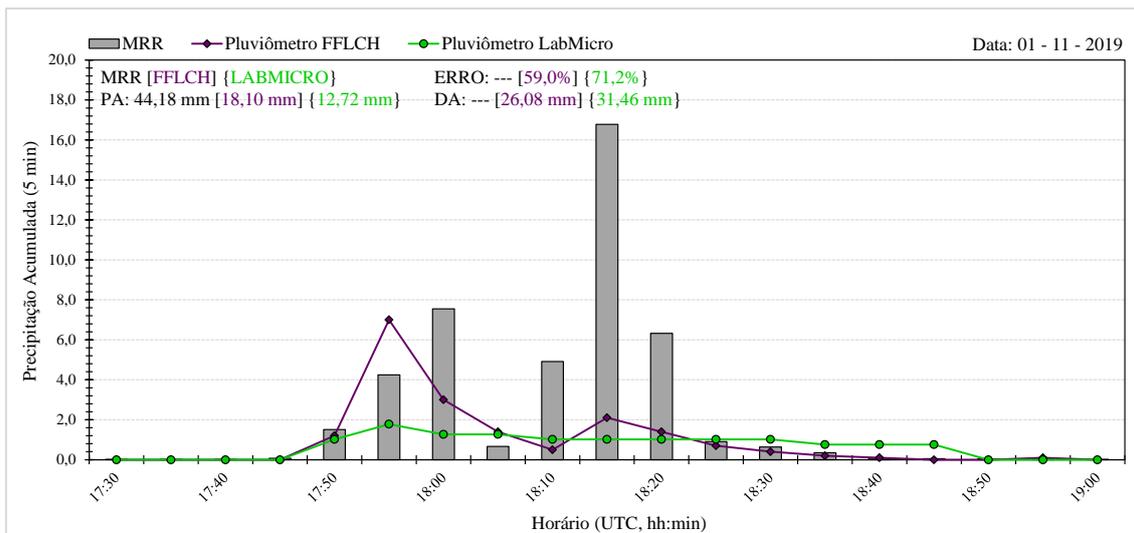


Figura 4.4 - Evolução da chuva (PA a cada 5 min) para o evento ocorrido no dia 01 de novembro de 2019, observados realizadas pelo MRR (barras em cinza), pluviômetro LabMicro (linhas com marcadores em verde) e o pluviômetro FFLCH (linhas com marcadores em roxo). No gráfico está informado a precipitação acumulada total durante a chuva (PA), a DA e o ERRO, com relação ao MRR, para os dois pluviômetros.

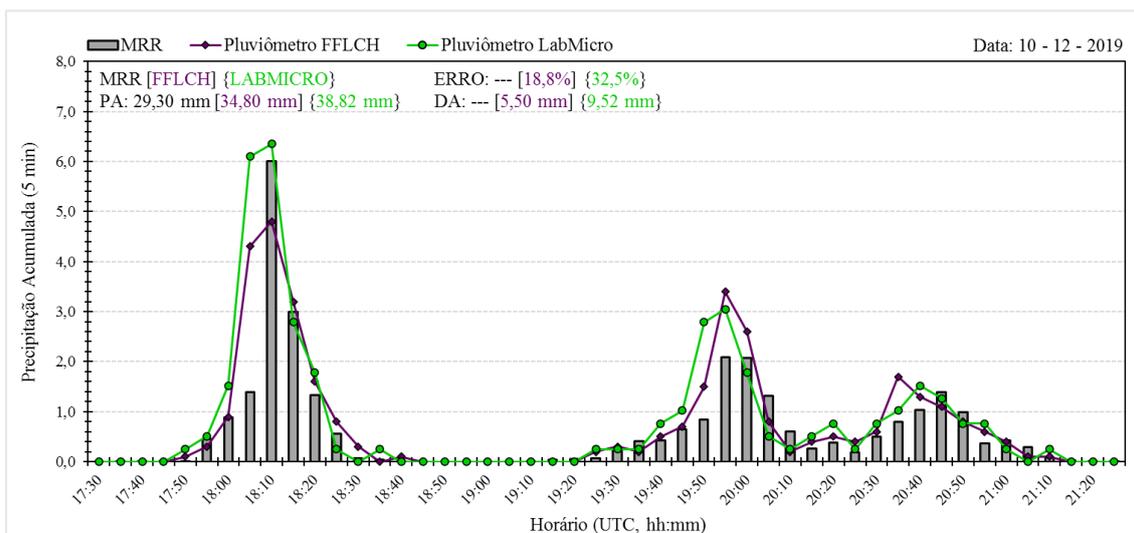


Figura 4.5 - Similar a Figura 4.4, porém para o dia 10 de dezembro de 2019.

No segundo exemplo (Figura 4.5), o MRR apresentou um acumulado de chuva inferior aos observados pelos pluviômetros, e analisando a evolução temporal da chuva, também é possível notar alguns momentos em que as medidas do MRR não são similares com as medidas dos pluviômetros, como por exemplo: 18h05min, 19h50min e 19h55min. Nestes períodos, uma chuva torrencial pode ter causado uma atenuação significativa do sinal do MRR, resultando em subestimativa na concentração e tamanho das gotas de chuva. Estes dois exemplos mostram os tipos de erros que estão presentes em algumas observações do MRR.

Para os dois casos citados anteriormente, tanto a diferença absoluta quanto o erro absoluto percentual, possuíam valores elevados e acusavam um possível problema com estas amostras. Diante do exposto e com base em uma análise minuciosa dos 278 acumulados diários de chuva (amostras), foi definido que, para uma amostra diária ser considerada satisfatória e com pouca possibilidade de conter erros, a amostra diária não poderia ter uma diferença absoluta maior que 4 mm e um ERRO maior que 40%. Estes limiares garantiram uma quantidade significativa de amostras, já que um limiar mais “rígido” poderia reduzir demais a quantidade de amostras e um limiar mais “leve”, poderia comprometer a qualidade. Dessa maneira, do total inicial de 278 amostras, 80 foram descartadas e 198 estavam dentre as condições definidas. A próxima seção apresenta a comparação entre o MRR e os pluviômetros apenas para as amostras que passaram pelo controle de qualidade estabelecido anteriormente.

4.1.2. Pós Controle de Qualidade dos Dados

A Figura 4.6 mostra a comparação dos acumulados diários, entre o MRR e os pluviômetros, para os 198 dias remanescente do controle de qualidade.

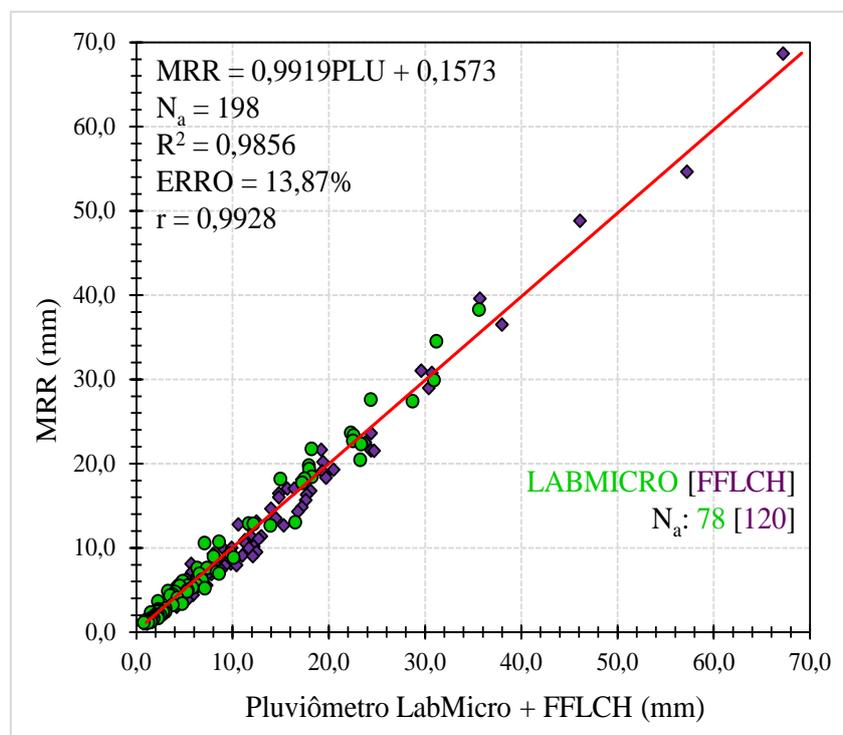


Figura 4.6 - Diagrama de dispersão e reta de regressão para o ADP medidos pelo MRR e os pluviômetros LabMicro (círculos verdes) FFLCH (losangos roxos), para os dias que passaram pelo controle de qualidade. No diagrama está informado a equação de regressão, a quantidade de amostras (N_a), o coeficiente de

determinação (R^2), o ERRO e o coeficiente de correlação Pearson (r).

Observa-se que o ERRO médio agora é de apenas 13,87%, e tanto a reta de regressão como os demais parâmetros indicam a boa concordância que há entre estas amostras restantes.

A Figura 4.7 apresenta o histograma de frequência relativa e frequência acumulativa para a DA e o ERRO, entre o MRR e os pluviômetros, para as 198 amostras. Observa-se que 94% das amostras apresentam uma DA menor que 3 mm (Figura 4.8). Nota-se também que 86% das amostras apresentam um ERRO inferior a 20%. Dessa forma é possível atestar que este conjunto de dados diários possui uma possibilidade menor de conter erros.

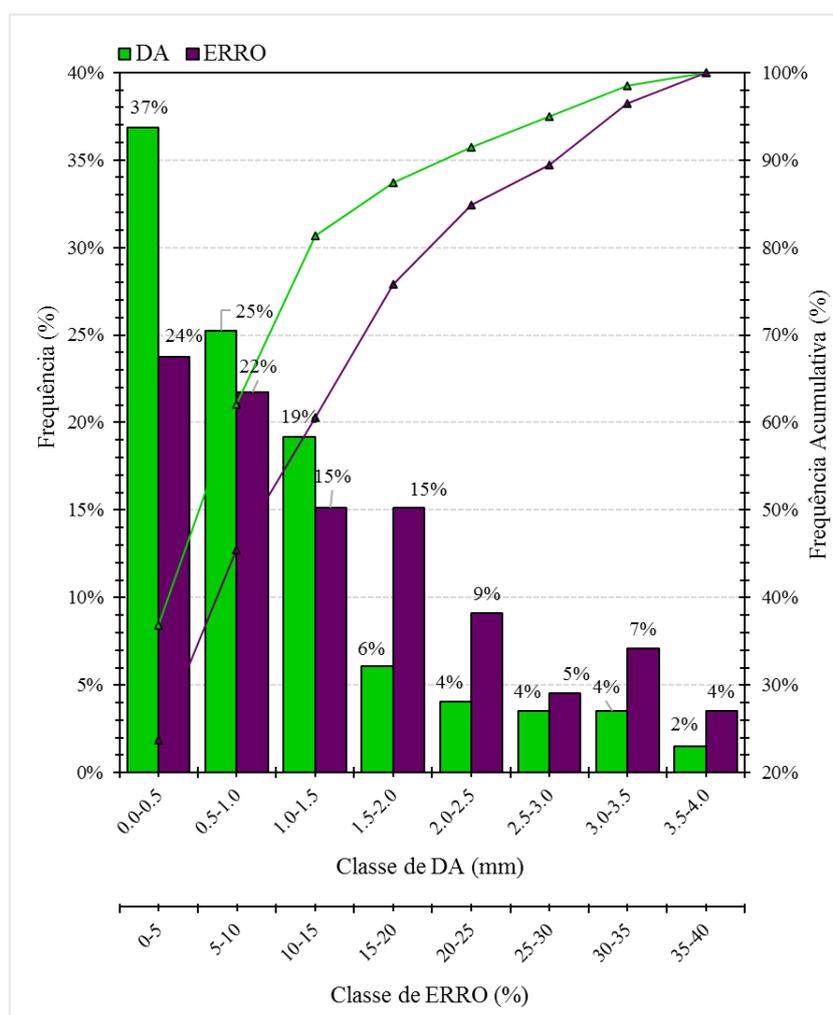


Figura 4.7 - Histograma de frequência relativa e frequência relativa acumulada da diferença absoluta (DA, barras e linhas em azul) e o erro percentual (ERRO, barras e linhas em vermelho) entre o MRR e os pluviômetros LabMicro e FFLCH, para os dias que passaram pelo controle de qualidade.

Para ilustrar esta concordância, a Figura 4.8 mostra a evolução temporal da chu-

va para o evento de precipitação ocorrido no dia 30 de dezembro de 2017. Nesta amostra é possível notar que as medidas do MRR e dos pluviômetros apresentam uma boa correlação, sendo coincidentes nos momentos de alto e baixo volume de chuva. A precipitação acumulada (PA) entre as 2h55min e 5h45min foi de 13,3 mm para o MRR, 11,4 mm para o pluviômetro FFLCH e 12,1 mm para o pluviômetro LabMicro.

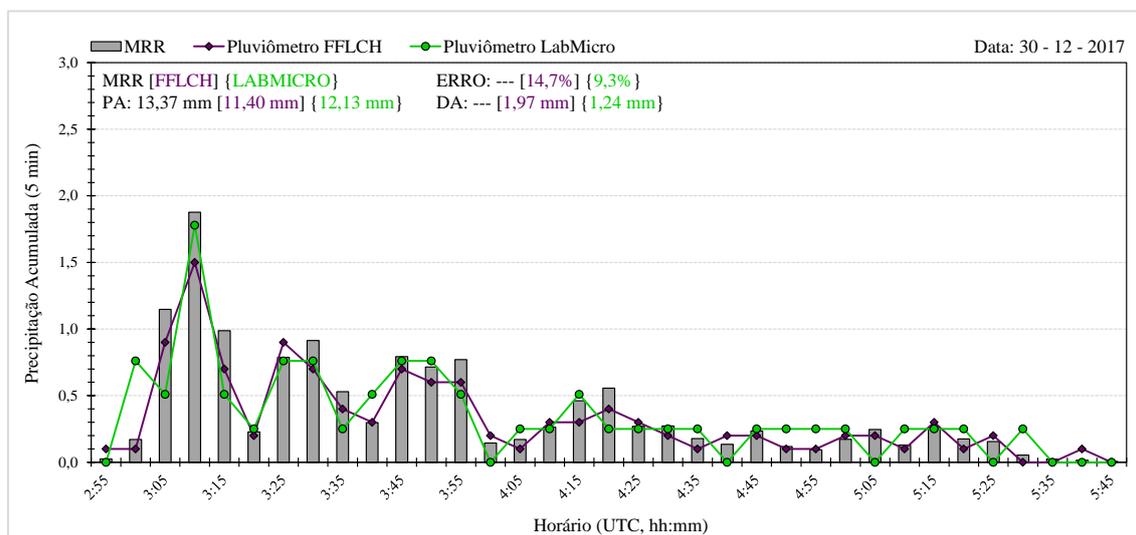


Figura 4.8 - Similar a Figura 4.5, porém, para o dia 30 de dezembro de 2017.

4.2. IDENTIFICAÇÃO DOS EVENTOS DE CHUVA

Para cada uma das 198 observações diárias do MRR, foi extraído a série temporal da taxa de precipitação, com resolução de 10 segundos (dados do MRR) e, minuciosamente, foram identificados a ocorrência da chuva e o período de duração da precipitação. A partir desta análise, foram identificados 217 eventos de chuva, com duração de poucos minutos a algumas horas. Deste total, 38 eventos foram excluídos, pois, o MRR operou com uma resolução espacial diferente (75 m), o que poderia alterar as análises.

A seguir, dos 179 eventos de chuva remanescentes, foi verificado se cada evento de chuva contava com observações de descargas atmosféricas (observações da LINET), afim de separar os eventos de chuva associados com tempestades que produziram descargas elétricas, das que não produziram. Deste conjunto, 43 eventos de chuva foram descartados pois, a rede LINET não estava operando. Ao final do passo anterior, concluiu-se a identificação inicial de eventos de chuva, que foram observados com a mesma resolução espacial do MRR (200 m) e que também continham medidas de descargas atmosféricas, que resultara em 136 eventos de chuva.

4.2.1 Tempestades Com e Sem Descargas elétricas

O passo seguinte foi separar os eventos de chuva associados com tempestades com e sem descargas elétricas observados. O critério adotado foi o seguinte: se durante o período da chuva foi observado ao menos uma ocorrência de raio a uma distância de 50 km do MRR, aquela amostra de chuva seria associada com tempestades com descargas elétricas, caso contrário, seria associado com tempestades sem descargas elétricas. Este método resultou em 85 eventos de chuva com descargas elétricas observados e 51 eventos de chuva sem descargas elétricas observados.

Apesar da utilização deste método, um evento de chuva poderia não estar associado com uma tempestade que produziu descargas elétricas e mesmo assim possuir observações de descargas elétricas dentro do perímetro delimitado (50 km de distância ao radar). Um exemplo possível seria a presença de várias tempestades isoladas, com características físicas e dinâmicas diferentes. Perante o exposto, e adotando o mesmo critério que Muijar et al. (2018), somente foram mantidos os eventos de chuva associados com descargas elétricas, com ao menos uma ocorrência de raio próxima ao MRR (raio de 5 km de distância). A Figura 4.9 ilustra os procedimentos adotados para a identificação e seleção dos eventos de chuva.

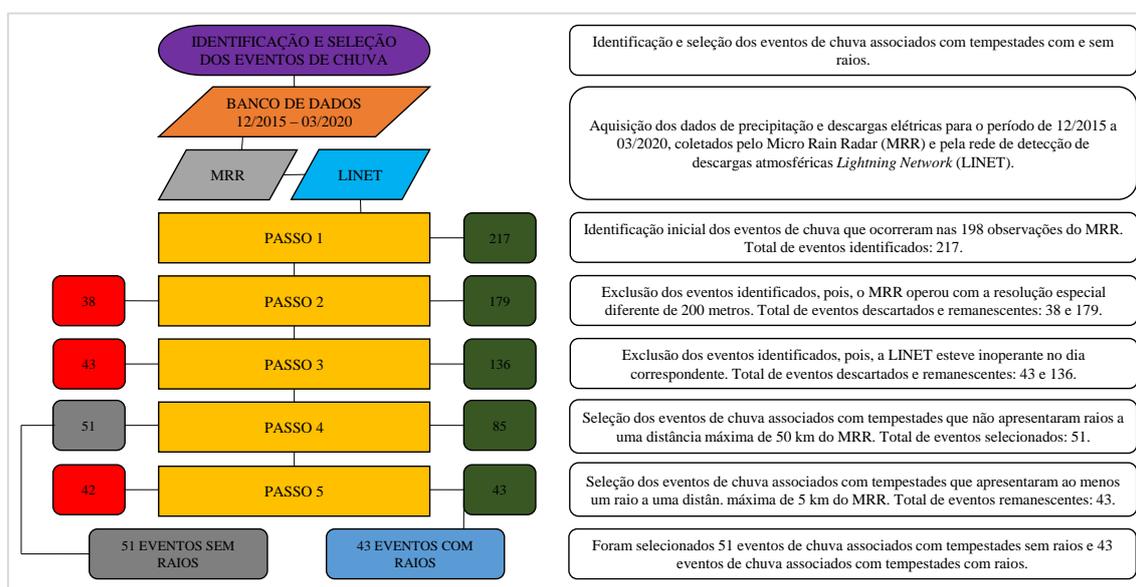


Figura 4.9 - Esquema ilustrativo, mostrando e descrevendo de maneira direta, os passos seguidos e executados para a seleção dos eventos de chuva associados com tempestades com descargas elétricas (raios) e sem descargas elétricas.

A partir desta metodologia foram identificados 51 eventos associados com tempestades sem descargas elétricas, e 43 eventos associados com tempestades com descar-

gas elétricas. Os capítulos seguintes descrevem como estes eventos de chuva foram classificados de acordo com a atividade de descargas elétricas e observações do campo elétrico em superfície.

4.3. ESTÁGIOS DA ATIVIDADE ELÉTRICA DAS TEMPESTADES

Para os 43 eventos de chuva associados com tempestades com descargas elétricas, o intervalo de precipitação foi classificado de acordo com a atividade elétrica destas tempestades durante o seu ciclo de vida. O objetivo desta análise foi investigar como a DSD varia em função da atividade elétrica das tempestades, e assim avaliar se é possível observar variações nos hidrometeoros em função do carregamento elétrico, já que as descargas elétricas estão ligadas com a eletrificação ou transferência de cargas (Saunders et al, 2011). Através da evolução temporal das descargas elétricas observados (acumulado em 1 min) a uma distância máxima de 50 km, durante todo o dia do evento, foi possível classificar a atividade elétrica das tempestades em três estágios: estágio 1 (desenvolvimento), estágio 2 (maduro) e estágio 3 (decaimento). Para evitar uma análise subjetiva com relação ao momento inicial e final de um estágio, foram adotados os seguintes critérios:

- O tempo final (inicial) do estágio 1 (2) seria quando a média móvel de 3 minutos fosse igual ou superior a 60% do valor da maior média móvel de 3 minutos durante toda série;
- O tempo final (inicial) do estágio 2 (3) seria quando a média móvel de 3 minutos fosse igual ou inferior a 60% do valor da maior média móvel de 3 minutos durante toda série e que a mesma apresentasse uma tendência de queda no número de descargas elétricas observados.

A utilização da média móvel de 3 min foi necessária para remover altas frequências de atividade de descargas elétricas. Já a aplicação do limiar de 60% do valor da maior média móvel de 3 minutos, foi escolhida pelo fato de apresentar uma melhor coincidência entre o momento de ascensão e declínio da atividade de descargas elétricas.

A Figura 4.10 mostra a aplicação desta metodologia para a tempestade do dia 22

de dezembro de 2015³. Nota-se que os três estágios puderam ser perfeitamente identificados (quadrantes 1, 2 e 3). Neste caso, o limiar de 60% da maior média móvel de 3 minutos (80,33 descargas elétricas por minuto) foi o valor de 48,20 descargas elétricas por minuto. Neste exemplo, a chuva observada pelo MRR ocorreu entre as 20h10min e 21h40min. Para este evento a chuva teve um intervalo classificada como estágio 2 (20h10min e 20h55min) e outra como estágio 3 (20h55min e 21h40min).

Por fim, 14 eventos de chuva não foram classificados, pois, a evolução das descargas elétricas não apresentou uma forma “unimodal”, o que poderia contaminar as amostras. Sendo assim, a soma dos eventos de chuva presentes nesta classificação corresponde a 39 casos.

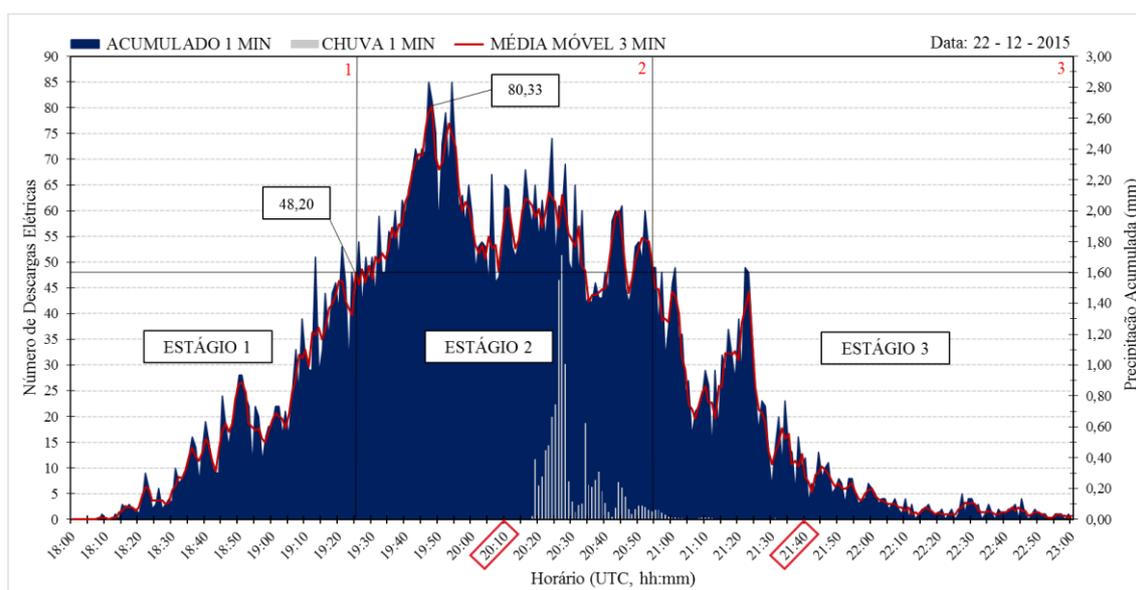


Figura 4.10 -Gráfico de barras mostrando a evolução da atividade elétrica (número de descargas elétricas por minuto, barras em azul) e da chuva (precipitação acumulada em 1 min, barras em cinza) observada no dia 22 de dezembro de 2015 a uma distância máxima de 50 km do MRR. Os quadrantes 1, 2 e 3 se referem, respectivamente, aos três estágios da atividade elétrica durante o ciclo de vida desta tempestade.

4.4. CAMPO ELÉTRICO POSITIVO E NEGATIVO

Análogo à metodologia descrita anteriormente, a chuva observada durante a passagem de 43 de tempestades com descargas elétricas, foi classificada em função das medidas de campo elétrico em superfície. Essas medidas foram coletadas por um medi-

³ Este evento, além de ter causado uma alta taxa de atividade elétrica, produziu grandes acumulados de precipitação e pontos de alagamento em algumas regiões da cidade de São Paulo. Fonte: G1 São Paulo. Disponível em: <https://g1.globo.com/sao-paulo/noticia/2015/12/sao-paulo-tem-chuva-intensa-e-alagamentos-no-primeiro-dia-do-verao.html>.

dor de campo elétrico instalado no mesmo local que o MRR. O propósito desta classificação é observar como varia a DSD com a mudança do campo elétrico (positivo ou negativo), afim de identificar possíveis alterações do tipo de hidrometeoros. Sabe-se que os centros cargas presentes no interior das tempestades elétricas, estão relacionados com os tipos de hidrometeoros presentes dentro da nuvem, e, portanto, podem indicar qual mecanismo de crescimento dos hidrometeoros ocorreu e quais processos levaram ao surgimento dos centros de cargas.

A Figura 4.11 mostra a evolução temporal do campo elétrico, próximo ao MRR, durante a passagem da tempestade do dia 3 de outubro de 2018. Como as medidas de campo elétrico são a cada segundo, e podem trazer oscilações de alta frequência (descargas elétricas) e baixa frequência (centros de carga), aplicou-se uma média móvel de 180 segundos (3 min), que está ilustrada pela linha preta na figura. Assim a classificação da chuva na curva da média móvel de 3 min. Por exemplo, durante o período de precipitação (19h55min - 21h15min) (Figura 4.11), a chuva teve vários intervalos classificados como campo elétrico negativo e somente um como sendo positivo. Isto não foi uma regra e em outros casos a chuva teve apenas uma classificação. Por fim, em alguns casos (20 eventos), a ausência de observações diárias de campo elétrico ou a variação aleatória do campo elétrico impossibilitaram essa classificação da chuva. Sendo assim, apenas 23 eventos de chuva foram utilizados para esta análise.

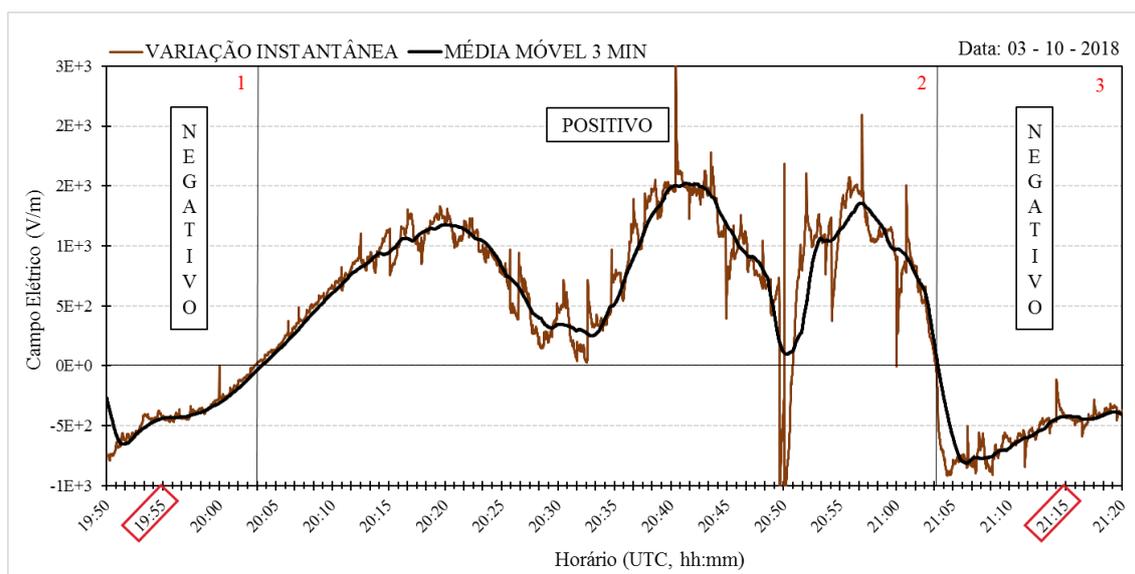


Figura 4.11 - Variação temporal do campo elétrico em superfície (linha marrom) observado no dia 3 de outubro de 2018. As linhas verticais pretas indicam o momento em que a média móvel de 3 minutos se tornou negativa ou positiva, e as linhas verticais vermelhas, indicam o período de duração da chuva (início e fim). A linha preta indica a média móvel de 3 min.

4.5. RESUMO DAS CLASSIFICAÇÕES

Após o controle de qualidade das medidas do MRR e dos procedimentos para classificar os eventos ou intervalo de chuva, em função das tempestades, com e sem descargas elétricas, estágios da atividade elétrica e campo elétrico, chegou-se à conclusão de nove conjunto de eventos ou intervalos de chuva que estão sumarizados na Tabela 3.1. Pode-se ressaltar que cada conjunto teve ao menos 7 horas de observação e mais de 2 mil espectros de gotas.

Tabela 4.1 -Tabela com a descrição dos conjuntos de chuva e as correspondentes informações: número de tempestades associadas, número de amostras (N_a) e horas de amostragem (h).

Conjunto de Dados	Número de Tempestades	Número de Amostras (N_a)	Horas de Amostragem (h)
Com descargas elétricas	43	21.488	59,69
Sem descargas elétricas	51	20.943	58,18
Estágio 1 Desenvolvimento	18	2.985	8,29
Estágio 2 Maturação	20	5.033	13,98
Estágio 3 Dissipação	22	4.430	12,31
Positivo	17	4.832	13,42
Negativo	15	2.687	7,46

4.6. DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS ANALISADAS

As variáveis analisadas nesta pesquisa foram a taxa de precipitação (R, em mm/h), a distribuição de tamanho de gotas (DSD, concentração de gotas (gotas/m³) por intervalo de classe de tamanho de gota (mm)) e o diâmetro mediano das gotas (D_m , em mm). O diâmetro mediano foi calculado a partir das concentrações de gotas e definida como:

$$D_m = \frac{\sum N(D)D^4\Delta D}{\sum N(D)D^3\Delta D} [mm] \quad (4.5)$$

sendo $N(D)$ a concentração de gotas em função do intervalo de classe (gotas/m³mm) e D

o diâmetro médio da classe (mm).

Para analisar as diferenças entre os conjuntos de chuva, foram calculados os valores médios da DSD em função de intervalos de taxa de precipitação predefinidos (i). Ou seja, para cada intervalo de taxa de precipitação, foi obtida apenas uma DSD média. Além disso, as DSDs médias foram utilizadas para calcular a diferença percentual (DIF) entre os conjuntos. Tomando como exemplo a comparação das tempestades com e sem descargas elétricas, a equação foi definida como:

$$DIF = \frac{|DSD(i)_{Com\ descargas\ elétricas} - DSD(i)_{Sem\ descargas\ elétricas}|}{DSD(i)_{Com\ Raios}} 100 [\%] \quad (4.6)$$

Por fim, testes estatísticos (teste t Student) foram aplicados para identificar as faixas de diâmetros da gota e intervalos de R com DSD médias estatisticamente diferentes.

5. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados das características da chuva observada (R, DSD e Dm) durante a passagem de tempestades com e sem descargas elétricas (item 5.1). Já o item 5.2 e o item 5.3 discorrem sobre as características da chuva, em tempestades com descargas elétricas, nos períodos classificados de acordo com os estágios de atividade de descargas elétricas (item 5.2) e variações de campo elétrico (item 5.3).

5.1 TEMPESTADES COM E SEM DESCARGAS ELÉTRICAS

Conforme descrito no capítulo 4.2, os eventos de chuva que tiveram pelo menos 1 raio detectado pela LINET, a uma distância máxima de 5 km do MRR, foram associadas a tempestades com descargas elétricas. Já os eventos de chuva que não foram detectados descargas elétricas, a uma distância mínima de 50 km do MRR, foram associadas a tempestades sem descargas elétricas. A seguir, são apresentados como Re DSD varia entre as tempestades com e sem descargas elétricas, que se formam ou deslocam sobre a RMSP.

5.1.1. Distribuição da Taxa de Precipitação

Para verificar como é a distribuição da intensidade da chuva observada durante sua ocorrência, foi elaborado dois histogramas de frequência relativa e acumulativa, para R menores que 10 mm/h e para todo conjunto amostral. Dessa forma, foi possível analisar quais são os intervalos de R que ocorrem com mais frequência em cada conjunto ou intervalo de chuva.

A Figura 5.1 apresenta o histograma de frequência relativa e acumulativa entre as tempestades com e sem descargas elétricas, para R menores que 10 mm/h. Observa-se em ambas as tempestades, que a frequência relativa diminui à medida que R aumenta. Esse padrão poderia ser representado por uma função do tipo exponencial. Nota-se que as intensidades mais frequentes são inferiores a 2 mm/h para os dois tipos de sistemas. Entretanto, estes baixos valores de R são mais frequentes nas tempestades sem descargas elétricas (59% versus 44%). O histograma também indica que 73% da chuva obser-

vada para as tempestades sem descargas elétricas, apresentam R inferiores a 3 mm/h. Este limiar de R (3 mm/h) representa 51% para as tempestades com descargas elétricas. Para R maiores que 3 mm/h, as tempestades com descargas elétricas apresentam os maiores valores de frequência relativa para cada intervalo de R. Conseqüentemente, a frequência acumulativa mostra que o percentual de R menores que 10 mm/h é menor sobre as tempestades sem descargas elétricas (82% versus 94%).

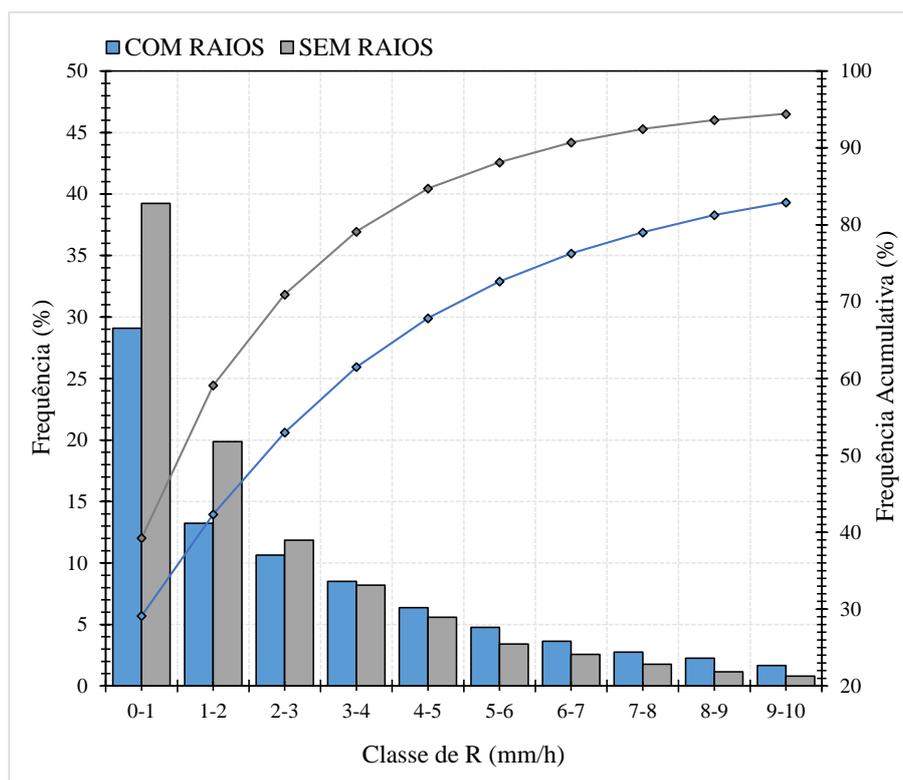


Figura 5.1 - Histograma de frequência (barras) e frequência acumulativa (linhas) da taxa de precipitação (mm/h) para as tempestades com (azul claro) e sem descargas elétricas (cinza). (mm/h) para as tempestades com (azul claro) e sem descargas elétricas (cinza).

Ao se analisar a distribuição de todo o conjunto de R, o histograma da Figura 5.2 mostra que as tempestades com descargas elétricas atingem, com mais frequência, intensidades de chuva maiores que 10 mm/h (18% versus 6%). Percebe-se também que os dois tipos de sistemas são capazes de produzir R maiores que 20 mm/h. No entanto, esta parcela é maior nas tempestades com descargas elétricas (9% versus 2%).

Para os dois tipos de sistemas, os resultados apresentados anteriormente, indicam que durante o período da chuva, são observadas taxas de precipitação que variam de 0,1 a maiores 40 mm/h. De modo geral, como as tempestades com descargas elétricas são compostas por uma maior concentração de gotas grandes e granizos, era de se esperar que as tempestades com descargas elétricas apresentassem com mais frequência

as maiores taxas de R.

Por fim, os resultados corroboram com a literatura ao mostrar que, as tempestades com descargas elétricas produzem intensidades de precipitação maiores em comparação com as tempestades sem descargas elétricas.

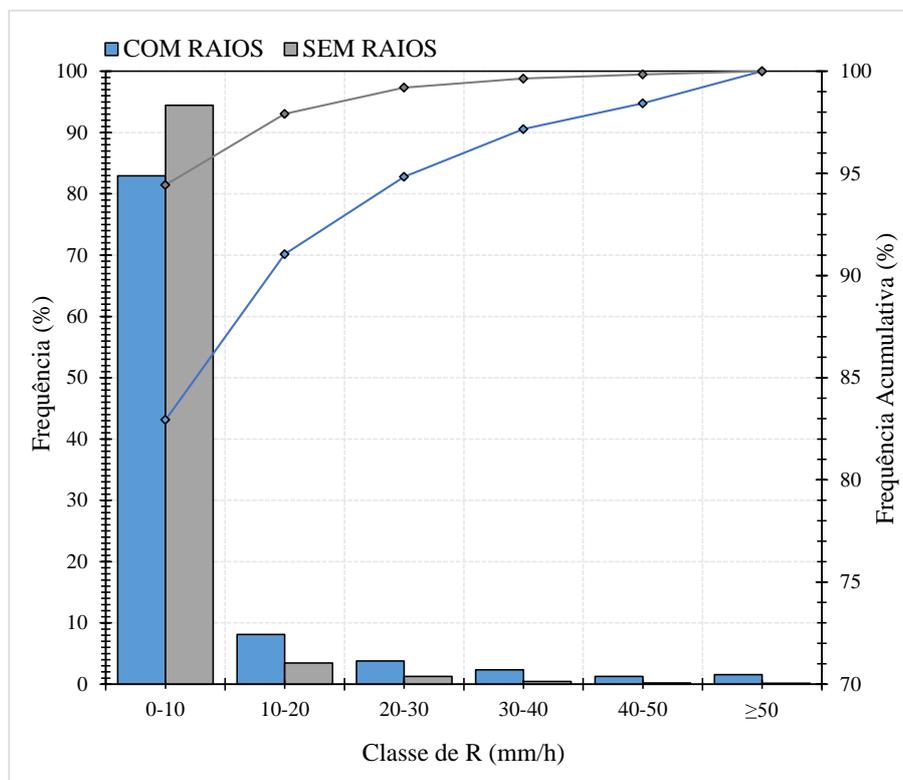


Figura 5.2 - Similar a Figura 5.1, porém, para todo o conjunto amostral de R.

5.1.2. Distribuição do Tamanho de Gotas

Primeiramente, para analisar as DSDs, todas as amostras de DSD foram separadas em vários intervalos de R, e posteriormente, extraída a DSD média. Dessa forma, foi possível comparar e analisar como as DSDs variam em função das classes de intensidade de chuva.

A Figura 5.3 apresenta um painel com a DSD média, em intervalos de R, para as tempestades com e sem descargas elétricas. De modo geral, para ambas os 2 tipos de sistemas, as curvas de DSDs médias apresentam um modelo único. Nota-se curvas do tipo exponencial negativa e função gama com fator de forma negativo, com um pico de concentração média para gotas de tamanho pequeno (diâmetros menores ou iguais a 1 mm), acompanhadas por um declínio para gotas de tamanho médio (> 1 mm e ≤ 3 mm) e

grande (> 3 mm). Apesar das curvas seguirem um mesmo modelo, é possível observar diferenças na concentração média à medida que a taxa de precipitação aumenta e uma distinção entre os tipos de sistemas.

Pode-se observar que para R menores que 1 mm/h (Figura 5.3a) a concentração média de gotas está restrita a diâmetros menores que 4 mm. Para intervalos de R entre 1 e 10 mm/h (Figura 5.3b), a concentração média de gotas médias e grandes aumenta, porém, são as tempestades com descargas elétricas que apresentam a maior concentração média ($D > 2$ mm).

Para R entre 10 e 30 mm/h (Figura 5.3c e Figura 5.3d), observa para os dois tipos de sistemas, um aumento na concentração média para toda faixa de diâmetro. Entretanto, nota-se que as tempestades com descargas elétricas possuem a maior concentração média para gotas maiores que 2,5 mm. Todavia, as tempestades sem descargas elétricas apresentam a maior concentração média para gotas entre 1 e 2 mm de diâmetro.

Para R entre 30 e 50 mm/h (Figura 5.3e, Figura 5.3f), as DSDs médias indicam uma evolução similar ao observado para R entre 10 e 30 mm/h. Ou seja, os dois tipos de sistemas continuam prevalecendo nas mesmas faixas de diâmetro, porém, o processo microfísico que explica este resultado provavelmente não é o mesmo. Para chuvas intensas, as gotas de chuva são originárias da precipitação do granizo, assim, o processo de acreção modela as DSDs. Desse modo, os resultados indicam que este processo é mais efetivo nas tempestades com descargas elétricas, devido a maior concentração média de gotas grandes.

Para R maiores que 50 mm/h (Figura 5.3g), é observado um aumento significativo na concentração média de gotas pequenas para os dois tipos de sistemas. Este resultado indica a efetividade do processo de quebra das gotas de chuva, pois com relação as gotas de diâmetro médio e grande, a concentração média pouco se alterou com relação

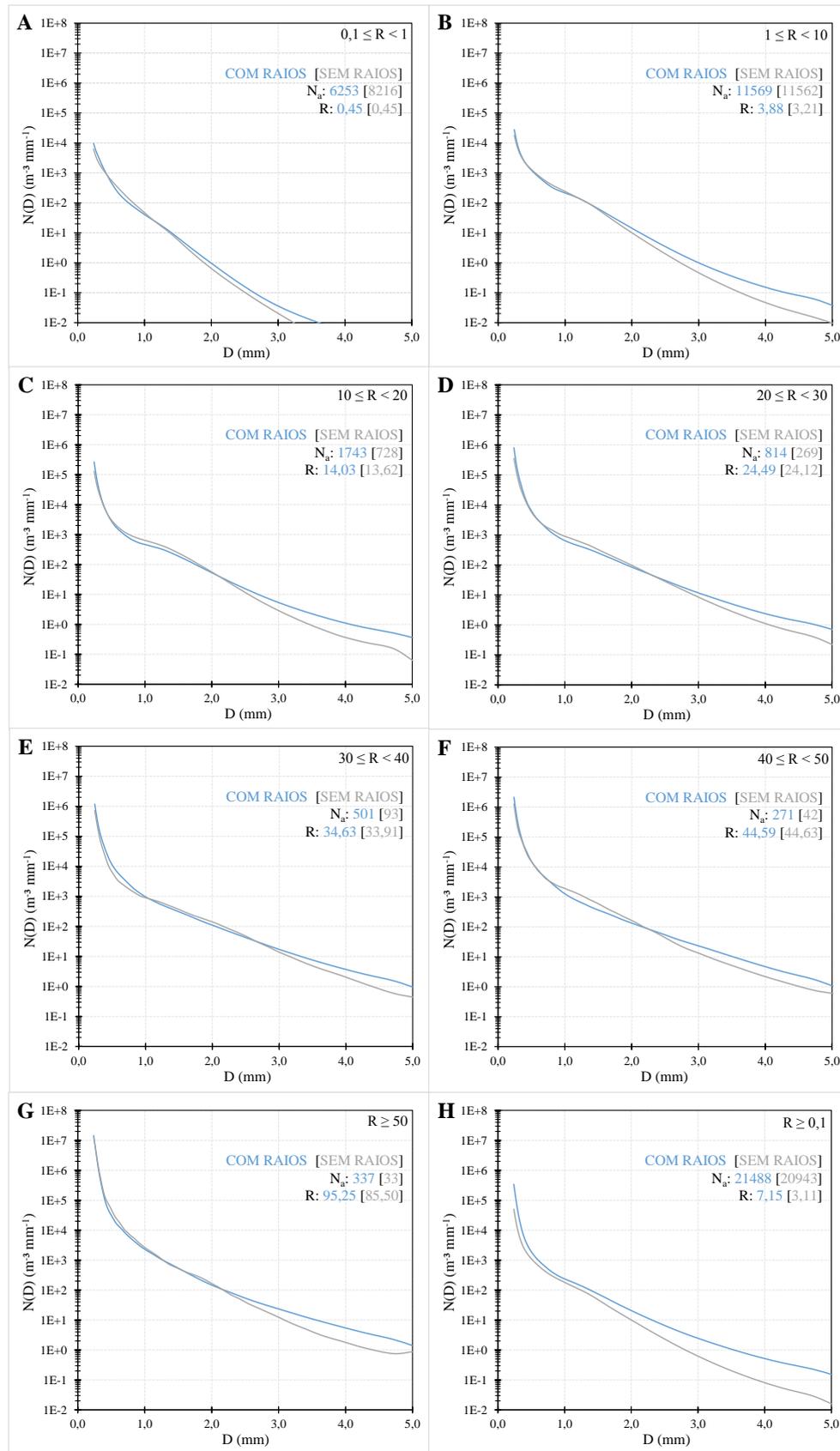


Figura 5.3 - Pannel com a distribuição de tamanho de gotas em função das classes de R (A-H) para as tempestades com (azul claro) e sem descargas elétricas (cinza). Para cada classe de R é mostrada a informação do número de amostras (N_a) e a taxa de precipitação média (R, em mm/h) de cada tempestade.

ao intervalo de R entre 40 e 50 mm/h (Figura 5.3f).

A Figura 5.3h indica e reforça a maior concentração média de gotas grandes para as tempestades com descargas elétricas. É observado que as tempestades com descargas elétricas possuem a maior concentração média de gotas em todas as classes de diâmetro. Entretanto, essas diferenças se tornam mais significativas para diâmetros maiores que 1 mm, onde se observa uma queda mais acentuada na concentração média de gotas médias e grandes para as tempestades sem descargas elétricas. Outra diferença é a R média entre os dois tipos de sistemas. As tempestades com descargas elétricas apresentam o dobro da R média produzida pelas tempestades sem descargas elétricas (7,15 mm/h versus 3,11 mm/h).

Contudo, de acordo com os intervalos de R analisados, os resultados anteriores indicam que as tempestades com descargas elétricas produzem a maior concentração de gotas grandes comparado as tempestades sem descargas elétricas. Para consolidar estes resultados, as Figuras 5.4 e 5.5 apresentam a diferença percentual (DIF) da concentração média de gotas entre as tempestades com e sem descargas elétricas. A fórmula utilizada para o cálculo da DIF foi descrita no item 4.7. Os contornos em linha preta delimitam, para cada intervalo de classe de R, a faixa de diâmetro das gotas que possuem concentrações médias estatisticamente (teste t Student) diferentes para um nível de confiança de 90%. Valores entre 5 e -5% receberam tons esbranquiçados e foram considerados dentro do limite de igualdade na concentração média.

A Figura 5.3 apresenta a DIF da concentração média de gotas entre as tempestades com e sem descargas elétricas e para intervalos de R iguais a 0,5 mm/h. Através destes intervalos de R, é possível observar com mais detalhes a evolução da concentração média de gotas. Nota-se que em todos os intervalos de R, as tempestades com descargas elétricas possuem a maior concentração média de gotas médias e grandes. Já as tempestades sem descargas elétricas apresentam a maior concentração média para gotas de diâmetros menores que 1,7 mm. É possível perceber que à medida que R aumenta, a faixa de diâmetro que, as tempestades com descargas elétricas possuem maior concentração média, se torna um pouco menor. Isso indica que à medida que R aumenta o processo de colisão e coalescência é mais efetivo nas tempestades com descargas elétricas. Assim, é observado uma diminuição na concentração média de gotas pequenas e médias. Nota-se também que as tempestades sem descargas elétricas apresentam a maior

concentração média para gotas pequenas. Conclui-se que os dois tipos de tempestades apresentam concentrações médias maiores em diferentes faixas de diâmetros de gotas. Ou seja, durante a chuva e para R menores que 10 mm/h, as tempestades com descargas elétricas produzem mais gotas grandes e as tempestades sem descargas elétricas mais gotas pequenas.

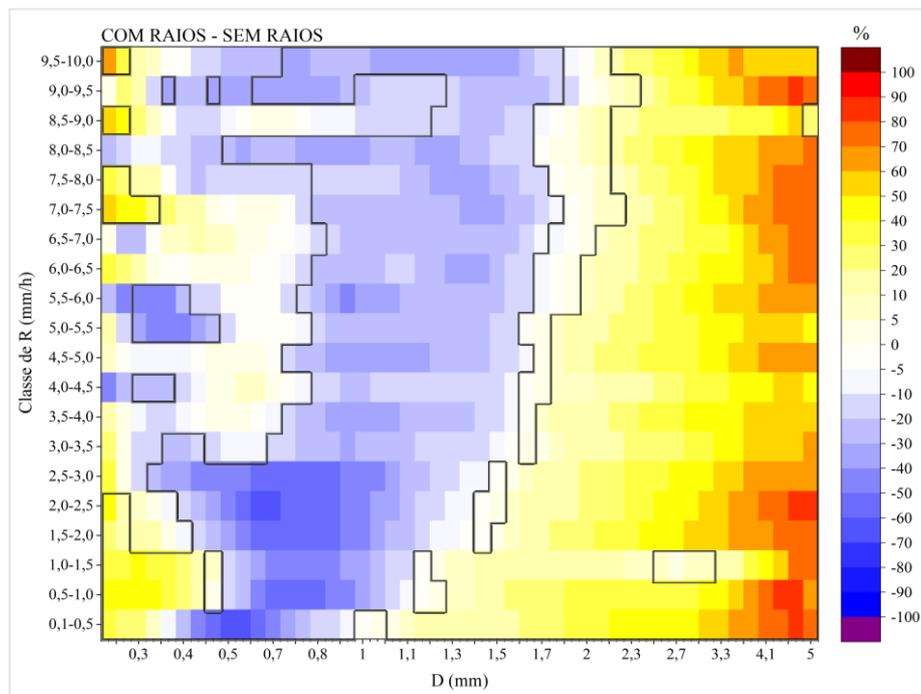


Figura 5.4 - Gráfico de contorno mostrando a diferença percentual (DIF, em %) da concentração média de gotas em intervalos de R (mm/h) para as tempestades com e sem descargas elétricas.

A Figura 5.5 apresenta a DIF da concentração média de gotas entre as tempestades com e sem descargas elétricas, para R maiores que 10 mm/h e intervalos de R iguais a 10 mm/h. Similar ao resultado anterior, nota-se que as tempestades com descargas elétricas continuam a apresentar a maior concentração média de gotas grandes. Já as tempestades sem descargas elétricas, a maior concentração média para diâmetros entre 0,8 e 2 mm. De fato, este resultado já havia sido observado na Figura 4.3.

Diante das análises sobre as DSDs médias em intervalos de R, os resultados indicam que os processos microfísicos atuantes para o crescimento dos hidrometeoros são mais efetivos nas tempestades com descargas elétricas. Isso explica a maior concentração média de gotas grandes observadas em todos os intervalos de R. A seguir, o item 5.1.3. apresenta as diferenças obtidas para o diâmetro mediano das gotas (D_m).

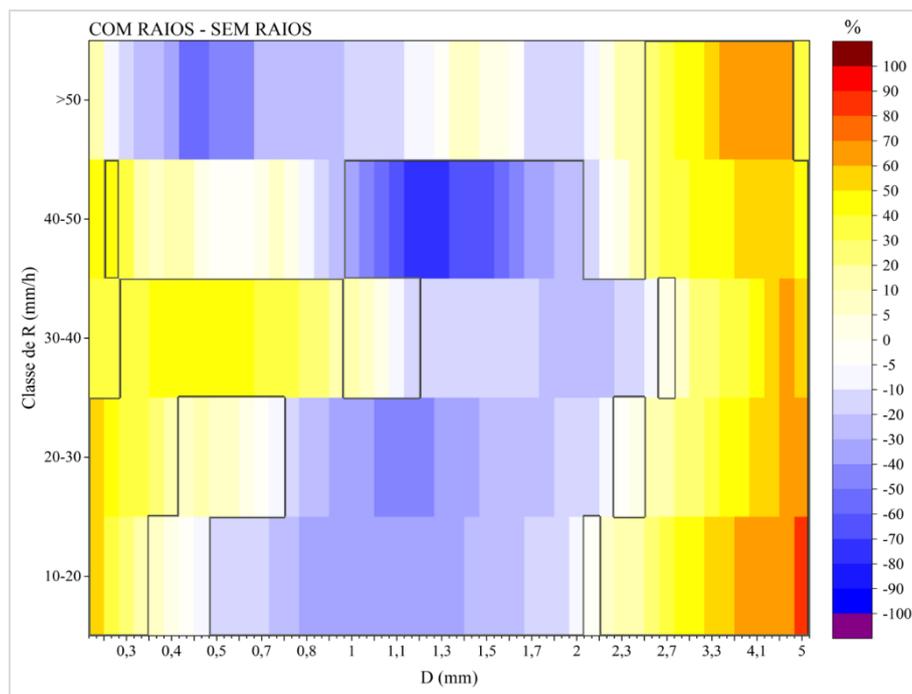


Figura 5.5 - Similar a Figura 5.3, porém, para intervalo de R igual a 10 mm/h.

5.1.3. Distribuição do Diâmetro Mediano

Para verificar como é a distribuição do D_m de acordo com a intensidade da chuva, entre as tempestades com e sem descargas elétricas, foi elaborado dois gráficos box-plot, para R menores que 10 mm/h e para todo conjunto amostral maior que 1 mm/h. As distribuições foram obtidas para intervalos de R iguais a 0,5 mm/h e 10 mm/h.

A Figura 5.6 apresenta a distribuição do D_m entre as tempestades com e sem descargas elétricas, para R menores que 10 mm/h. Pode-se observar que à medida que R aumenta, o D_m também tende a aumentar para ambas tempestades. Isso é devido ao aumento na concentração de gotas de tamanho médio e grande. Em cada intervalo de R, as tempestades com e sem descargas elétricas apresentam valores similares para o limite inferior do D_m . Nota-se também que as distribuições do D_m são mais deslocadas a direita do gráfico (maiores valores) para as tempestades com descargas elétricas. Ou seja, como as tempestades com descargas elétricas produzem a maior concentração de gotas grandes, conseqüentemente, elas tendem a apresentar os maiores D_m .

Ainda na Figura 5.6, observa-se que os valores de D_m variam entre 0,4 e 2,2 mm para as tempestades sem descargas elétricas, e entre 0,4 e 2,6 mm para as tempestades com descargas elétricas. Por fim, os testes de hipóteses realizados em cada intervalo de

R, reforçam as diferenças na distribuição do Dm entre os dois tipos de sistemas.

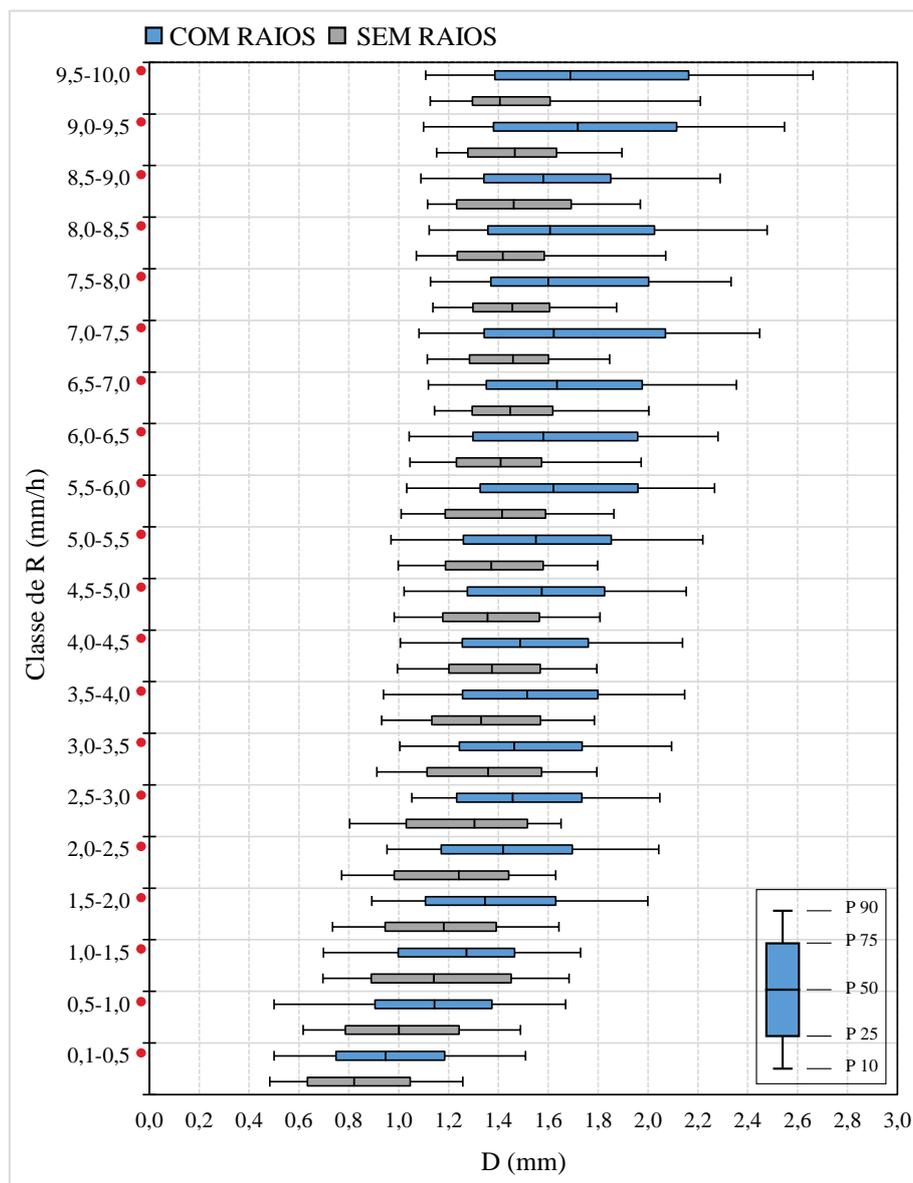


Figura 5.6 - Painel com gráfico boxplot mostrando a distribuição do diâmetro mediano das gotas (D_m) em função dos intervalos de R (mm/h) para as tempestades com (azul claro) e sem descargas elétricas (cinza). A Figura também fornece, para cada classe de R (mm/h), o número de espectros (amostras de DSD) e o diâmetro mediano médio. As classes de R demarcadas por um ponto vermelho remetem ao intervalo onde as médias amostrais foram consideradas diferentes (teste t Student para 90% de confiança).

Similar a Figura 5.6, a Figura 5.7 apresenta a distribuição do Dm para R maior que 1 mm/h e intervalo de R igual a 10 mm/h. De acordo com este resultado, e para R menores que 30 mm/h, as tempestades com descargas elétricas também apresentam uma distribuição mais deslocada a direita (valores maiores). Os maiores valores de Dm, para o percentil 90, foram alcançados nos intervalos entre 20 e 30 mm/h para as tempestades com descargas elétricas (2,7 mm), e entre 30 e 40 mm/h para as tempestades sem descargas elétricas (2,4 mm). Para o intervalo de R entre 30 e 40 mm/h, as distribuições são

similares e apresentam valores aproximados para os percentis 10, 25 e 75. Para R maiores que 40 mm/h é observado uma diminuição nos valores de Dm. Este efeito é causado pelo aumento significativo na concentração de gotas pequenas para estas altas intensidades de chuva (processo de quebra das gotas).

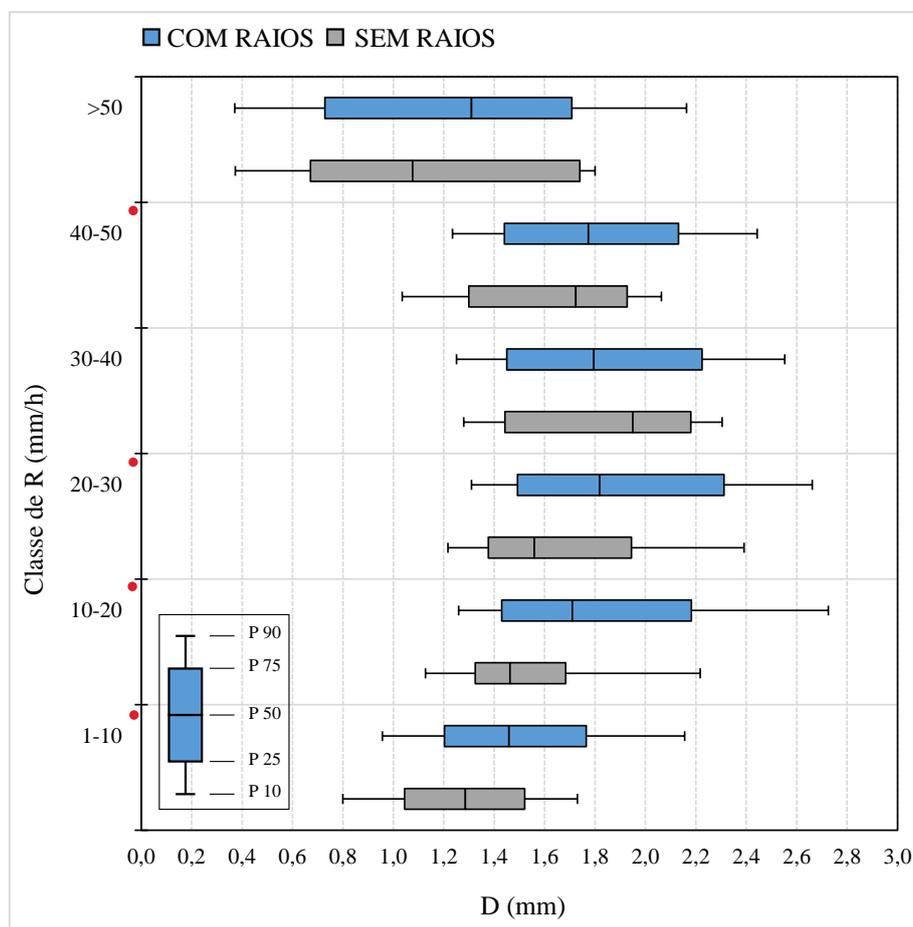


Figura 5.7 -Similar a Figura 4.4, porém, para intervalos de R igual a 10 mm/h.

Na Tabela 5.1 é apresentada os valores da média, do desvio padrão e do teste t Student (nível de confiança de 99% (t crítico igual a $\pm 2,576$)) para R e Dm. As tempestades com descargas elétricas, com uma R média de 7,15 mm/h, é aproximadamente 130% maior em comparação com as tempestades sem descargas elétricas (3,11 mm/h). O diâmetro mediano segue a mesma linha, com um valor médio de 1,44 mm (23% maior) para as tempestades com descargas elétricas e 1,17 mm para as tempestades sem descargas elétricas. Consequentemente, o resultado para o teste t Student (T Obtido) concluiu que estas médias são diferentes.

Tabela 5.1 -Tabela com os valores da média, desvio padrão e o valor obtido para o teste t Student (T Obtido) da taxa de precipitação (mm/h) e diâmetro mediano (mm) para as tempestades com e sem descargas elétricas.

Conjuntos	Taxa de Precipitação (mm/h)			Diâmetro Mediano (mm)		
	Média	Desvio P.	T Obtido	Média	Desvio P.	T Obtido
Com Raios	7,15	17,15	32,28	1,44	0,57	55,10
Sem Raios	3,11	6,43		1,17	0,43	

5.2. ESTÁGIOS DA ATIVIDADE ELÉTRICA DAS TEMPESTADES COM DESCARGAS ELÉTRICAS

Os intervalos de chuva foram classificados de acordo com os estágios da atividade de raio das tempestades elétricas, conforme descrito no item 4.4. Nesta classificação, a chuva observada foi segmentada em três grupos: estágio 1 (desenvolvimento), estágio 2 (maduração) e estágio 3 (decaimento). A seguir, são apresentados como R e DSD varia de acordo com os 3 estágios de atividade de descargas elétricas em tempestades elétricas que se formam ou deslocam sobre a RMSP.

5.2.1. Distribuição da Taxa de Precipitação

Similar a Figura 5.1, a Figura 5.8 apresenta o histograma de frequência relativa e acumulativa entre os estágios 1, 2 e 3, e para R menores que 10 mm/h. Assim como observado nas tempestades com e sem descargas elétricas, o padrão da distribuição de R poderia ser explicada por uma função exponencial. É possível perceber que o estágio 3 possui uma frequência relativa menor com relação aos demais estágios para R inferiores a 2 mm/h. Isso indica que os estágios 1 e 2 produzem com mais frequência estas intensidades de chuva ($R < 2$ mm/h). Observa-se que os três estágios apresentam valores aproximados de frequência acumulativa para R igual a 3 mm/h, ou seja, durante a chuva, os três estágios produzem com a mesma frequência R inferiores a 3 mm/h. Para R maiores que 3 mm/h é possível observar um “distanciamento” entre as curvas de frequência acumulativa à medida que R aumenta. Desta forma, para R menores que 10 mm/h, os valores de frequência acumulativa seguem a seguinte ordem: 89% (estágio 3), 81% (estágio 2) e 77% (estágio 3). Este resultado indica que durante a fase de decaimento da taxa de descargas elétricas em tempestades elétricas, é mais frequente observar intensidade de chuva menores que 10 mm/h. Em contrapartida, na fase de desenvol-

vimento é menos frequente estes valores de R.

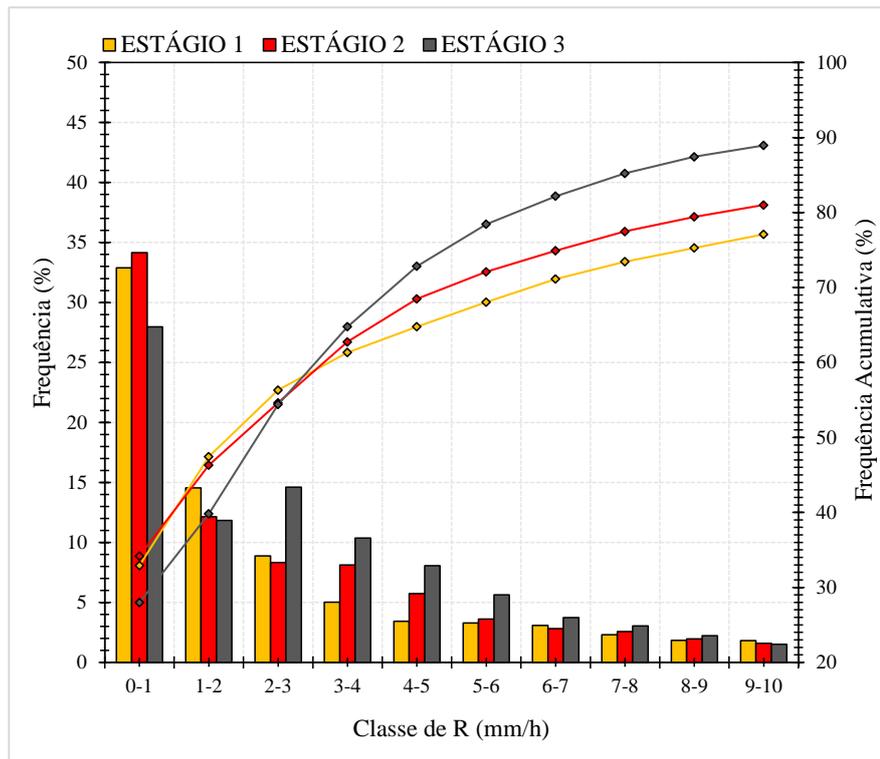


Figura 5.8 -Histograma de frequência (barras) e frequência acumulativa (linhas) da taxa de precipitação (mm/h) para a estágio 1 (amarelo), estágio 2 (vermelho) e estágio 3 (cinza).

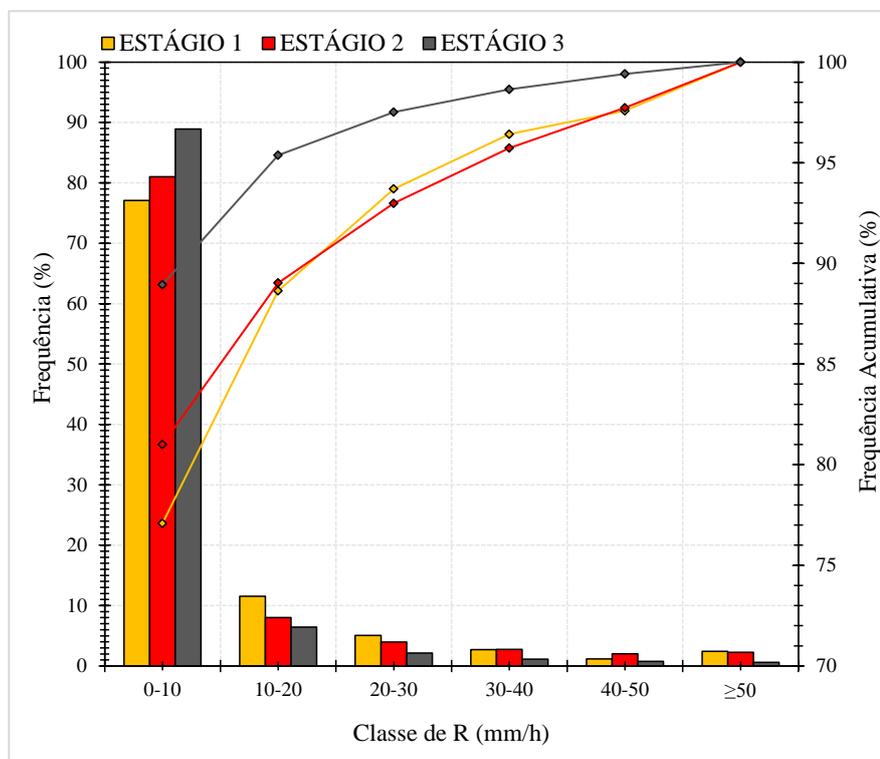


Figura 5.9 -Similar a Figura 4.13, porém, para intervalo de classe de R de 10 mm/h.

O histograma da Figura 5.9, mostra como é a distribuição de R para todo o conjunto amostral. Nota-se praticamente a mesma frequência acumulativa, entre os estágios 2 e 3, para R menores que 20 mm/h. Já para o estágio 3, as frequências relativas são menores com relação aos outros estágios ($R > 20$ mm/h). O histograma indica uma similaridade entre os estágios 1 e 2, e uma distinção com relação ao estágio 3.

Os resultados mostram claramente que as intensidades de chuva variam conforme a atividade de descargas elétricas das tempestades elétricas. O estágio 3 (decaimento) tem maior frequência de ocorrência para R menor que 10 mm/h, enquanto que os estágios 1 e 2 (desenvolvimento e maturação) para valores maiores que 10 mm/h. Estes resultados indicam que as maiores intensidades de taxa de precipitação, ocorrem durante os dois primeiros estágios, e as menores intensidades, durante o decaimento da atividade de descargas elétricas. Esta característica é similar aos sistemas convectivos, que, durante a fase inicial e maturação, geram as maiores taxas de precipitação.

5.2.2. Distribuição do Tamanho de Gotas

Similar a Figura 5.3 do item 5.1.2., a Figura 5.10 apresenta um painel com a DSD média, em intervalos de R, para as amostras de chuva dos estágios 1, 2 e 3. Assim como observado na Figura 5.3, em todos os intervalos de R, as curvas de DSDs médias também são do tipo gama com fator de forma negativo. Ou seja, as DSDs médias apresentam um pico de concentração média para gotas pequenas, acompanhadas por um declínio na concentração média para gotas de diâmetros médios e grandes. Novamente ao observado na Figura 5.3, é possível destacar algumas diferenças nas DSDs médias entre os estágios, e à medida que R aumenta.

Para R menores que 1 mm/h é possível observar que os estágios 1 e 2 possuem concentração média maior para gotas com mais de 3 mm de diâmetro, com relação ao estágio 3. No entanto, essa configuração se altera para o intervalo de R entre 1 e 10 mm/h (Figura 5.10b). A Figura 5.10b mostra que o estágio 3 possui concentração média maior para gotas com diâmetros entre 2 e 4 mm. A Figura 5.10b também mostra que os estágios 1 e 2 apresentam DSDs médias similares entre si. Desse modo, durante o estágio de decaimento de atividade de descargas elétricas, e para este intervalo de R, mais gotas de chuva com estes diâmetros (entre 2 e 4 mm) chegam à superfície. Este resultado pode estar associado com a precipitação da neve durante a fase de dissipação das

tempestades elétricas. É provável que, para este intervalo de R , a fase de decaimento da atividade de descargas elétricas coincide com a fase de dissipação do ciclo de vida das tempestades com descargas elétricas, pois é nesta fase, que é observado a maior concentração de gotas grandes (acima de 3 mm).

Para R maiores que 10 mm/h, é pouco provável que as tempestades elétricas estavam na fase de dissipação de seu ciclo de vida, sendo assim, o estágio 3 não mais coincide com esta fase. Diante desta consideração, observa-se que para R entre 10 e 50 mm/h (Figuras 5.10c, 5.10d, 5.10e e 5.10f), o estágio 3 ainda apresenta uma concentração média de gotas grandes igual ou maior com relação aos estágios 1 e 2. É observado também, que o estágio 3, possuía menor concentração média de gotas com diâmetros entre aproximadamente 1 e 2 mm. Novamente, os estágios 1 e 2 apresentam DSDs médias similares entre si. Estes resultados podem indicar que o processo de colisão e coalescência é mais efetivo durante a fase de decaimento da fase de gelo. Pode indicar também que, a fase de decaimento da atividade de descargas elétricas coincide com a fase em que os granizos maiores começam a precipitar dentro das tempestades.

Para R maiores que 50 mm/h (Figura 5.10g), o estágio 3 apresenta uma diferença significativa na concentração média de gotas de diâmetros entre 0,8 e 2,5 mm, comparado aos estágios 1 e 2. Ao que tudo indica, essa diferença está associada a R média obtida neste intervalo de R . Outra observação neste resultado é a grande concentração média para gotas menores que 1 mm (em ambos os estágios), indicando a efetividade no processo de quebra de gotas para altas intensidades de chuva. Por fim, a Figura 5.10h apresenta as DSDs médias para todo o conjunto de R . Nota-se que as DSDs médias são similares entre os estágios de atividade de descargas elétricas. No entanto, os estágios 1 e 2 apresentam maior concentração média para gotas com diâmetros maiores que 4 mm e entre os intervalos de 0,6 a 2 mm.

Os resultados anteriores indicam que, durante a fase de dissipação de atividade de descargas elétricas nas tempestades elétricas, ocorrem a maior concentração de gotas grandes durante a chuva (válido para R maiores que 1 mm/h). Para verificar com maior exatidão estes resultados, as Figuras 5.11 e 5.12 (similar as Figuras 5.4 e 5.5) apresentam um painel com as DIFs da concentração média de gotas entre os 3 estágios.

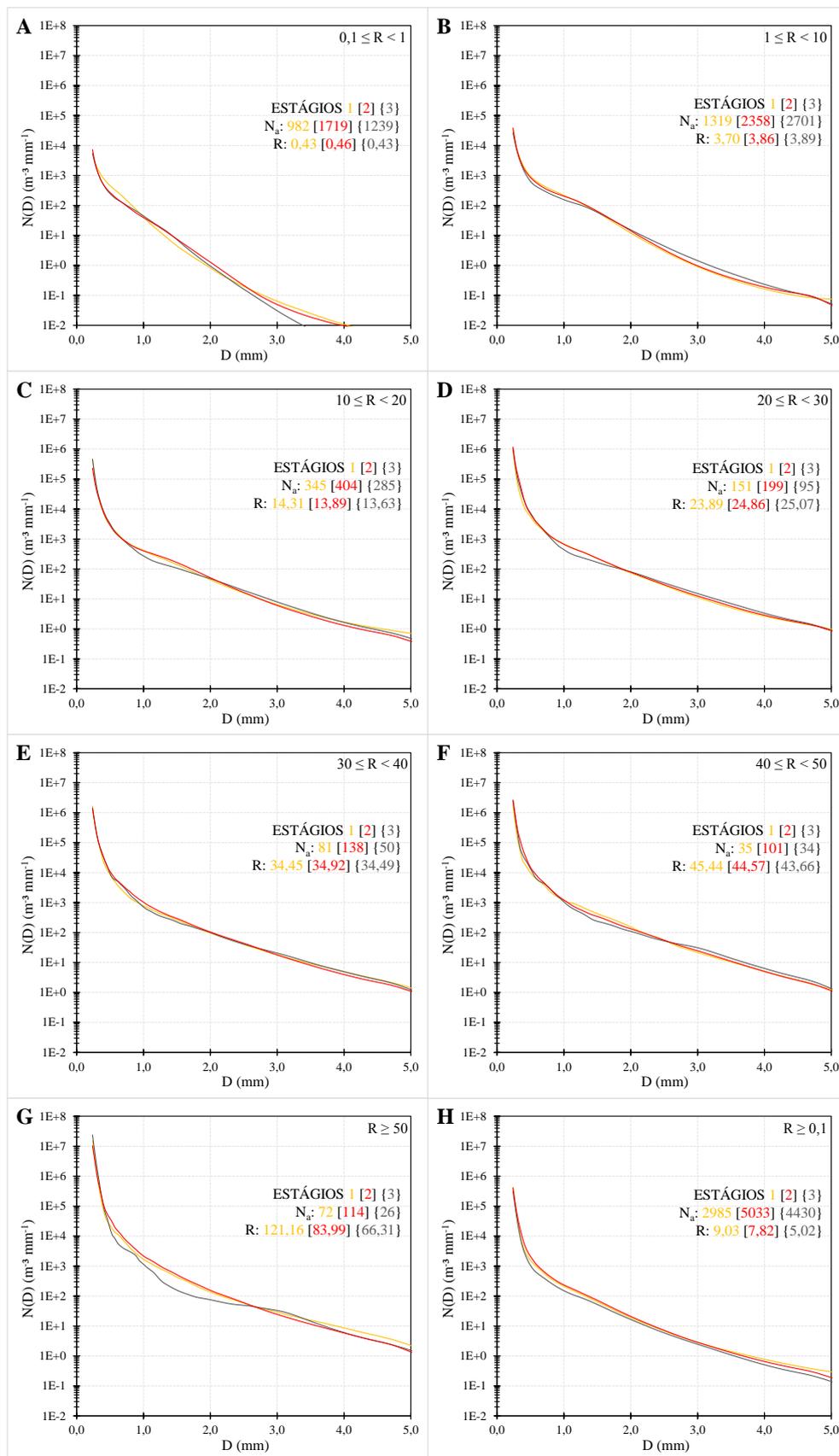


Figura 5.10 - Painel com a distribuição de tamanho de gotas em função das classes de R (A-H) para as chuvas do estágio 1 (amarelo), estágio 2 (vermelho) e estágio 3 (cinza). Para cada classe de R é mostrada a informação do número de amostras (N_a) e a taxa de precipitação média (R , em mm/h) de cada tempes-

tade.

A Figura 5.11a apresenta a DIF da concentração média de gotas entre os estágios 1 e 2, para R menores que 10 mm/h e intervalos de R iguais a 0,5 mm/h. Este resultado mostra que cada estágio possui concentração média maior para algumas faixas de diâmetro e intervalos de R . Por exemplo, é possível notar que, para R menores que 3,5 mm/h, o estágio 1 possui a maior concentração média de gotas com diâmetros menores que 1 mm. Por outro lado, o estágio 2 possui maior concentração média de gotas com diâmetros entre 1,2 e 3,5 mm. Para gotas com diâmetros maiores que 3,5 mm, o estágio 1 aparenta ter o maior número de classes de diâmetro de gotas com maior concentração média. Desse modo, conclui-se que para R menores que 3,5 mm/h, os estágios 1 e 2 apresentam DSDs significativamente distintas. Para R maiores que 3,5 mm/h, os estágios 1 e 2 apresentam concentrações médias que variam de acordo com a faixa de diâmetro da gota e classe de R ., ou seja, não é possível identificar um “padrão” que explique para quais diâmetros de gotas os estágios possuem maior concentração média. Isso indica uma similaridade nas DSDs média entre os dois estágios.

Similar a Figura 5.11a, a Figura 5.11b apresenta a DIF da concentração média de gotas entre os estágios 2 e 3. Este resulta mostra claramente como as DSDs médias são distintas entre os estágios 2 e 3. Por exemplo, para R menores que 1,5 mm/h é possível observar que o estágio 2 possui maior concentração média de gotas com diâmetros maiores que 1,5 mm. Em contrapartida, o estágio 3 possui maior concentração média de gotas com diâmetros entre 0,7 e 1,5 mm. Já para R maiores que 1,5 mm/h, o padrão muda totalmente. Observa-se que o estágio 2 possui maior concentração média de gotas com diâmetro menores que 2 mm e menor para gotas com diâmetros maiores que 2 mm. É possível notar algumas exceções (R entre 7 e 9,5 mm) onde o estágio 2 possui a maior concentração média de gotas, no entanto, ainda prevalece o domínio do estágio 3 nas outras classes de R . Esse resultado reforça as conclusões anteriores de que, durante a fase de decaimento da atividade de descargas elétricas, há uma concentração maior de gotas grandes durante a chuva.

Similar a Figura 5.11a, a Figura 5.11c apresenta a DIF da concentração média de gotas entre os estágios 3 e 1. Análogo a comparação anterior, o estágio 3 também possui menor concentração média de gotas grandes para R menores que 1,5 mm/h. Porém, é possível observar que a concentração média de gotas grandes aumenta à medida que R

umenta. Assim, para R maiores que 1,5 mm/h o estágio 3 apresenta a maior concentração média de gotas com diâmetros acima de 2 mm. Em contrapartida, o estágio 1 possui maior concentração média de gotas com diâmetros menores que 2 mm. Por fim, estes resultados mostram que a produção de gotas grandes de chuva é maior durante a fase de decaimento da atividade de descargas elétricas em relação a fase de desenvolvimento.

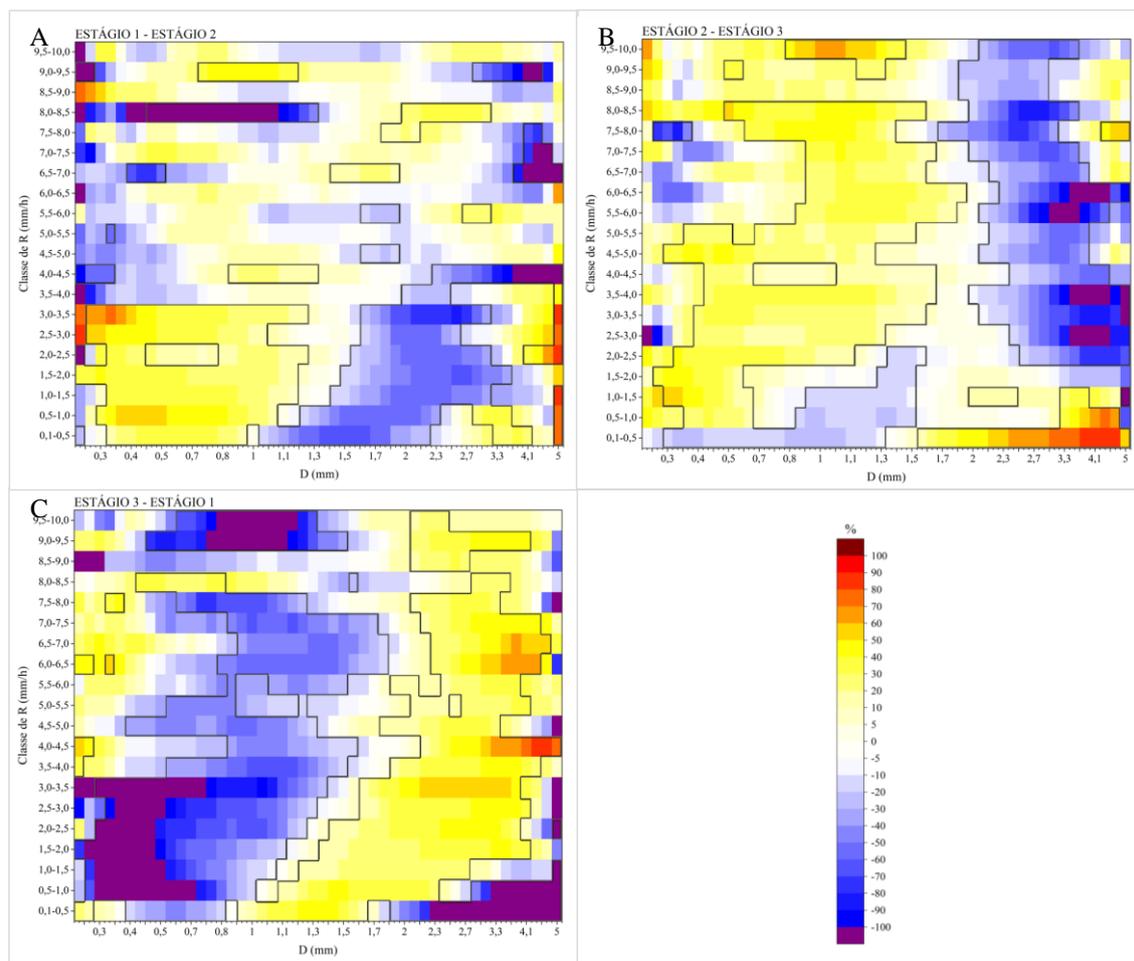


Figura 5.11 - Gráfico de contorno mostrando a diferença percentual (DIF, em %) da concentração média de gotas em intervalos de R (mm/h) entre as chuvas do (a) estágio 1 e estágio 2, (b) estágio 2 e estágio 3, e (c) estágio 3 e estágio 1.

Os resultados anteriores (R menores que 10 mm/h) indicaram que durante a fase de decaimento da atividade de descargas elétricas ocorre a maior concentração de gotas com diâmetros maiores que 2 mm. Também foi observado que os estágios de desenvolvimento e maturação da atividade de descargas elétricas ocorrem a maior concentração de gotas com diâmetros menores que 2 mm. Novamente, estes resultados indicam uma provável coincidência entre as fases de decaimento da atividade elétrica e dissipação das tempestades elétricas. Isso explica o fato do estágio 3 possui maior concentração média de gotas grandes, que tem origem da precipitação, crescimento (processo de agregação)

e derretimento dos cristais de gelo.

A Figura 5.12 apresenta um painel com a DIF da concentração média de gotas entre os estágios 1, 2 e 3, para R maiores que 10 mm/h e intervalos de R iguais a 10 mm/h. Na comparação entre os estágios 1 e 2 (Figura 5.12a) é possível observar intervalos de R e faixas de diâmetro de gotas, em que cada estágio apresenta a maior concentração média.

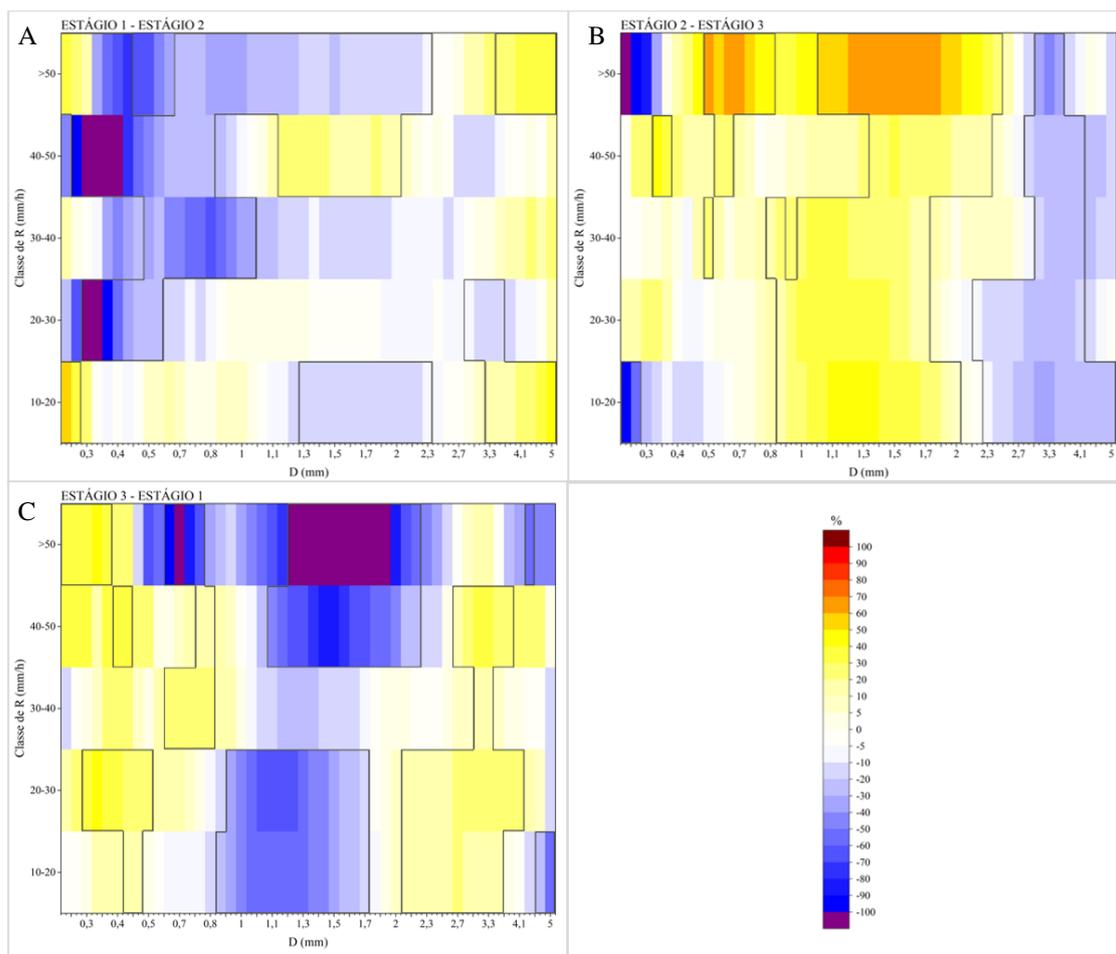


Figura 5.12 - Similar a Figura 5.11, porém, para intervalo de R igual a 10 mm/h. (a) Estágio 1 e estágio 2, (b) estágio 2 e estágio 3, e (c) estágio 3 e estágio 1.

Desse modo, para R maiores que 10 mm/h, destaca-se que o estágio 1 apresenta uma maior concentração média de gotas com diâmetros maiores que 3 mm. Já o estágio 2 apresenta um maior número de classes de R e faixas de diâmetro, com maiores concentrações médias de gotas para diâmetros menores que 2,5 mm. Já na comparação entre os estágios 2 e 3 (Figura 5.12b), e os estágios 3 e 1 (Figura 5.11c), observa-se DSDs médias significativamente diferentes. Por exemplo, a Figura 5.11b indica que o estágio 2 possui maior concentração média de gotas com diâmetros entre 0,8 e 2,3 mm, e menor concentração média de gotas com diâmetros acima de 2,5 mm. Já a Figura 5.11c apre-

senta um resultado similar, pois indica a maior concentração média de gotas com diâmetros entre 1 e 2 mm para o estágio 1. Ou seja, o estágio 3 também possui (com algumas exceções) maior concentração média de gotas grandes na maioria das classes de R. Desse modo, chega-se um consenso de que, para R maiores que 10 mm/h, a fase de decaimento de descargas elétricas é mais efetiva na produção de gotas de chuva grandes e deve estar associada ao início da precipitação dos granizos maiores. A seguir, o item 5.2.3. apresenta as diferenças obtidas na distribuição do Dm em função dos intervalos de R.

5.2.3. Distribuição do Diâmetro Mediano

Similar a Figura 5.6, a Figura 5.13 apresenta a distribuição do Dm entre os estágios 1, 2 e 3, e para R menores que 10 mm/h. Nota-se, inicialmente que à medida que R aumenta, os valores de Dm também aumentam e, conseqüentemente, as distribuições do Dm deslocam-se para valores maiores. Essa observação é válida para os 3 estágios de atividade de descargas elétricas. Apesar disso, é possível destacar algumas diferenças significativas. Para R menores que 1,5 mm/h, as distribuições variam conforme a classe de R e não é possível observar com clareza qual o estágio apresenta com mais frequência os maiores valores de Dm. Entretanto, para R entre 1,5 e 6,5 mm/h, é possível destacar que o estágio 3 apresenta distribuições de Dm mais deslocadas a direita com relação aos estágios 1 e 2 (observar o percentil 75). Já as distribuições de Dm dos estágios 1 e 2 são mais similares entre si. Este resultado consolida o que foi observado na Figura 5.11, já que o estágio 3 apresentou a maior concentração média de gotas grandes para este intervalo de R, entretanto, para R entre 6,5 e 10 mm/h, as distribuições de Dm apresenta pouca variação entre as classes de R. Já as distribuições de Dm dos estágios 1 e 2 teve um deslocamento para valores maiores com o aumento de R. Este resultado é consequência do aumento da concentração média de gotas grandes durante os estágios 1 e 2 (Figuras 5.11b e 5.11c). Por fim, para R menores que 10 mm/h, os valores (P10 e P90) do Dm variam de 0,6 a 2,7 mm (estágio 1), de 0,7 a 3,1 mm (estágio 2) e, de 0,5 a 2,7 mm (estágio 3).

Similar a Figura 5.13, a Figura 5.14 apresenta a distribuição do Dm para R maior que 1 mm/h e intervalo de R igual a 10 mm/h. Conforme observado na figura anterior (R entre 1 e 10 mm/h), é possível notar que o estágio 3 apresenta com mais frequência

valores maiores de D_m em comparação aos estágios 1 e 2.

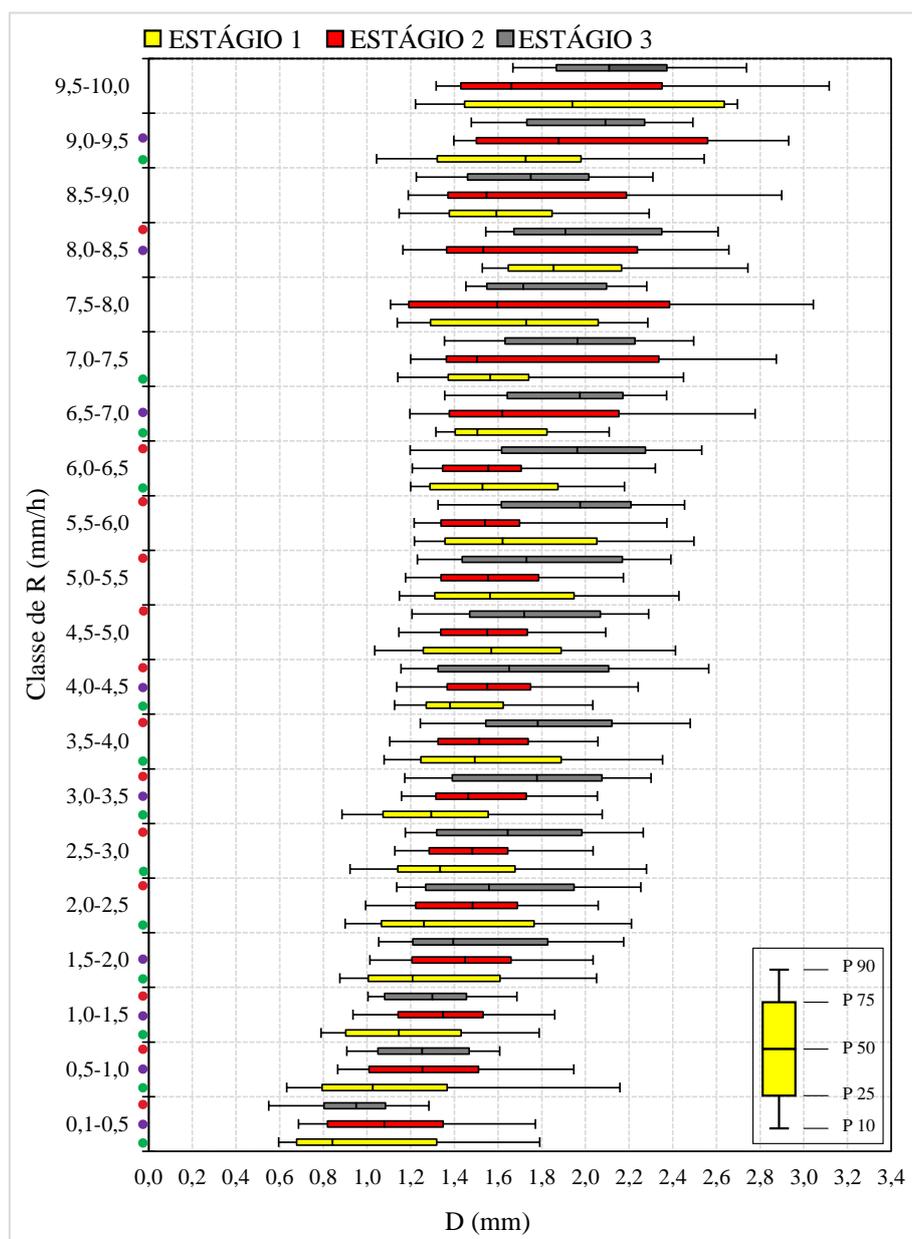


Figura 5.13 - Painel com gráfico boxplot mostrando a distribuição do diâmetro mediano das gotas (D_m) em função dos intervalos de R (mm/h) para as chuvas do estágio 1 (amarelo), estágio 2 (vermelho) e estágio 3 (cinza). As classes de R demarcadas pelos pontos verdes, lilás e vermelho, remetem respectivamente aos intervalos onde as médias amostrais foram consideradas iguais (teste t Student para 90% de confiança) entre os estágios 1 e 2, estágios 2 e 3 e os estágios 1 e 3.

Para R entre 10 e 40 mm/h, as distribuições do D_m apresentam uma similaridade entre os estágios, e para R maiores que 40 mm/h, é possível destacar a diminuição dos valores do D_m . Esse efeito é causado pelo aumento significativo na concentração de gotas pequenas devido ao processo de quebra das gotas, para altas intensidades de chuva. Este efeito se mostra menos efetivo no estágio 2, onde o valor obtido para o P25 foi o maior entres os estágios 1 e 3 (1,1 mm versus 0,5 mm).

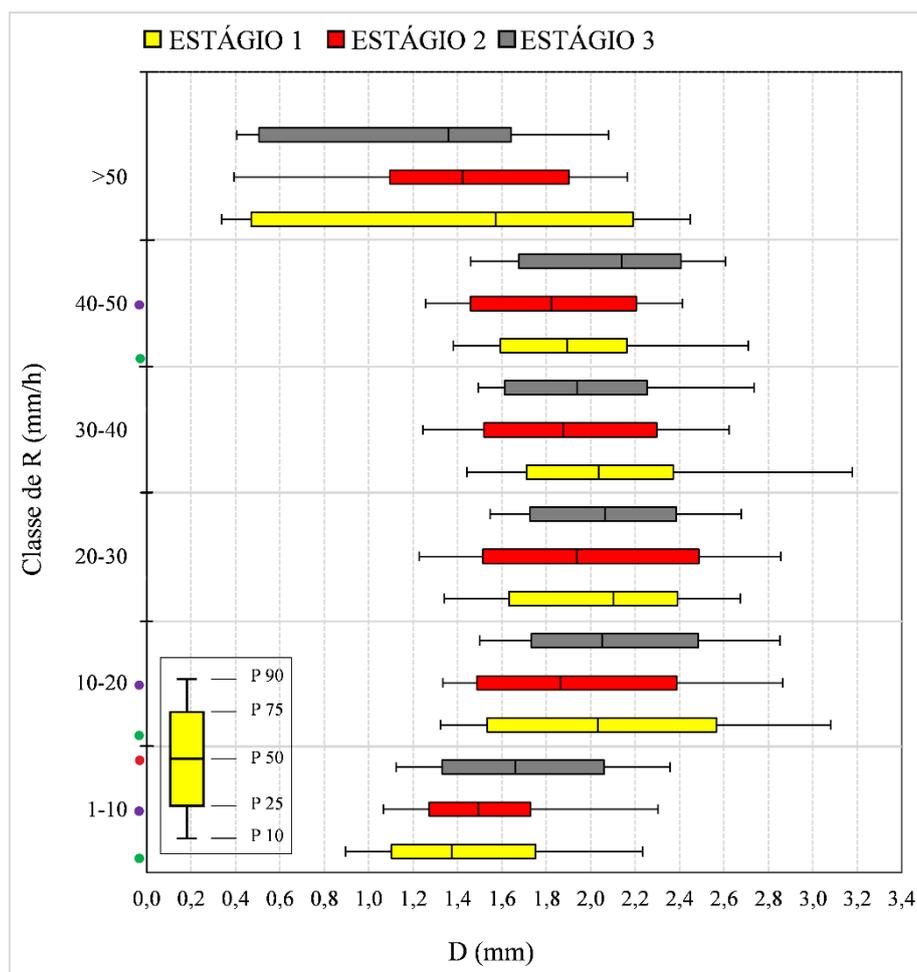


Figura 5.14 - Similar a Figura 5.13, porém, para intervalos de R igual a 10 mm/h.

De acordo com os resultados da Tabela 5.3, o estágio 1 apresenta a maior R média (9,03 mm/h), seguida pelos estágios 2 (7,81 mm/h) e 3 (5,02 mm/h), respectivamente. Este resultado mostra que durante a fase de desenvolvimento de atividade de descargas elétricas ocorre, com mais frequência, os maiores valores de R. Em contrapartida, durante a fase de decaimento de atividade de descargas elétricas, ocorre com mais frequência, os menores valores de R.

Ainda na Tabela 5.3, sobre o Dm médio é observado que a chuva do estágio 3 apresenta o maior valor (1,57 mm) e o estágio 1 (1,48 mm), o menor. Os resultados do teste t Student apontam que as médias, tanto para R quanto para o Dm, são estatisticamente diferentes entre os estágios.

Tabela 5.2 -Tabela com os valores da média, desvio padrão e o valor obtido para o teste t Student (T Obtido) da R (mm/h) e do Dm (mm) para as chuvas do estágio 1, estágio 2 e estágio 3.

Conjuntos	Taxa de Precipitação (mm/h)			Diâmetro Mediano (mm)		
	Média	Desvio P.	T Obtido	Média	Desvio P.	T Obtido
Estágio 1	9,03	26,53	* 2,22	1,48	0,69	* -2,70
Estágio 2	7,81	18,11	** 9,82	1,53	0,59	** -3,75
Estágio 3	5,02	8,32	*** -8,00	1,57	0,56	*** 5,64

(*) Resultado para o teste entre os estágios 1 e 2.

(**) Resultado para o teste entre os estágios 2 e 3.

(***) Resultado para o teste entre os estágios 3 e 1.

5.3. CAMPO ELÉTRICO POSITIVO E NEGATIVO

Neste item, os intervalos de chuva foram classificados de acordo com a variação do campo elétrico em tempestades com descargas elétricas (item 4.4). Assim, a chuva observada foi segmentada em 2 grupos: com campo elétrico positivo (EP) e com campo elétrico negativo (EN). Dessa forma, espera-se observar diferenças que estejam associadas aos hidrometeoros, que acabam adquirindo uma certa distribuição de carga após a colisão entre as diferentes partículas de água e gelo.

5.3.1. Distribuição da Taxa de Precipitação

Similar a Figura 5.1, a Figura 5.15 apresenta o histograma de frequência relativa e acumulativa para os intervalos de chuva com campo elétrico positivo e negativo, e para R menores que 10 mm/h. Assim como foi observado nos resultados anteriores, a distribuição de R segue uma função do tipo exponencial. Outra observação que se destaca, é a frequência relativa para R menores que 1 mm/h. Para todo o conjunto de R, os dois intervalos de chuva apresentam uma alta frequência relativa para este intervalo de R. Ou seja, este limiar corresponde a 51% de toda a chuva do grupo com campo elétrico negativo e 36% do grupo com campo elétrico positivo. Para as classes de R superiores a 1 mm/h, observa-se uma frequência relativa similar entre os grupos, já que as diferenças são inferiores a 1,7%. Dessa forma, para R inferiores a 10 mm/h a frequência acumulativa é de 91% quando o campo elétrico é negativo e 81% quando o campo elétrico é positivo.

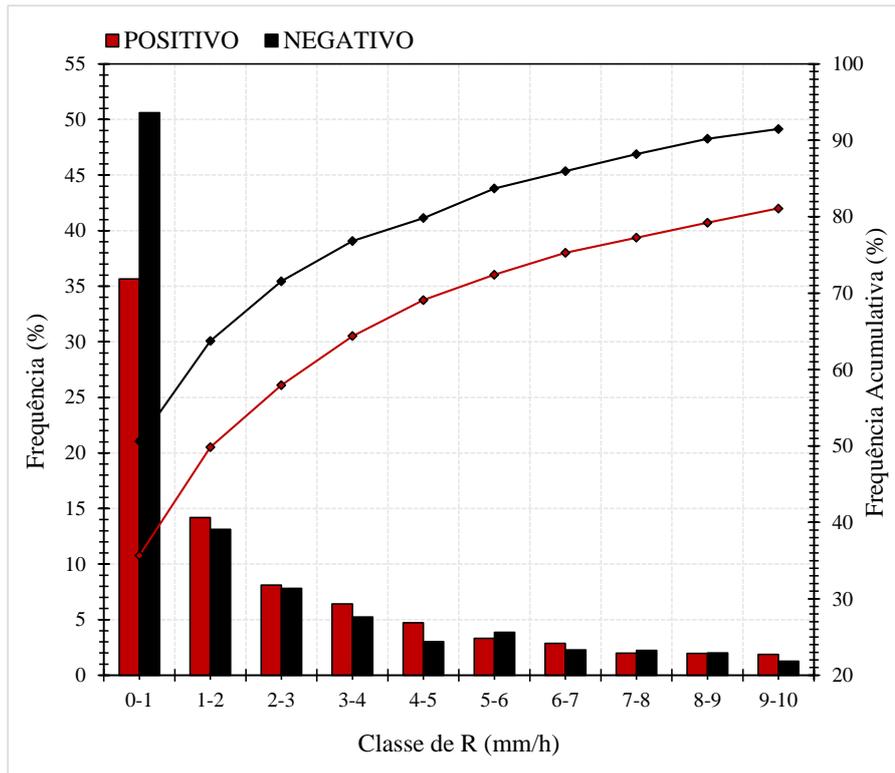


Figura 5.15 -Histograma de frequência (barras) e frequência acumulativa (linhas) da taxa de precipitação (mm/h) para o campo elétrico positivo (vermelho-vinho) e negativo (preto).

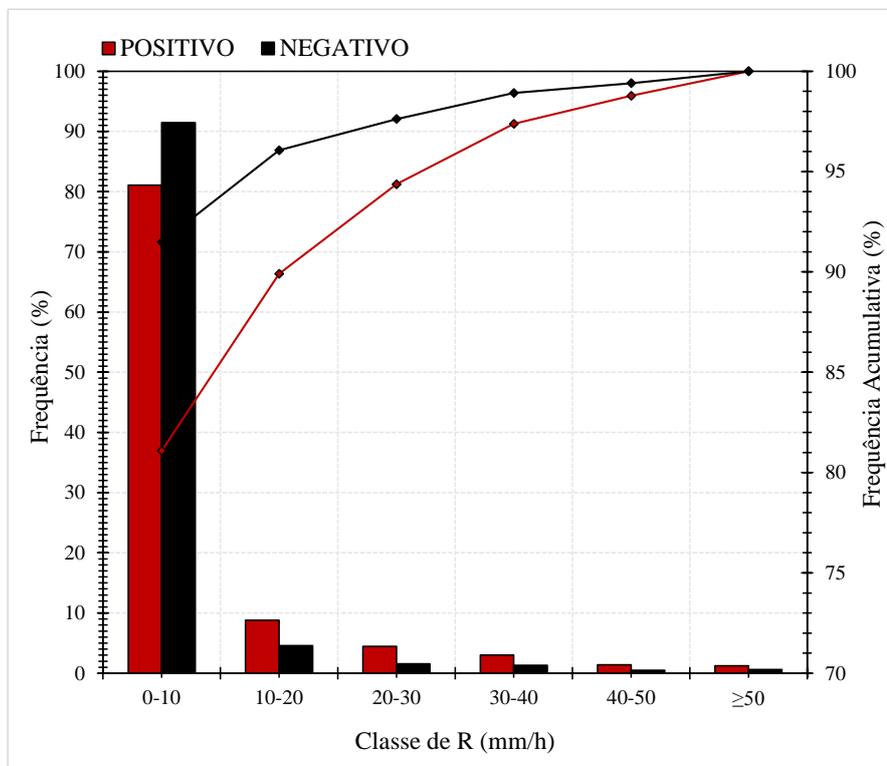


Figura 5.16 -Similar a Figura 4.15, porém, para intervalo de classe de R de 10 mm/h.

Para todo o conjunto de R, o histograma da Figura 5.16 revela que os intervalos de chuva com campo elétrico positivo possuem maior frequência relativa em todas as classes de R. Destaca-se também, a frequência acumulativa para R maiores que 20 mm/h. Para o campo elétrico positivo, 10% de toda chuva observada tem R maior que 20 mm/h. Já para o campo elétrico negativo, este percentual é de 4%. Desta forma, destaca-se que quando o campo elétrico é positivo as taxas de precipitação são mais intensas que quando o campo elétrico é negativo.

Os resultados anteriores mostram que, as chuvas com medidas de campo elétrico positivo, tendem a produzir com mais frequência R menores que 1 mm/h. Para as classes de R entre 1 e 10 mm/h, os dois grupos apresentam frequências relativas similares. Para todo o conjunto de R, as distribuições indicam que, quando a chuva observada possui campo elétrico positivo, produz com mais frequência R superiores a 10 mm/h. Por fim, estes resultados mostram que R varia significativamente em função das medidas de campo elétrico.

5.3.2. Distribuição do Tamanho de Gotas

Para analisar a variação da DSD de acordo com a intensidade da chuva, a Figura 5.17 apresenta um painel com as DSDs médias, em intervalos de R, para os intervalos de chuva observados com campo elétrico positivo e negativo. Análogo ao observado nas DSDs médias das tempestades com e sem descargas elétricas, e dos estágios de atividade elétrica das tempestades elétricas, as curvas de DSDs médias são do tipo gama com fator de forma negativo. Novamente, nota-se diferenças significativas nas DSDs médias à medida que R aumenta.

Para baixas intensidades de chuva ($R < 1$ mm/h, A Figura 5.17a) observam-se diferenças nas concentrações médias nos dois extremos das DSDs médias, ou seja, as chuvas com EN possui maior concentração média de gotas com diâmetros acima de 2,5 mm e menor concentração média de gotas com diâmetros menores que 1 mm. Logo, para R menores que 1 mm/h, as chuvas com EN são mais efetivas na produção de gotas maiores pelo processo de colisão e coalescência. Para R entre 1 e 10 mm/h (Figura 5.17b) as chuvas com EN também apresentam maior concentração média de gotas com diâmetros acima de 2,5 mm. Neste intervalo, também se observa uma menor concentra-

ção média de gotas com diâmetros entre 1 e 2 mm. Este resultado é semelhante para R entre 10 e 20 mm/h (Figura 5.17c). Estes resultados indicam que as DSDs coletadas durante intervalos de chuva com EN e EP são diferentes e estão relacionadas com o tipo de hidrometoro que resultou nas gotas de chuva na superfície. Por exemplo, medidas de EN indicam hidrometeoros com carga positiva (cristais de gelo) e medidas de EP indicam hidrometeoros com carga negativa (granizo e graupel). Desse modo, os cristais de gelo que precipitam das tempestades tendem a crescerem (processo de agregação) e resultarem em gotas grandes de chuva. Os resultados também indicam que o processo de quebra é mais efetivo sobre as gotas de chuva resultantes da precipitação do granizo.

Para R entre 20 e 40 mm/h (Figuras 5.17d e 5.17e), as DSDs médias indicam “suaves” diferenças nas concentrações médias de gotas, e ainda mostrando que as chuvas com CN possuem maior concentração média de gotas grandes. Este resultado mostra que, mesmo como o aumento da intensidade da chuva, a produção de gotas grandes ainda é mais efetiva nas chuvas com CN.

Para R maiores que 40 mm/h (Figuras 5.17f e 5.17g), é possível destacar a mudança das DSDs médias, onde as chuvas com CP apresentam a maior concentração média de gotas com diâmetros acima de 2 mm. Este resultado indica que, para este limiar de 40 mm/h, os processos que favorecem a formação de gotas grandes passam a ser mais efetivos nas chuvas com CN. Figura 5.17g também indica o processo de quebra de gotas durante a precipitação. Nota-se um aumento significativo na concentração média de gotas menores que 0,5 mm para os dois grupos. Este resultado também indica que o processo de quebra é mais efetivo durante as chuvas com CP.

A Figura 5.17h apresenta as DSDs médias para todo o conjunto de DSDs, ou seja, para R maiores que 0,1 mm/h. Nota-se que as chuvas com CP possuem a maior concentração média de gotas em todas as classes de diâmetro. Também é observado uma diferença significativa nas R médias (7,17 mm/h versus 3,92 mm/h), ou seja, as chuvas com CP possuem com mais frequência R mais intensas, conforme observado nos resultados do item 5.3.1.

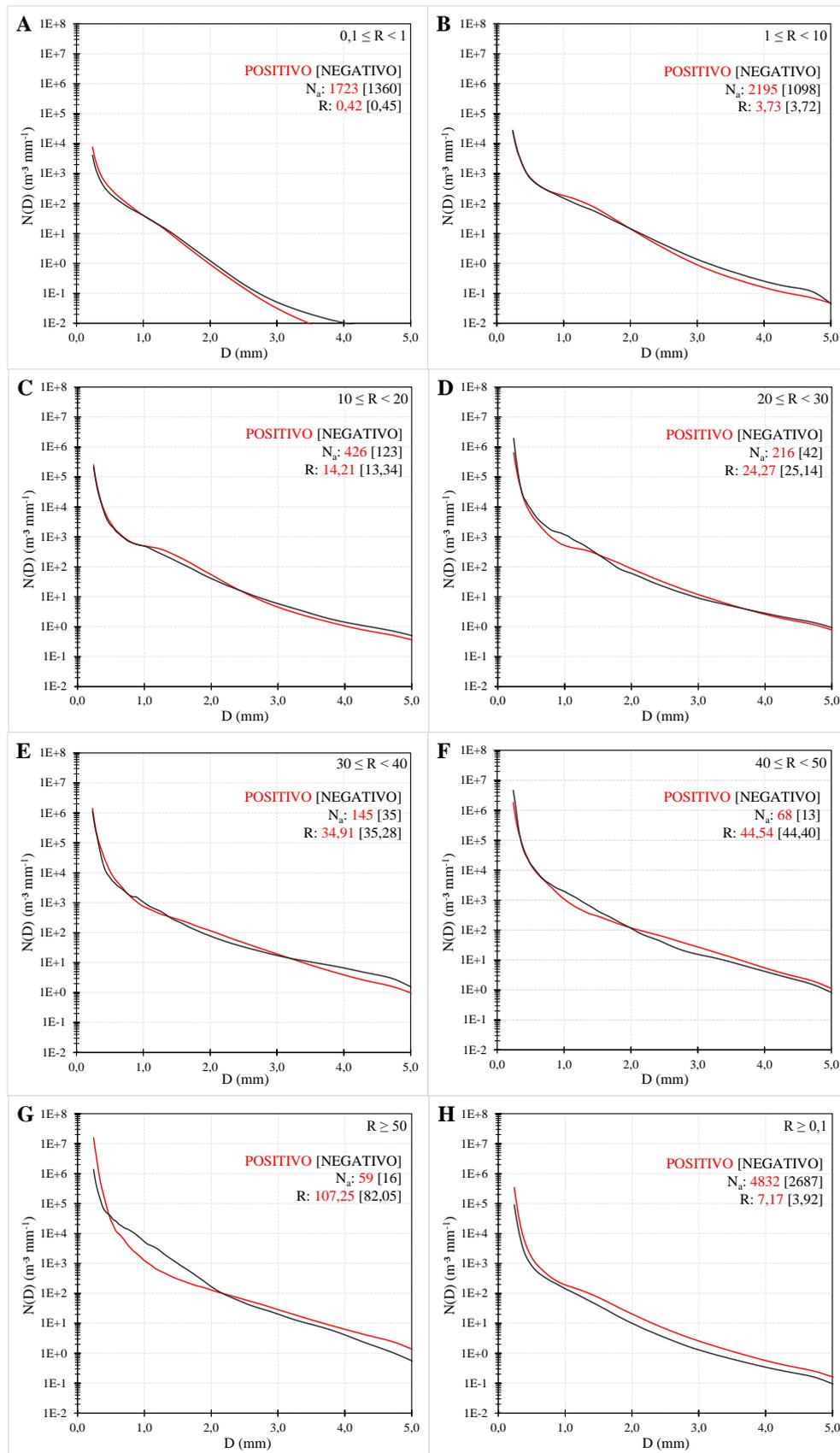


Figura 5.17 - Painele com a distribuição de tamanho de gotas em função das classes de R (A-H) para as chuvas do grupo positivo (vermelho-vinho) e negativo (preto). Para cada classe de R é mostrada a informação do número de amostras (N_a) e a taxa de precipitação média (R , em mm/h) de cada tempestade.

A Figura 5.18 apresenta a DIF da concentração média de gotas entre as chuvas com CP e CN e para intervalos de R iguais a 0,5 mm/h. Este resultado mostra que as chuvas com CP possuem maior concentração média de gotas com diâmetros maiores que 2 mm, em praticamente (com algumas exceções) todas as classes de R. Já as chuvas com CN possuem a maior concentração média de gotas com diâmetros menores que 2 mm. Isto também foi observado nas Figuras 5.17a e 5.17b. Para R menores que 10 mm/h, os resultados indicam que as chuvas com excesso de cargas positivas, ou seja, com CN, possuem maior concentração de gotas com diâmetros acima de 2 mm em comparação as chuvas com excesso de cargas negativas (com CP).

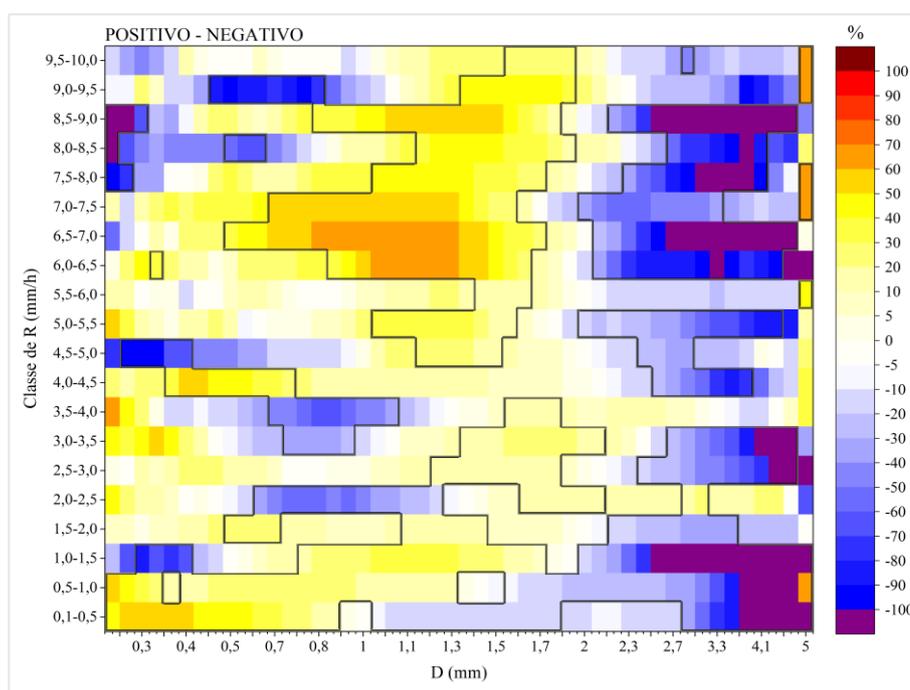


Figura 5.18 - Gráfico de contorno mostrando a diferença percentual (DIF, em %) da concentração média de gotas em intervalos de R (mm/h) para as chuvas do grupo positivo e negativo.

A Figura 5.19 apresenta a DIF da concentração média de gotas entre as chuvas com CP e CN, para R maiores que 10 mm/h e intervalos de R iguais a 10 mm/h. Os resultados indicam que as chuvas com CN possuem maior concentração média de gotas grandes para R menores que 30 mm/h. Entretanto, é possível observar que à medida que R aumenta, as chuvas com CP apresentam uma tendência de aumento na concentração média de gotas médias e grandes. Dessa forma, para R maiores que 30 mm/h, as chuvas com CP positivo passam a apresentar a maior concentração média de gotas grandes. Este resultado mostra que as chuvas com excesso de cargas negativas (com CP) tendem a ser mais efetivas na produção de gotas grandes à medida que a intensidade da chuva

aumenta.

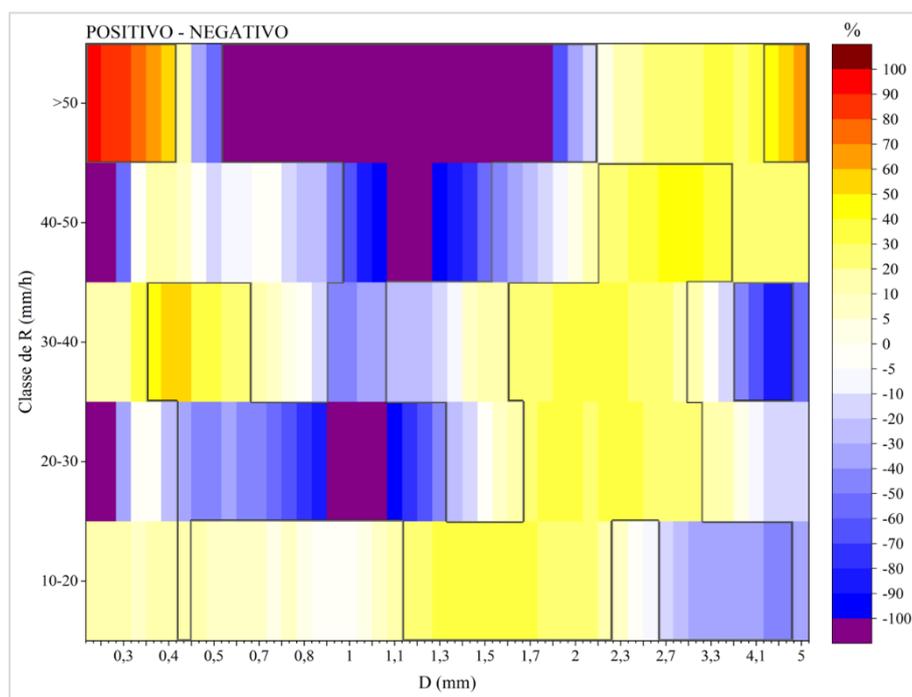


Figura 5.19 - Similar a Figura 5.18, porém, para intervalo de R igual a 10 mm/h.

Os resultados sobre as DSDs médias em intervalos de R mostraram as diferenças entre as chuvas observadas com CP e CN. Assim, pode ser observado que para R menores que 10 mm/h, as chuvas com CN possuem a maior concentração de gotas grandes. Assim, os processos de crescimento de gotas são mais efetivos quando a chuva apresenta excesso de cargas positivas (cristais de gelo e neve). Em contrapartida, o processo de quebra é mais efetivo quando a chuva apresenta excesso de cargas negativas (graupel e granizo). Já para R maiores que 10 mm/h, foi observado uma tendência de aumento (diminuição) na concentração de gotas médias a grandes para as chuvas com CP (CN). A seguir, o item 5.3.3 apresenta as diferenças nas distribuições do Dm em função dos intervalos de R.

5.3.3. Distribuição do Diâmetro Mediano

Similar a Figura 5.6, a Figura 5.20 apresenta a distribuição do Dm para R menores que 10 mm/h e intervalos de R iguais a 0,5 mm/h. É possível destacar, desde a primeira classe de R (R entre 0,1 e 0,5 mm/h), que as distribuições do Dm para as chuvas com CN são mais deslocadas para valores maiores de Dm (observar P75 e P90). Esse efeito é devido as chuvas com CN possuírem a maior concentração de gotas grandes, conforme observado nos resultados anteriores. As diferenças entre as distribuições são

mais significativas nas classes de R com demarcações (pontos vermelhos, teste t Student). Desse modo, os valores do D_m variam de 0,6 a 2,8 mm (P10 a P90) para as chuvas com CP e de 0,7 a 3,2 mm para as chuvas com CN.

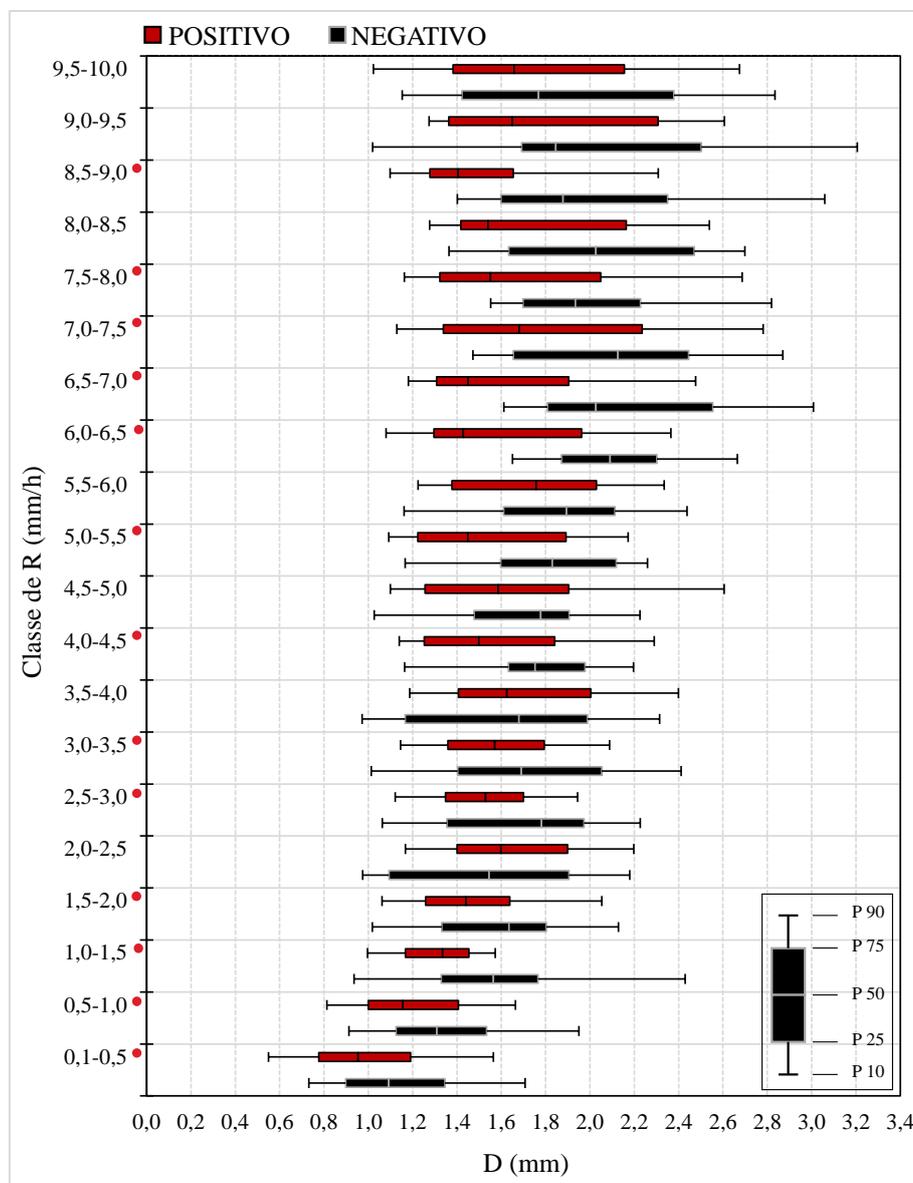


Figura 5.20 - Painel com gráfico boxplot mostrando a distribuição do diâmetro mediano das gotas (D_m) em função dos intervalos de R (mm/h) para as chuvas do grupo positivo (vermelho-vinho) e negativo (preto). As classes de R demarcadas por um ponto vermelho remetem ao intervalo onde as médias amostrais foram consideradas iguais (teste t Student para 90% de confiança).

Similar a Figura 5.20, a Figura 5.21 apresenta a distribuição do D_m para R maior que 1 mm/h e intervalos de R iguais a 10 mm/h. É possível observar a diferença nas distribuições do D_m para R entre 1 e 10 mm/h. Este resultado resume o que foi observado na figura anterior, que mostra uma frequência maior de valores maiores de D_m para as chuvas com CN.

Para R entre 10 e 40 mm/h (Figura 5.21) as distribuições do Dm atingem os maiores valores para o P75 e P90 em ambos os grupos de chuva. Por exemplo, o maior P90 obtido para as chuvas com CN foi de 3,8 mm, já para as chuvas com CP o maior P90 foi de 2,8 mm. Essa diferença indica como é grande a contribuição das gotas grandes nas chuvas com CN para este limiar de R. Para R maiores que 40 mm/h, é observado uma mudança nas distribuições de Dm, ou seja, as distribuições do Dm para as chuvas com CN estão mais (menos) deslocadas a esquerda para R entre 40 e 50 mm/h (> 50 mm/h). Este resultado indica como a efetividade do processo de quebra de gotas pode variar de acordo com a intensidade da chuva. De qualquer modo, destaca-se que para R maiores que 50 mm/h, as chuvas com excesso de cargas negativas (com CP) possuem, com mais frequência, valores menores de Dm.

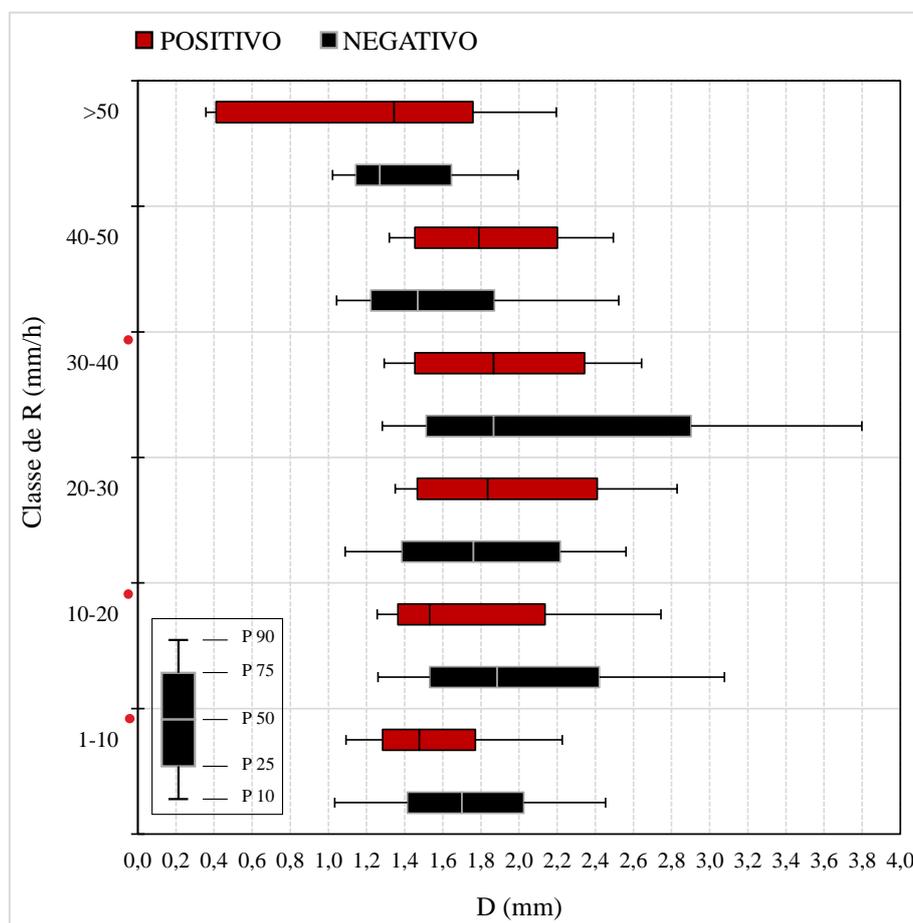


Figura 5.21 - Similar a Figura 5.20, porém, para intervalos de R igual a 10 mm/h.

Na Tabela 5.3, os valores médios de R indicam que as chuvas com CP geram, com mais frequência, intensidades de R maiores. Assim como na comparação das tempestades com e sem descargas elétricas, a diferença é bastante significativa, ou seja, 83% maior para o grupo positivo. Com relação ao Dm, o valor médio é maior para as

chuvas com CN (1,53 mm versus 1,45 mm). Por fim, o teste t Student indica que as médias são diferentes, tanto para a taxa de precipitação quanto para o diâmetro mediano.

Tabela 5.3 -Tabela com os valores da média, desvio padrão e o valor obtido para o teste t Student (T Obtido) da taxa de precipitação (mm/h) e diâmetro mediano (mm) para as chuvas do grupo positivo e negativo.

Conjuntos	Taxa de Precipitação (mm/h)			Diâmetro Mediano (mm)		
	Média	Desvio P.	T Obtido	Média	Desvio P.	T Obtido
Positivo	7,17	17,19	10,70	1,45	0,56	-5,79
Negativo	3,92	9,13		1,53	0,62	

6. CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho de pesquisa foi o de caracterizar a distribuição de tamanho de gotas de chuva observada em tempestades com e sem descargas elétricas a partir de um radar de chuva de apontamento vertical instalado nas dependências do IAG/USP durante o período de dezembro de 2015 e março de 2020. Este estudo ficou restrito a 94 eventos de chuva, que totalizaram 117,87 horas de observações, representados por 42 mil e 431 distribuições de tamanho de gotas com intervalos de 10 segundos de acumulação. Neste conjunto de dados foram observadas 43 tempestades com atividade elétrica detectada pela rede detecção de descargas elétricas LINET nas proximidades da Universidade de São Paulo (até 5 km de distância) e 51 sem nenhuma descarga elétrica (até 50 km de distância). A caracterização microfísica (distribuição de tamanho de gotas, taxa de precipitação e diâmetro mediano) foi analisada em função da atividade elétrica (com e sem descargas elétricas), da polaridade do campo elétrico vertical e do estágio da atividade elétrica.

Os resultados apresentados mostraram claramente que as distribuições de tamanho de gotas aproximam-se de uma função gama com fator de forma negativo, são estatisticamente diferentes entre as tempestades com e sem descargas elétricas, entre os diferentes estágios da atividade elétrica e a polaridade do campo elétrico vertical.

As tempestades com descargas elétricas apresentaram taxas de precipitação mais elevadas (7,15 mm/h) do que os sistemas precipitantes sem atividade elétrica (3,11 mm/h). 59% (73%) das distribuições de tamanho de gotas dos sistemas precipitantes sem atividade elétrica tinham taxa de precipitação inferior a 2 mm/h (3mm/h), enquanto que os sistemas com descargas elétricas tinham 44% (51%) das observações. Para taxas maiores que 10 mm/h (20 mm/h), as tempestades com descargas elétricas tinham 18% (9%) das distribuições, enquanto que os sistemas sem descargas elétricas tinham 6% (2%) das observações. Ao analisar as distribuições de tamanho de gotas, as tempestades com descargas elétricas apresentaram uma maior concentração de gotas com diâmetro maior que 2 mm, enquanto que os sistemas precipitantes sem atividade elétrica tinham maior concentração para diâmetros menores que 2 mm, similar ao observado por Mundiari et al. (2018) e Chatterjee e Das (2020). Ao investigar as diferenças estatisticamente significativas entre as distribuições de tamanho de gotas em função da taxa de precipitação, foi possível observar que as tempestades com descargas elétricas têm concentra-

ções mais altas de gotas acima de 2 mm, enquanto que as sem descargas elétricas é maior entre 0,5 e 1,5 mm. Por fim, observou-se que o diâmetro mediano das gotas aumentava com a taxa de precipitação até ~5 mm/h, mantendo-se constante até 30 mm/h e depois diminuía. As tempestades com descargas elétricas tinham um diâmetro mediano de 1,44 mm e as sem descargas elétricas 1,17 mm. Estes resultados evidenciam claramente que as tempestades com descargas elétricas e sem descargas elétricas têm distribuições de tamanho de gotas diferentes, que por sua vez refletem os processos de crescimento de gotas de chuva predominantes. De uma forma geral, é possível afirmar que os processos de colisão seguido de coalescência (fase quente) e acreção (fase mista) contribuem para formar gotas de chuva maiores para as tempestades com descargas elétricas, do que os processos de colisão seguido de coalescência e quebra (fase quente) e agregação (fase fria) que acabam produzindo uma maior concentração de gotas menores para os sistemas precipitantes sem descargas elétricas.

Ao analisar como as distribuições de tamanho de gotas variavam entre os diferentes estágios de atividade elétrica, ou seja, desenvolvimento (aumento), maturação (estabilização) e dissipação (diminuição), observou-se que durante o estágio de desenvolvimento a taxa de precipitação média é mais alta, ou seja, 9,03 mm/h, e é seguida pelo estágio de maturação com 7,81 mm/h e dissipação com 5,02 mm/h. Já em relação às gotas de chuva, o estágio de dissipação apresentou os maiores diâmetros medianos, ou seja, 1,57 mm, seguido do estágio de maturação com 1,53 e desenvolvimento com 1,48 mm. Estes resultados podem estar relacionados com o predomínio de certos processos de crescimento de gotas em função da atividade elétrica. Por exemplo, durante a fase de desenvolvimento, período onde as correntes ascendentes são mais fortes, devemos ter a formação de graupel e granizo pelo processo de *riming* e acreção que podem produzir taxas de precipitação mais elevadas. Já na fase de dissipação, predomínio de correntes descendentes, os cristais de gelo formados por agregação são predominantes e precipitam com o graupel e granizo remanescentes. Consequentemente, produzem gotas de chuva maiores, mas como tem menos gotas acabam produzindo um volume de chuva menor.

Por fim, as tempestades elétricas foram analisadas em função da polaridade do campo elétrico vertical, pois a polaridade pode indicar qual tipo de hidrometeoro gerou a gota de chuva que está precipitando. 81% (35%) das tempestades elétricas com campo elétrico negativo tinham taxa de precipitação inferior a 10 mm/h (1 mm/h), já as com

campo elétrico positivo esta fração era de 91% (50%). As distribuições de tamanho de gotas mostram que as tempestades elétricas com campo elétrico negativo tinham maior concentração de gotas para diâmetros maiores que 2,3 mm e as com campo elétrico positivo tem maiores concentrações para gotas menores que 1,7 mm. O diâmetro mediano segue a mesma tendência, ou seja, as precipitações com campo elétrico negativo têm diâmetro mediano igual a 1,53 mm contra 1,45 mm durante o período que a chuva tem campo elétrico positivo. Estes resultados são consistentes com a literatura (Saunders, 1993; Takahashi, 1978), pois os agregados, cristais de gelo e flocos de neve adquirem cargas positivas e produzem um campo elétrico negativo na superfície quando precipitam, já o graupel e o granizo tem uma tendência de estarem carregados negativamente e, portanto, produzem campo elétrico positivo na superfície. Além disso, as partículas menos densas como os agregados, cristais de gelo e flocos de neve derretem, colidem com as gotas de chuva, coalescem e se quebram a parte, formando gotas de chuva maiores e bem pequenas, o que explica as taxas de precipitação mais baixas. Já o graupel e granizo são partículas mais densas e ao derreterem formam gotas menores e medianas que colidem e coalescem e produzem taxas de precipitação mais altas. Dessa maneira, é possível confirmar que chuvas com campo elétrico positivo estão associadas aos processos de acreção enquanto que as de campo elétrico negativo à agregação.

Finalmente, baseado nos resultados obtidos neste estudo é possível responder os objetivos específicos propostos:

- i. *A DSD é diferente para tempestades com e sem descargas elétricas?* Sim, e as distribuições de tamanho de gotas revelam que diferentes processos de crescimento de gotas predominam quando temos tempestades com descargas elétricas e sem descargas elétricas. Este resultado comprova que as partículas mais densas, tais como o graupel e granizo, ao derreterem formam gotas de chuva medianas que capturam as gotículas menores e assim aumentam a concentração de gotas maiores que 2-3 mm pelo processo de colisão seguido de coalescência. Já as tempestades sem descargas elétricas são provenientes de partículas de gelo menos densas que ao derreterem formam gotas grandes que colidem com as gotas menores e se quebram a parte, logo aumentando a concentração de gotas pequenas e diminuindo a concentração de gotas grandes.
- ii. *Que processos microfísicos, que interferem na DSD, podem ser observados nas*

tempestades com e sem descargas elétricas? Na fase fria e mista das tempestades, ficou evidente que as tempestades com descargas elétricas estão associadas com o processo de acreção enquanto que as sem descargas elétricas com agregação. Já na fase quente, as partículas de gelo derretem ao cruzarem a isoterma de 0°C e começam a colidir entre si e os processos de coalescência e quebra são ativados. Nas tempestades com descargas elétricas, as gotas medianas crescem por coalescência e produzem uma maior concentração de gotas grandes, enquanto que nas tempestades sem descargas elétricas, as gotas grandes colidem e se quebram a parte, aumentando a concentração de gotas pequenas e medianas.

- iii. *A atividade elétrica varia em função da DSD?* As DSDs observadas durante os estágios de desenvolvimento e maturação das tempestades com descargas elétricas são similares e diferentes do estágio de dissipação. O estágio de dissipação apresenta a maior concentração de gotas grandes, enquanto que os estágios de desenvolvimento e maturação apresentam a maior concentração de gotas pequenas e medianas. Estes resultados são condizentes com os movimentos verticais e formação de partículas sólidas na fase mista e fria da nuvem. Por exemplo, durante a fase de desenvolvimento e maturação, as correntes ascendentes produzem maior supersaturação e acabam formando mais gotículas de água super-resfriada, partículas de gelo por deposição, congelamento (graupel) e acreção (granizo). Estas condições por sua vez favorecem a separação de cargas e o aumento da atividade elétrica, bem como a produção de gotas pequenas e medianas devido aos processos de derretimento, evaporação e coalescência. Já na fase de dissipação, as correntes descendentes são predominantes e a supersaturação diminui, o que favorece a formação de cristais de gelo e agregados que não transferem muita carga e, portanto, formam poucas descargas elétricas. Estes cristais por sua vez derretem e coalescem, formando assim gotas de chuva maiores.
- iv. *De acordo com a DSD observada, a polaridade do campo elétrico está associada com algum processo microfísico?* A chuva associada com campo elétrico positivo está associada com o processo de acreção, enquanto que o processo de agregação está associado com campo elétrico negativo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AJAYI, G. O.; OLSEN, R. L. Modeling of a tropical raindrop size distribution for microwave and millimeter wave applications. *Radio Science*, v. 20, n. 2, p. 193-202, 1985.
- ALBRECHT, R. I.; GOODMAN, S. J.; BUECHLER, D. E.; BLAKESLEE, R. J.; CHRISTIAN, H. J. Where are the lightning hotspots on Earth? *American Meteorological Society*, v. 97, n. 11, p. 2051 -2068, 2016.
- ATLAS, D.; SRIVASTAVA, R.; SEKHON, R. S. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence. *Reviews of Geophysics*, v. 11, n. 1, p. 1-113, 1973.
- ATLAS, D.; ULBRICH, C. W.; MENEGHINI, R. The multi-parameter remote measurement of rainfall. *Radio Science*, v. 19, p. 3-22, 1984.
- BENTLEY, W. A. Studies of raindrops and raindrop phenomena. *Monthly Weather Review*, v. 32, n. 10, p. 450-456, 1904.
- BETZ, H. D.; SCHMIDT, K.; LAROCHE, P.; OETTINGER, W. P.; DEFER, E.; DZIEWIT, Z.; KONARSKI, J. LINET - An international lightning detection network in Europe. *Atmospheric Research*, v. 91, n. 2 -4, p. 564 -573, 2009.
- BRINGI, V. N.; WILLIAMS, C. R.; THURAI, M.; MAY, P. T. Using dual-polarized radar and dual-frequency profiler for DSD characterization: a case study from Darwin, Australia. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 26, n. 10, p. 2107 -2122, 2009.
- BRINGI, V.N.; CHANDRASEKAR, V.; HUBBERT, J.; GORGUCCI, E.; RANDEU, W. L.; SCHOENHUBER, M. Raindrop size distribution in different climatic regimes from disdrometer and dual-polarized radar analysis. *Journal of the Atmospheric Science*, n. 60, p. 354 -365, 2003.
- CAMPBELL SCIENTIFIC (2017). CS110 Electric Field Meter Overview. Disponível em: https://s.campbellsci.com/documents/us/technical-papers/cs110_overview.pdf. Acesso em: 05 de março de 2023.
- CAREY, L. D.; RUTLEDGE, S. A. The relationship between precipitation and lightning in tropical island convection: a c-band polarimetric radar study. *Monthly Weather Review*, v. 128, n. 8, p. 2687 -2710, 2000.

CHAKRAVARTY, K.; MURUGAVEL, P.; CHRISTY, A. A.; SINGH, V.; PANDITHURAI, G. Impact of electrified and non-electrified clouds on the inter-seasonal characteristics of surface-based precipitation. *Journal of Earth System Science*, v. 129, p. 169, 2020.

CHATTERJEE, C.; DAS, S. On the association between lightning and precipitation microphysics. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 207, 2020.

DEFANT, A. Gesetzmässigkeiten in der Verteilung der Verschiedenen Tropfengrößen bei Regrefällen. *K. Akad. Wiss., Math.-Naturw. Klasse SitzBer.*, v.5, p. 585-646, 1905.

DIERMENDJIAN, D. *Electromagnetic scattering on spherical polydispersions*. American Elsevier Publishing Co., 1969, 290 p.

DOS SANTOS, A. M. B. *Estrutura cinemática e microfísica de chuva observada durante os experimentos de campo do projeto CHUVA*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 2016.

FANG, D. J.; CHEN, C. H. Propagation of centimeter/millimeter waves along a slant path through precipitation. *Radio Science*, v. 17, n. 5, p. 989-1005, 1982.

FEINGOLD, G.; LEVIN, Z. The lognormal fit to raindrop spectra from frontal convective clouds in Israel. *Journal of Applied Meteorology*, v. 25, n. 10, p. 1346-1364, 1986.

FOSTER, P; PEREIRA FILHO, A; HALLAK, R. Raindrop size distribution and rainfall in São Paulo, Brazil. *In: 10th International Precipitation Conference, 2010, Coimbra*. Coimbra: IMAR, 2010.

GEO - CIDADE DE SÃO PAULO. *Panorama geral do meio ambiente urbano*. Prefeitura do Município de São Paulo (PMSP), 2004, 198 p.

GRENET G., Essai d'Explication de la Charge Électrique des Nuages d'Orages Ann. Geophys., 3 306-307, 1947.

GUNN, R.; KINZER, G. D. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air, *Journal of Meteorology*, v. 6, n. 4, p. 243-248, 1949.

HOUZE JR, R. *Cloud dynamics*. 2ª edição. Academic Press, 2014, 496 p.

IAG/USP. Boletim climatológico anual da estação meteorológica do IAG/USP-2017.

Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, v. 20, 2017.

JANAPATI, J.; SEELA, B. K.; M. V. R.; K. K. R.; LIN, P. L.; T. N. R.; LIU, C. Y. A study on raindrop size distribution variability in before and after landfall precipitations of tropical cyclones observed over southern India. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 159, p. 23-40, 2017.

JOSS, J.; WALDVOGEL, A. Ein Spektrograph für Niederschlagstropfenmitautomatischer Auswertung. *Pure and Applied Geophysics*, v. 68, p. 240-246, 1967.

KIM, D. K.; LEE, D. I. Raindrop size distribution and vertical velocity characteristics in the rainband of Hurricane Bolaven observed by a 1290MHz wind profiler. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 155, p. 27-35, 2017.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. Klimate der Erde. Wall-map 150 cm x 200 cm. *Verlag Justus Perthes*, 1928.

KRISHNA, U. V. M.; REDDY, K. K.; SEELA, B. K.; SHIROOKA, R., Lin, P. L.; PAN, C. J. Raindrop size distribution of easterly and westerly monsoon precipitation observed over Palau islands in the Western Pacific Ocean. *Atmospheric Research*, v. 174-175, p. 41-51, 2016.

LAWS, L. O.; PARSONS, D. A. The relation of raindrop size to intensity. *Transactions American Geophysical Union*, v. 24, n. 2, p. 452-460, 1943.

LENARD, P. Ueber Regen. *Met. Zs.*, v. 21, p. 248-262, 1904.

MACIEL, L. M.; ASSIS, M. S. Tropical rainfall drop-size distribution. *Int. J. Satel. Comm.*, v. 8, p. 181-186, 1990.

MAKI, M.; KEENAN, T. D.; SASAKI, Y.; NAKAMURA, K. Characteristics of the raindrop size distribution in tropical continental squall lines observed in Darwin, Australia. *Journal of Applied Meteorology*, v. 40, n.8, p. 1393 -1412, 2001.

MARSHALL, J. S.; PALMER, W. M. K. The distribution of raindrop with size. *Journal of Meteorological*, v. 5, p. 165-166, 1948.

MARSHALL, T. C., and STOLZENBURG, M., Estimates of cloud charge densities in thunderstorms, *J. Geophys. Res.*, 103 (D16), 19769-19775, 1998.

MARZUKI, M; HASHIGUCHI, H.; YAMAMOTO, M. K.; MORI, S.; YAMANAKA, M. D. Regional variability of raindrop size distribution over Indonesia. *Annales Geophysicae*, v. 31, p. 1941-1948, 2013.

METEK - METEOROLOGISCHE MESSTECHNIK GMBH. *MRR physical basis*. Meteorologische Messtechnik GmbH, 2009, 20 p.

MORAIS, M. A.; CASTRO, W. A. C.; TUNDISI, J. G. Climatologia de frentes frias sobre a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), e sua influência na limnologia dos reservatórios de abastecimento de água. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 25, n. 2, p. 205-217, 2010.

MORALES, C. A R. Results of GV measurements of STARNET and LINET in Brazil, 2017 GLM Annual Science Team Meeting, GLM Post Launch Test Results and the Path to Provisional Validation Maturity, The University of Alabama in Huntsville, 12-14 September, 2017.

MORALES, C. A. R. *Distribuição de tamanho de gotas de chuva nos trópicos: ajuste de uma função gamma e aplicações*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 1991.

MORALES, C. A.; ALBRECHT, R. I.; ANSELMO, E. M; GOMES, E. F.; LACERDA, M. Describing the electrical nature of the Amazon thunderstorms during the 2nd GO-Amazon IOP and ACRIDICON-CHUVA field campaign. Workshop on Aerosol-Cloud-Precipitation Interactions in Amazonia during the ACRIDICON-CHUVA Campaign, 29 de fev - 3 mar 2016, Ilha Bela, São Paulo, Brasil.

MUDIAR, D.; HAZRA, A.; PAWAR, S. D.; KARUMURI, R. K.; KONWAR, M.; MUKHERJEE, S.; SRIVASTAVA, M. K.; GOSWAMI, B. N. WILLIAMS E. Role of electrical effects in intensifying rainfall rates in the tropics. *Geophysical Research Letters*, v. 49, 2021b.

MUDIAR, D.; PAWAR, S. D.; GEOPALAKRISHNAN, V.; WILLIAMS, E. Electric field enlarges raindrops beneath electrified clouds: observational evidence. *Geophysical Research Letters*, v. 48, 2021a.

MUDIAR, D.; PAWAR, S. D.; HAZRA, A.; KONWAR, M.; GOPALAKRISHNAN, V.; SRIVASTAVA, M. K.; GOSWAMI, B. N. Quantification of observed electrical effect on the raindrop size distribution in tropical clouds. *Journal of Geophysical Re-*

search: *Atmospheres*, v. 123, n. 9, p. 4527-4544, 2018.

NACCARATO, K. P.; PINTO JR, O.; PINTO, I. R. C. A. Evidence of thermal and aerosol effects on the cloud-to-ground lightning density and polarity over large urban areas of Southeastern Brazil. *Geophysical Research Letters*, v. 30, n. 13, 2003.

NZEUKOU, A.; SAUVAGEOT, H.; OCHOU, A. D.; KEBE, C. M. F. Raindrop size distribution and radar parameters at Cape Verde. *Journal of Applied Meteorology*, v. 43, n. 1, p. 90-105, 2004.

PEREIRA FILHO, A. J. Radar measurements of tropical summer convection: urban feedback on flash floods. In: *29th International Conference on Radar Meteorology*, Montreal, 1999.

PLYMOUTH STATE UNIVERSITY. The collision and coalescence process. Disponível em: <https://vortex.plymouth.edu/dept/tutorials/precip/precip2aaa.html>. Acesso em: 05 de março de 2023.

ROBERTO, N.; ADIROSI, E.; BALDINI, L.; CASELLA, D.; DIETRICH, S.; GATLIN, P.; PANEGROSSI, G.; PETRACCA, M.; SANÒ, P.; TOKAY, A. Multi-sensor analysis of convective activity in central Italy during the HyMeX SOP 1.1. *Atmospheric Measurement Techniques*, v. 9, p. 535 -552, 2016.

ROSENFELD, D.; ULBRICH, C. W. Cloud microphysical properties, processes, and rainfall estimation opportunities. *Meteorological Monographs*, v. 52, p. 237 -258, 2003.

SAUNDERS, C. P. R. A Review of Thunderstorm Electrification Processes, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 32(4), 642-655, 1993.

SAUNDERS, C. P. R.; BAX-NORMAN, H.; EMERSIC, C.; AVILA, E. E.; CASTELLANO, N. E. Laboratory studies of the effect of cloud conditions on graupel/ crystal charge transfer in thunderstorm electrification. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 132, p. 2653 -2673, 2004.

SAYLOR, R. R.; ULBRICH, C. W.; BALLENTINE, J. W.; LAPP, J. L. The correlation between lightning and DSD parameters. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 43, n8, p. 1806- 1815, 2005.

SEELA, B. K., JANAPATI, J., Lin, P. L., REDDY, K. K., SHIROOKA, R., & WANG, P. K. A comparison study of summer season raindrop size distribution between Palau

and Taiwan, two islands in western Pacific. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 122, n. 21, p. 11787-11805, 2017.

SEELA, B. K.; JANAPATI, J.; LIN, P. L.; WANG, P. K.; LEE, M. T. Raindrop size distribution characteristics of summer and winter season rainfall over north Taiwan. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 123, n. 20, p. 11602-11624, 2018.

SILVA DIAS, P. L.; ETCHICHURY, P.; SCOLAR, J.; PEREIRA FILHO, A. J.; SATYAMURTI, P.; SILVA DIAS, M. A. F.; GRAMMELSBACHER, I.; GRAMMELSBACHER, E. As chuvas de março de 1991 na região de São Paulo. *Climanálise*, v. 6, p. 44-59, 1991.

SILVA, F. D. S.; PEREIRA FILHO, A. J.; HALLAK, R. Classificação de sistemas meteorológicos e comparação da precipitação estimada pelo radar e medida pela rede telemétrica na bacia hidrográfica do alto Tietê. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 24, n. 3, p. 292-307, 2009.

TAKAHASHI, T. Riming Electrification as a Charge Generation Mechanism in Thunderstorms, *Journal of Atmospheric Sciences*, 35(8), 1536-1548, 1978.

TAPIA, A.; SMITH, J. A.; DIXON, M. Estimation of convective rainfall from lightning observations. *Journal of Applied Meteorology*, v. 37, n. 11, p. 1497 -1509, 1998.

TENORIO, R. S.; MORAES, M. C. S.; KWON, B. H. Raindrop distribution in the Eastern Coast of Northeastern Brazil using disdrometer data. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 25, n. 4, p. 415-426, 2010.

TENÓRIO, R. S.; MORAES, M. C. S.; SAUVAGEOT, H. Raindrop size distribution and radar parameters in coastal tropical rain systems of northeastern Brazil. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 51, n. 11, p. 1960 -1970, 2012.

TOKAY, A.; BASHOR, P. G.; HABIB, E.; KASPARIS, T. Raindrop size distribution measurements in tropical cyclones. *Monthly Weather Review*, v. 136, n. 5, p. 1669-1685, 2008.

TOKAY, A.; SHORT, D. Evidence from tropical raindrop spectra of the origin of rain from stratiform versus convective. *Journal of Applied Meteorology*, v. 35, n. 3, p. 355-371, 1996.

TRIDON, F.; BAELEN, J. V.; POINTIN, Y. Aliasing in micro rain radar data due to

strong vertical winds. *Geophysical Research Letters*, Wiley Online Library, v. 38, n. 2, 2011.

ULBRICH, C. W. Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, v. 22, n. 10, p. 1764-1775, 1983.

ULBRICH, C. W.; ATLAS, D. Microphysics of raindrop size spectra: tropical continental and maritime storms. *Journal Applied Meteorology and Climatology*, v. 46, n. 1, p. 1777 -1791, 2007.

WAGNER, C. S. *Análise das relações entre energia, momentum, taxa de precipitação e refletividade do radar: uma aplicação ao estudo da erosão*. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1986.

WAGNER, C. S.; MASSAMBANI, O. Natureza de espectros de gotas observados em São Paulo. *IV Congresso Brasileiro de Meteorologia*, v.2, p. 17-22, 1986.

WALDVOGEL, A. The N_0 jump of raindrop spectra. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 31, n. 4, p. 1067-1078, 1974.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. *Atmospheric Science: An Introductory Survey*. 2^a edição. Elsevier, 2006, 504 p.

WEN, G.; XIAO, H.; YANG, H.; BI, Y.; XU, W. Characteristics of summer and winter precipitation over northern China. *Atmospheric Research*, v. 197, p. 390 -406, 2017.

WIESNER, J. Bietraegezur Kenntniss des tropischen Regens. *K. Akad. Wiss., Math.-Naturw, Klasse, SitzBer.*, v. 104, p. 1397-1434, 1895.

WILLIAMS, Earle R. "The Electrification of Thunderstorms." *Scientific American*, vol. 259, no. 5, 1988, pp. 88-99.

WU, Z.; YUN, Z.; HENGCHI, L.; LIFENG, Z. Characteristics of summer season raindrop size distribution in three typical regions of western pacific. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, v. 124, p. 4054 -407, 2019.