

# Micael Cecchini – Pos-Doc – Atividades Desenvolvidas

## Características Macro e Microfísicas dos Sistemas Precipitantes Observados Durante o SOS-CHUVA

### 1. Introdução e motivação

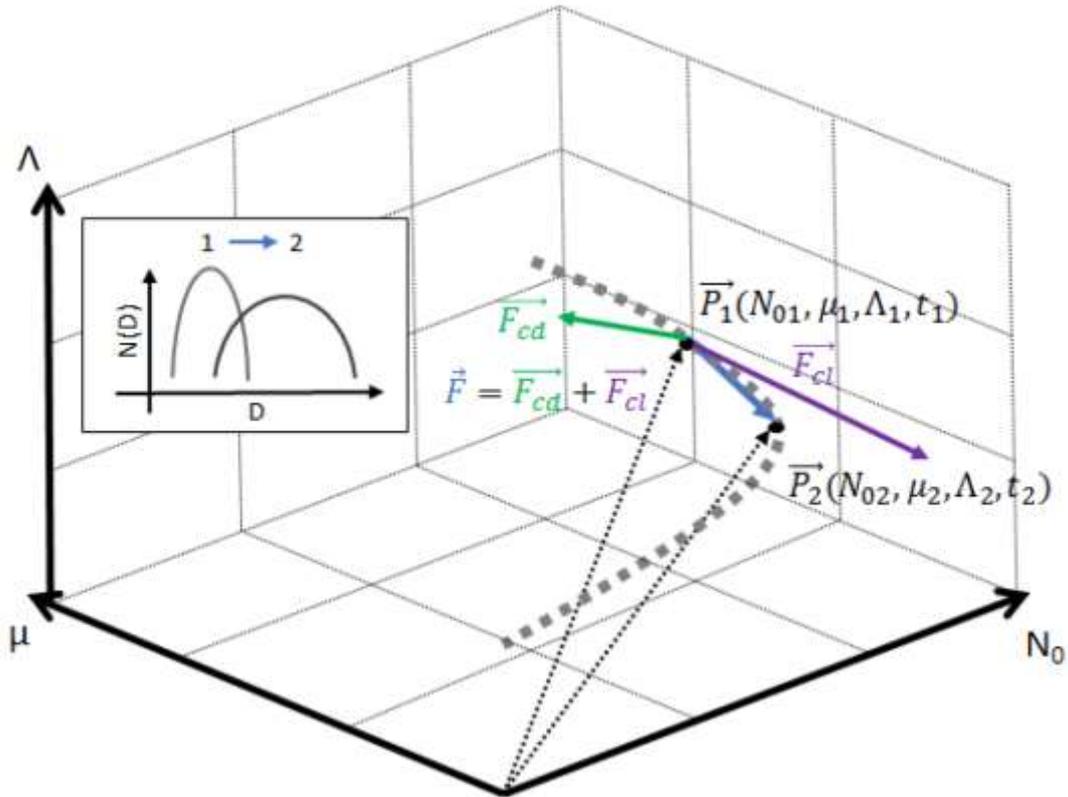
Este estudo tem como objetivo geral a análise holística dos sistemas precipitantes que atuaram ao longo do verão de 2016/2017 e que foram captados pelo radar banda-X do SOS-CHUVA. A análise holística será empregada como meio de comparação dos diversos sistemas precipitantes com o intuito de, no futuro, reconhecer padrões envolvendo os eventos mais intensos de chuva.

Nesta primeira etapa, serão mostrados resultados preliminares envolvendo as variáveis pertinentes para a definição dos chamados “espaços de fase”. O estudo dos espaços de fase em sistemas meteorológicos vem recebendo certa atenção na literatura, uma vez que apresentam uma forma simplificada de representar diversos fenômenos físicos. Por exemplo, Heiblum et al. (2016) utilizam modelagem LES (*Large Eddy Simulation*) para representar grupos de nuvens *cumulus* em um espaço de fase definido pela altura do centro de massa (COG) e o *Liquid Water Path* (LWP) médio de cada sistema (em cada passo de tempo). Neste espaço, os autores foram capazes de identificar diversos padrões, tais como 1) sistemas em crescimento (COG e LWP crescentes); 2) sistemas em dissipação por precipitação (COG e LWP decrescentes); 3) sistemas em dissipação sem precipitação (COG relativamente constante e LWP decrescente). Além disto, características morfológicas tais como o *split* e *merge* de sistemas também puderam ser analisadas.

Com foco na microfísica de sistemas convectivos na Amazônia, Cecchini et al. (2017) introduziram o chamado Espaço de Fase Gamma. Para definir tal espaço, os autores partem da definição da equação gamma que reproduz as medidas de distribuição de tamanho de gotas (DSD):

$$N(D) = N_0 D^\mu \exp(-\Lambda D) \quad (1)$$

Onde  $N(D)$  representa a concentração de gotas medidas em um intervalo de diâmetro  $D + dD$  e  $N_0$ ,  $\mu$  e  $\Lambda$  são os parâmetros de intercepto, forma e curvatura da DSD. Como os parâmetros  $N_0$ ,  $\mu$  e  $\Lambda$  definem por completo a DSD (ao menos sua estimativa pela equação gamma), os autores argumentam que é possível analisar toda a variabilidade teórica das DSDs ao estudar o espaço de fase definido por  $N_0 \times \mu \times \Lambda$ . Para exemplificar possíveis aplicações desse espaço, Cecchini et al. (2017) apresentam diversos padrões observacionais relativos a gotas de nuvem ( $D < 50 \mu\text{m}$ ) na fase quente que podem ser resumidos conceitualmente na Figura 1. Os autores mostram que os processos de crescimento de gotas por condensação ou colisão-coalescência apresentam padrões específicos nesse espaço, portanto o mesmo pode ser utilizado para diagnosticar nuvens observadas por aviões. Um exemplo de diagnóstico é a identificação de camadas verticais que apresentam trajetória na direção predominante de  $F_{cd}$  ou  $F_{cl}$  na Figura 1. As camadas na nuvem que se alinham à direção de  $F_{cd}$  ( $F_{cl}$ ) estariam associadas ao crescimento preferencial por condensação (colisão-coalescência).



**Figura 1:** desenho conceitual do espaço de fase gamma introduzido por Cecchini et al. (2017). Neste espaço, os pontos  $P_1$  e  $P_2$  estão associados a duas DSDs distintas.  $F_{cd}$  e  $F_{cl}$  correspondem às pseudo-forças dos processos de condensação e colisão-coalescência, respectivamente, que geram o deslocamento entre os pontos  $P_1$  e  $P_2$ . A linha cinza tracejada representa uma trajetória nesse espaço, que pode ser relacionada à evolução no tempo da DSD de uma população de gotas (exemplificado no gráfico do inserto). Figura retirada de Cecchini et al. (2017).

Tendo em vista os espaços de fase apresentados acima, os resultados preliminares a serem descritos aqui possuem os seguintes objetivos específicos:

- 1) Identificação de variáveis-chave obtidas pelo radar banda-X para a definição de espaços de fase análogos.
- 2) Mostrar as características gerais de tais variáveis.
- 3) Analisar o ciclo de vida dos sistemas observados no contexto dos espaços de fase.

## 2. Metodologia

### 2.1 Dados do radar

Os resultados a serem apresentados aqui são baseados nos dados processados do radar banda-X. Primeiramente os campos volumétricos de refletividade horizontal ( $Z$ ), refletividade diferencial ( $Z_{dr}$ ) e diferença de fase específica ( $K_{dp}$ ) foram obtidos. Os campos de  $Z$  e  $Z_{dr}$  já contam com correção de atenuação, enquanto que  $K_{dp}$  apresenta suavização ao longo dos feixes do radar. A partir dos volumétricos, foram calculados os CAPPIs (*Constant Altitude Plan Position*

*Indicator*) de  $Z$  a cada 500 m, partindo de 2 km de altitude até 18,5 km. Os CAPPs apresentam resolução de 1 km, com o radar no centro da grade. A interpolação é feita levando em consideração o posicionamento relativo do feixe do radar ao ponto de grade. Cada ponto da grade CAPPI pode ser influenciado por diversos volumes do radar, ponderando pela distância do centro do volume ao ponto de grade.

## 2.2 ForTraCC

Para realizar o *tracking* dos sistemas de forma automática, foi utilizado o software ForTraCC (*Forecasting and tracking Cloud Clusters* – Vila et al., 2008). Este algoritmo foi desenvolvido inicialmente para detectar e seguir os sistemas precipitantes utilizando dados dos satélites GOES, mas foi posteriormente adaptado para funcionar com CAPPs de radar por Queirz (2008) - neste estudo foi utilizado o CAPPI de 2 km. Este algoritmo é capaz de realizar o rastreamento de sistemas precipitantes ao localizar células que apresentem ao menos  $5 \text{ mm h}^{-1}$  de precipitação. A parte convectiva da célula é identificada com um limiar de  $10 \text{ mm h}^{-1}$ . Utilizando imagens sequenciais, com intervalo de 10 minutos, o ForTraCC também armazena características físicas dos sistemas tais como sua área, velocidade de deslocamento, fração convectiva, entre outras. No presente estudo o rastreamento dos sistemas via ForTraCC será utilizado para acompanhar os sistemas precipitantes de forma Lagrangeana, possibilitando a intercomparação entre eles.

Cada sistema identificado é representado por um cilindro, onde o raio do círculo horizontal ( $r$ , em km) é obtido a partir da área ( $A$ , em  $\text{km}^2$ ) fornecida pelo ForTraCC:

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} + 2 \quad (2)$$

Onde são acrescentados 2 km no raio do círculo para compensar possíveis inclinações dos sistemas na vertical. Ao utilizar o raio  $r$  em todos os CAPPs entre 2 km e 18,5 km de altitude, fica definido o cilindro do sistema, que é centralizado ao redor do ponto central identificado pelo ForTraCC e acompanha a célula ao longo do seu ciclo de vida.

Os cilindros são utilizados para calcular as propriedades Lagrangeanas dos sistemas, seja pelos CAPPs ou mesmo pelo volumétrico do radar. As propriedades calculadas são descritas abaixo:

- 1) Macroscópicas – escala do sistema
  - a. Área máxima  $A_{max}$ , calculada como o máximo de  $A$  ao longo do ciclo de vida do sistema.
  - b. Duração  $\Delta T$  (em minutos), calculada por  $10(n - 1)$  onde  $n$  é o número de imagens do sistema.
  - c. VIL (*Vertically Integrated Liquid*, em  $\text{kg m}^{-2}$ ), calculado por:

$$VIL = \sum_{i=1}^{34} 3,44 \cdot 10^{-6} [(Z_i + Z_{i+1})/2]^{4/7} \cdot \Delta h \quad (3)$$

Onde  $i$  representa cada um dos 34 CAPPs entre 2 km e 18,5 km de altitude, sendo  $\Delta h = 500$  m. Para o cálculo de VIL, é feito o truncamento  $Z(Z > 57\text{dBZ}) = 57\text{dBZ}$  para minimizar possíveis efeitos de banda brilhante.

- d. Altura do topo ( $H_{topo}$ , em km), calculado como o máximo do *echo top* de 20 dBZ no cilindro do sistema.
- e. Densidade do VIL (DVIL), calculado pela divisão do VIL pelo *echo top* de 20 dBZ.

- f. Altura do centro de massa (COG), calculado a partir da equação do VIL mas antes de realizar a integração na vertical. Nesse caso, é calculada a contribuição que cada CAPPI apresenta para o VIL seguindo a relação:

$$VIL_i = 3,44 \cdot 10^{-6} (Z_i)^{4/7} \quad (4)$$

Ao realizar a média de  $VIL_i$  para todos os CAPPIs na área do sistema, é possível obter o perfil médio dessa propriedade. O COG é obtido como a altitude do ponto de maior  $VIL_i$  médio.

- g. Água total do sistema ( $W_T$ , em T), calculado a partir da integral de área do VIL do sistema.
- 2) Microscópicas – propriedades internas dos sistemas. Nesta primeira etapa iremos focar na DSD dos hidrometeoros, que será obtida a partir dos dados volumétrico de  $Z$ ,  $Z_{dr}$  e  $K_{dp}$  seguindo a metodologia de Kalogiros et al. (2013). Estes autores mostram um método para a obtenção da DSD usando a função gamma normalizada, dada por:

$$N(D) = N_w f(\mu) \left(\frac{D}{D_0}\right)^\mu \exp\left[-(\mu + 3,67) \frac{D}{D_0}\right] \quad (5)$$

Onde  $N_w$  é o parâmetro de intercepto,  $D_0$  é o diâmetro médio volumétrico e  $\mu$  o parâmetro de forma. A função  $f(\mu)$  é dada por:

$$f(\mu) = \frac{6}{3.67^4} \frac{(3.67 + \mu)^{\mu+4}}{\Gamma(\mu+4)} \quad (6)$$

Para detalhes sobre a obtenção dos parâmetros da DSD normalizada veja Kalogiros et al. (2013). Neste estudo vamos utilizar este formato da DSD gamma, embora ela possa ser convertida para a forma da Equação (1) utilizando as seguintes expressões:

$$N_0 = N_w f(\mu) D_0^{-\mu} \quad (7)$$

$$\Lambda = \frac{\mu + 3.67}{D_0} \quad (8)$$

O espaço de fase de Cecchini et al. (2017), a princípio, pode ser visualizado tanto na forma da Equação (1) quanto da Equação (5). Esta comparação será feita no futuro e no momento vamos explorar apenas os valores dos parâmetros da gamma normalizada.

## 2.3 Período de análise

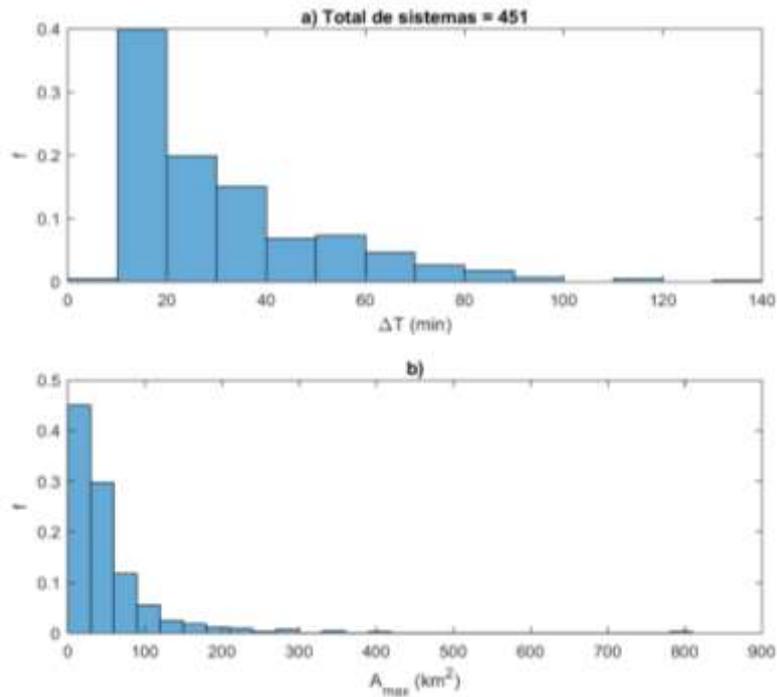
Os resultados a serem apresentados aqui são focados para o verão de 2016/2017. Mais especificamente, foi selecionado o período entre 22/02/2016 e 03/03/2017. Dentro desse período, foram selecionados 24 dias para análise, baseado na disponibilidade dos dados do radar e na ocorrência de sistemas precipitantes. Os dias de análise, bem como o total de sistemas detectados pelo ForTraCC, são apresentados na Tabela 1. Embora o ForTraCC tenha detectado uma grande quantidade de sistemas (1133 no total), aqui focaremos somente nos que apresentaram ciclo de vida completo entre 10 km e 60 km do radar, onde os dados apresentam melhor qualidade. Ao realizar tal filtro, totalizam-se 451 sistemas para análise.

<b>Dia</b>	<b>Número de sistemas (ForTraCC)</b>
22/11/2016	46
23/11/2016	72
25/11/2016	9
26/11/2016	59
27/11/2016	80
28/11/2016	92
29/11/2016	35
03/12/2016	72
04/12/2016	41
05/12/2016	20
17/02/2017	5
18/02/2017	53
19/02/2017	9
21/02/2017	2
22/02/2017	24
23/02/2017	13
24/02/2017	93
25/02/2017	47
26/02/2017	112
27/02/2017	5
28/02/2017	38
01/03/2017	82
02/03/2017	71
03/03/2017	53

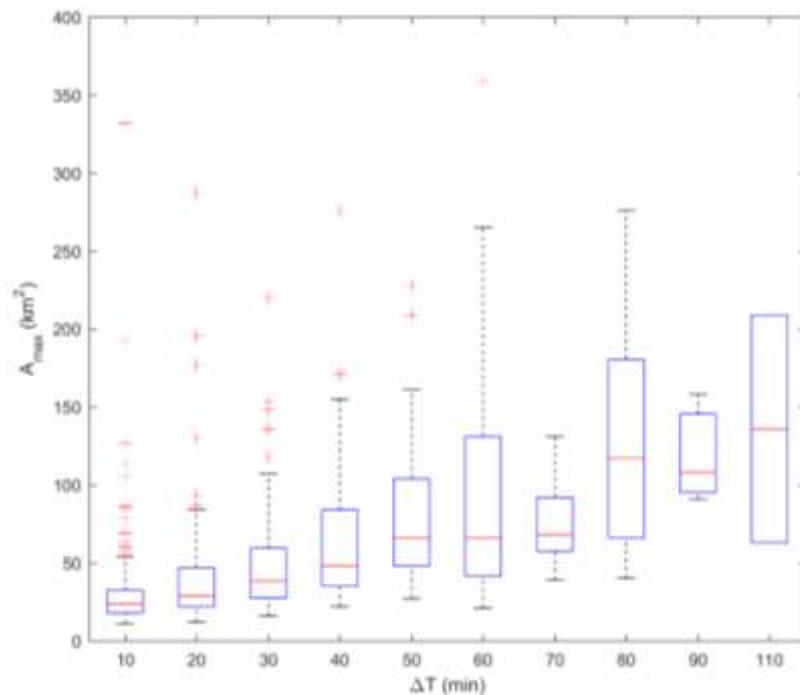
**Tabela 1:** dias de análise e a quantidade total de sistemas detectados pelo ForTraCC.

### **3. Resultados**

Os sistemas detectados pelo radar banda-X ao longo do período de análise apresentam grande variedade em termos de tamanho e duração. Foi observado que aproximadamente 60% dos sistemas apresentaram duração de 20 minutos ou menos, com áreas de 40 km<sup>2</sup> ou menos (Figuras 1 e 2). Além disto, observa-se que usualmente as células com maiores tamanhos apresentam ciclo de vida mais duradouro (Figura 2). Os sistemas com duração de 60 minutos ou mais provavelmente estão associados com fenômenos de maior escala tais como frentes frias ou convergência em larga escala.

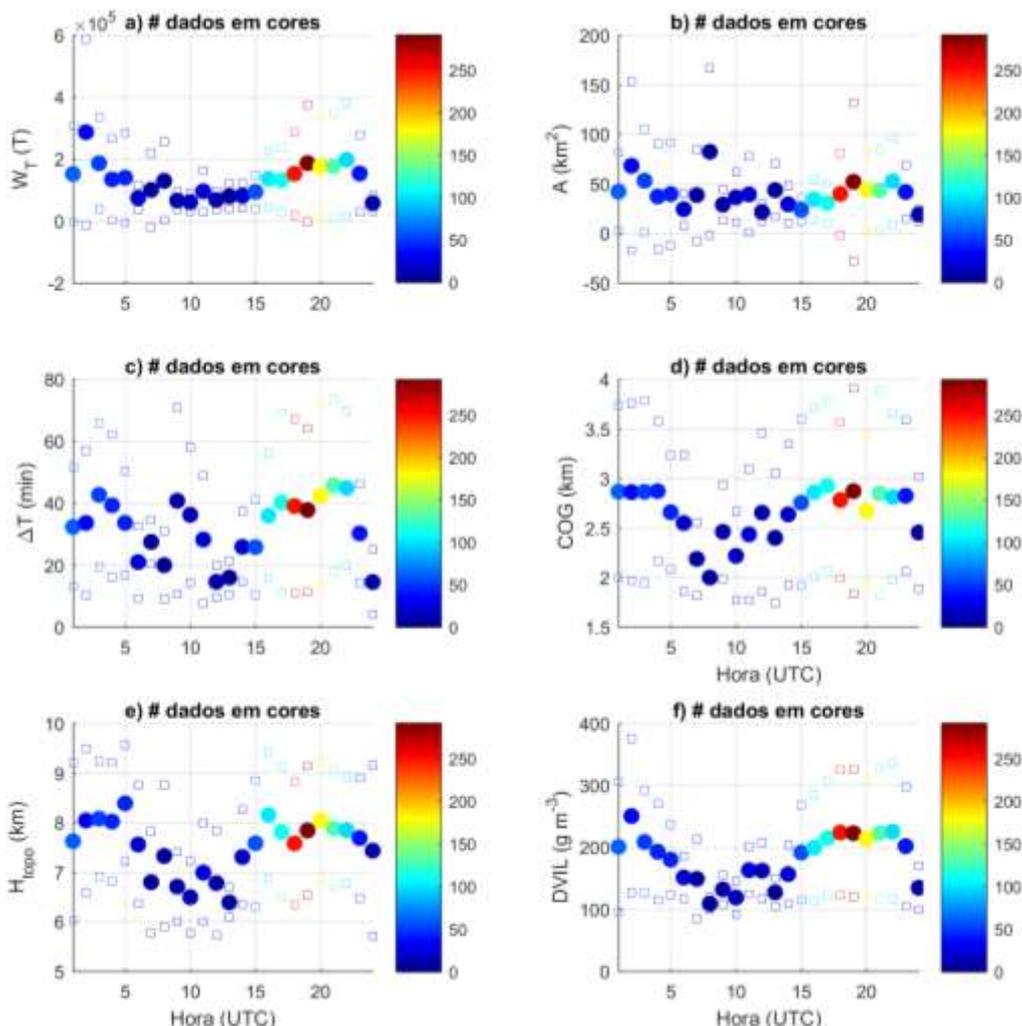


**Figura 1:** histogramas normalizados de a) duração e b) área máxima dos sistemas detectados pelo ForTraCC no período de análises. Note que os valores mínimos das barras são inclusivos, ou seja, uma barra entre 10 min e 20 min está associada aos sistemas de 10 minutos de duração e assim por diante (o mesmo vale para a área).



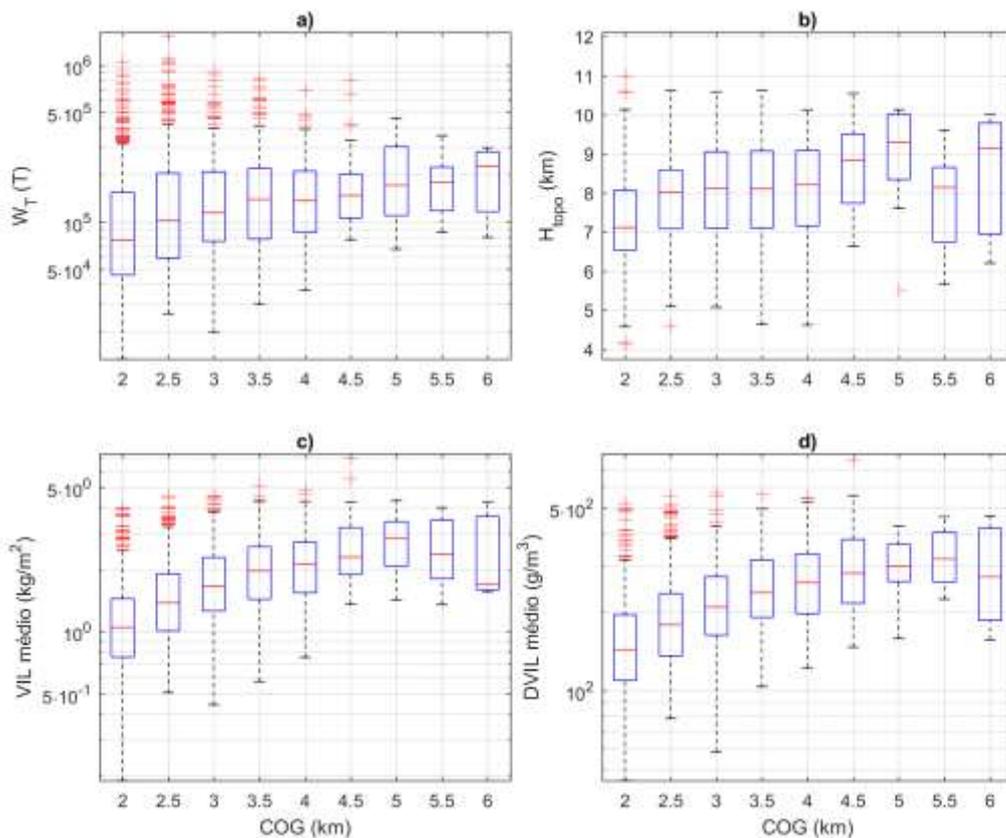
**Figura 2:** boxplot da área máxima em função da duração dos sistemas. As linhas vermelhas representam medianas, enquanto que as caixas azuis são as diferenças interquartis. Linhas pretas tracejadas representam os desvios-padrão e os sinais "+" em vermelho são os *outliers*.

Em termos do ciclo diurno de atuação dos sistemas precipitantes, notam-se dois picos de atividade: um à tarde e final da tarde e outro no fim da noite/madrugada. Possivelmente os eventos ocorridos à tarde têm maior contribuição de instabilidades locais, enquanto que os sistemas de noite/madrugada podem estar associados a fenômenos de maior escala. A Figura 3 mostra que os eventos ocorridos durante os dois horários apresentam características semelhantes em termos de quantidade de água, duração, COG e DVIL. No entanto, os sistemas que ocorrem de madrugada aparentam ter área e altura do topo levemente superiores, indicando sistemas mais maduros em média. No entanto, nota-se que tais diferenças são relativamente pequenas quando se leva em consideração o desvio-padrão das propriedades (quadrados coloridos na Figura 3). Em termos do número de ocorrências em função do horário, nota-se grande predominância de eventos entre 16:00 UTC e 22:00 UTC, especialmente entre 18:00 UTC e 20:00 UTC. Tal comportamento é compatível com o modelo conceitual de chuvas de verão, que ocorrem primariamente pelo aquecimento da superfície durante o dia. Futuramente será interessante detalhar tais observações ao estudar a distribuição de frequência de sistemas estratiformes e convectivos ao longo do dia.



**Figura 3:** ciclos diurnos de a) água total  $W_T$ , b) área  $A$ , c) duração  $\Delta T$ , d) COG, e) altura do topo  $H_{topo}$  e f) DVIL. Círculos preenchidos representam as médias, enquanto que os quadrados vazios mostram a variabilidade de um desvio-padrão.

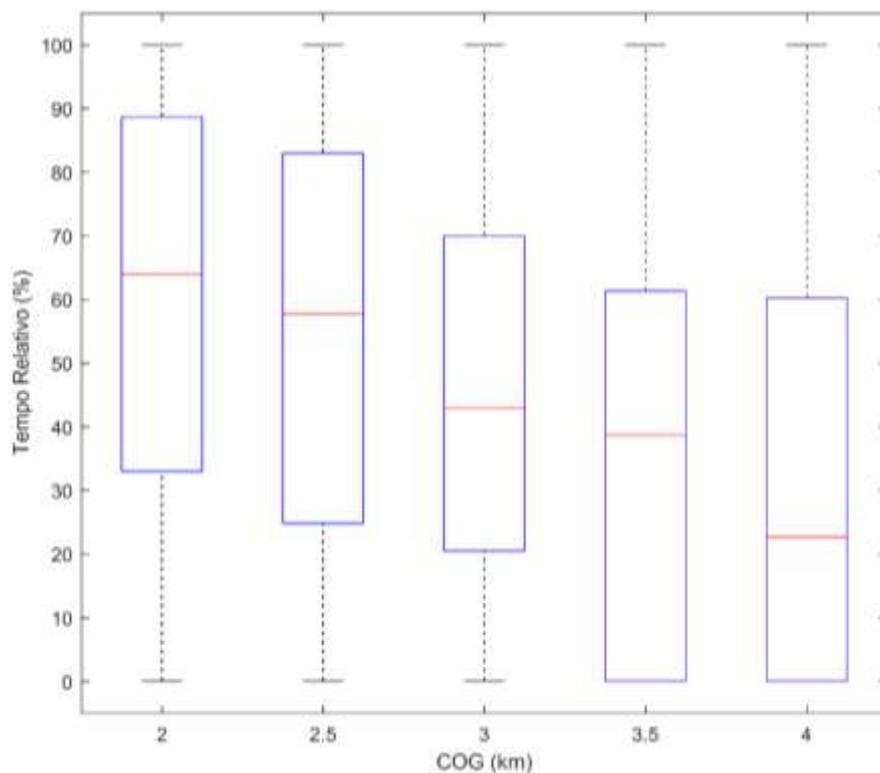
Uma das principais características de interesse nesta etapa do estudo é a altura do centro de gravidade COG. Tal propriedade é pouco explorada na literatura, que usualmente foca na altura do topo das nuvens. A Figura 4 mostra, de modo geral, como tal variável se comporta com relação a outras propriedades das nuvens observadas. Primeiramente é importante ressaltar que, devido à limitação imposta pelo cálculo dos CAPPIS, só é possível a obtenção de COG com resolução de 500 m. Além disso, 95% dos dados apresentam COG igual ou menor que 4 km, os dados acima disso apresentados na Figura 4 apresentam estatísticas inferiores. Dito isso, é possível notar que o COG apresenta correlação positiva com  $W_T$  (Figura 4a), VIL (Figura 4b) e DVIL (Figura 4d). Ou seja, de modo geral, quanto mais alto o centro de gravidade das nuvens, maior será o conteúdo de água em seu interior. Tal aumento de massa, no entanto, não é acompanhado por crescimento da nuvem em geral, ao menos não na mesma proporção, visto que os valores de DVIL também aumentam. Ao analisar a Figura 4b, vemos que a altura do topo das nuvens com COG entre 2,5 km e 4 km não varia muito quando se leva em consideração as distâncias interquartis e os desvios-padrão. Neste caso, a mediana do topo das nuvens fica próxima de 8 km, enquanto que há um aumento de 1,5 km no COG. Ou seja, nuvens que apresentam alturas de topo similares podem apresentar físicas significativamente diferentes visto que a massa de água em seu interior está localizada diferentes níveis. Em outras palavras, analisar somente a altura do topo pode não ser o suficiente para caracterizar por completo o estágio do ciclo de vida das nuvens. Portanto, em termos de *nowcasting*, pode ser importante conhecer em mais detalhes a variabilidade de COG.



**Figura 4:** boxplots de a)  $W_T$ , b)  $H_{\text{topo}}$ , c) VIL e d) DVIL em função de COG.

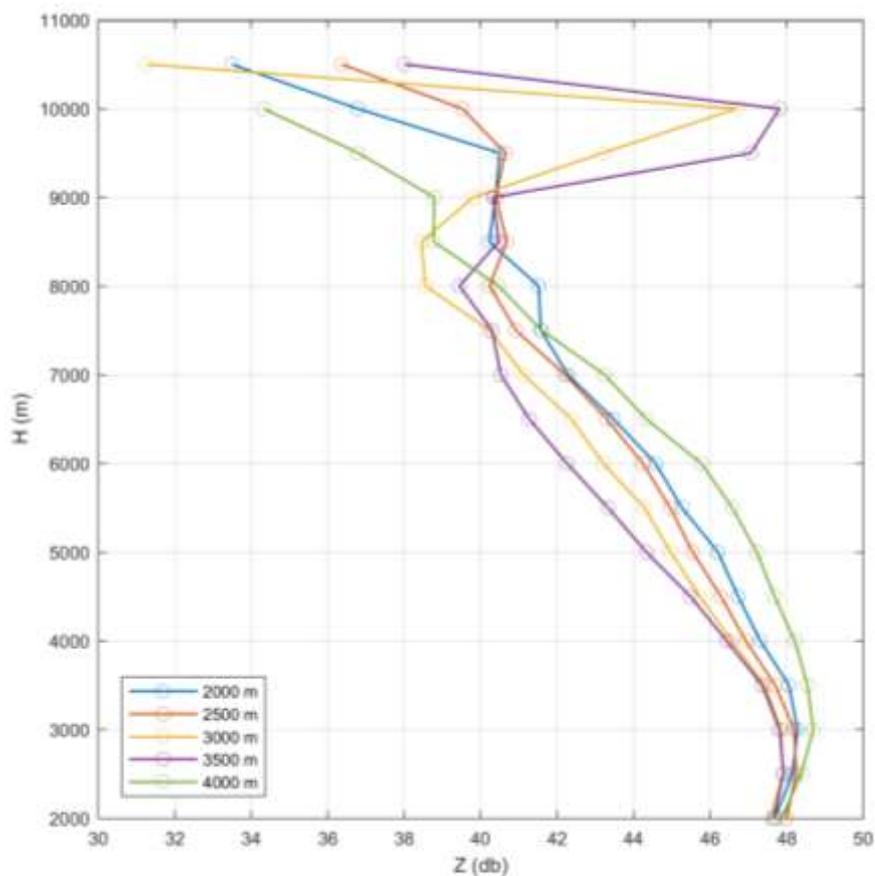
Embora haja correlação de COG com a quantidade de água no interior dos sistemas como apresentado na Figura 4, ainda fica incerto qual a relação da altura do centro de massa com o ciclo de vida da precipitação. Baseado somente na Figura 4, poder-se-ia imaginar que o sistema inicia com VIL baixo, que vai aumentando juntamente com COG conforme o sistema se desenvolve. No entanto, é importante levar em consideração as condições de medidas para compreender melhor a situação. Ressalta-se que o ForTraCC identifica células precipitantes baseado em pixels de  $5 \text{ mm h}^{-1}$ , ou seja, os sistemas não são detectados logo na sua formação e sim em algum momento mais intermediário do ciclo de vida. Além disso, o radar banda-X, embora seja sensível a gotas menores do que radares de banda S, ainda detecta primariamente hidrometeoros de precipitação e não a nuvem em si. Levando em consideração a física da formação da precipitação, que se forma em níveis elevados na nuvem para depois sedimentar, vemos que o mais correto é um decrescimento de COG ao longo do ciclo de vida da célula. Para conferir esse ponto, foi calculado o tempo relativo dos sistemas, definido como 0% quando da sua detecção e 100% quando da sua dissipação de acordo com os critérios do ForTraCC. Ao calcular a média desse parâmetro em função de COG, somente para os sistemas com duração igual ou superior a 50 minutos, obtém-se o resultado apresentado na Figura 5.

Nota-se que há uma relação inversa entre o tempo relativo e COG, em termo das medianas apresentadas na Figura 5. Ou seja, logo que os sistemas são detectados, seu centro de massa está em torno de 4 km, que vai decaindo ao longo do ciclo de vida seguindo a sedimentação da massa precipitável da nuvem. Em termos de *nowcasting*, pode ser interessante buscar detectar o momento em que COG atinge 4 km nos sistemas, indicando que a precipitação ainda irá se desenvolver e sedimentar. No entanto, nota-se que há bastante variabilidade na Figura 5, indicando que é necessário analisar alguns casos individualmente para melhor descrever a física envolvida na questão do ciclo de vida do COG e suas consequências para o *nowcasting*.



**Figura 5:** tempo relativo médio em função de COG. Define-se o tempo relativo como 0% na detecção e 100% na dissipação do sistema de acordo com os critérios do ForTraCC.

Visto que há certa relação entre o COG e o ciclo de vida dos sistemas precipitantes, se torna interessante analisar as características dos sistemas quando estes apresentam determinados valores de COG. Primeiramente, apresenta-se o perfil vertical médio de Z para cada nível de COG entre 2 km e 4 km (Figura 6). Seguindo o mesmo raciocínio da Figura 5, podemos analisar como o perfil vertical de Z varia ao longo do ciclo de vida. Vemos que para COG = 4000 m, o perfil de Z apresenta os maiores valores nos níveis médios – entre 4 km e 7,5 km, por exemplo. A seguir, no perfil de COG = 3500 m, vemos uma forte decaída dos valores nesses níveis, aumentando drasticamente nas altitudes mais elevadas. Nos perfis seguintes de COG = 3000 m, 2500 m e 2000 m, vemos um padrão contínuo de aumento de Z nos níveis médios em detrimento de Z nos níveis altos. De modo geral, podemos interpretar a Figura 6 da seguinte maneira: no início da detecção do sistema pelo ForTraCC, vemos que ele ainda está se desenvolvendo com significativas correntes ascendentes. A seguir, uma quantidade de massa é transportada para os altos níveis, embora a altura do centro de massa do sistema esteja decrescendo. Com o passar do tempo há o colapso da nuvem de cima para baixo, o que favorece ainda mais o decaimento do centro de massa do sistema.

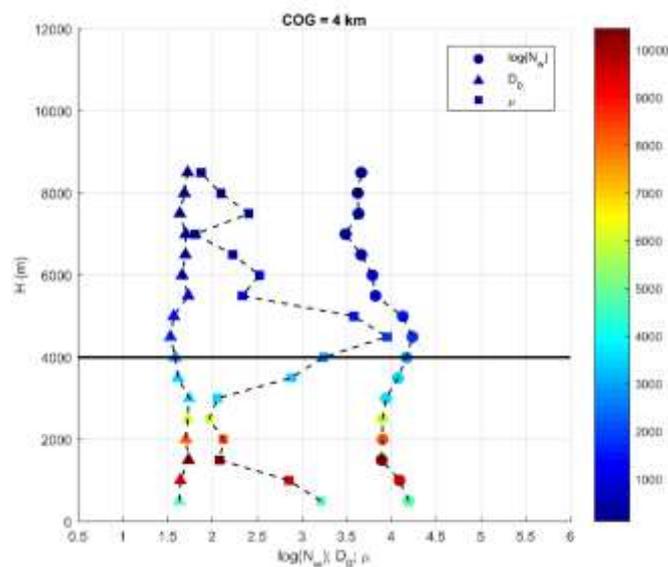


**Figura 6:** perfis verticais médios de Z quando os sistemas apresentam COG entre 2 km e 4 km.

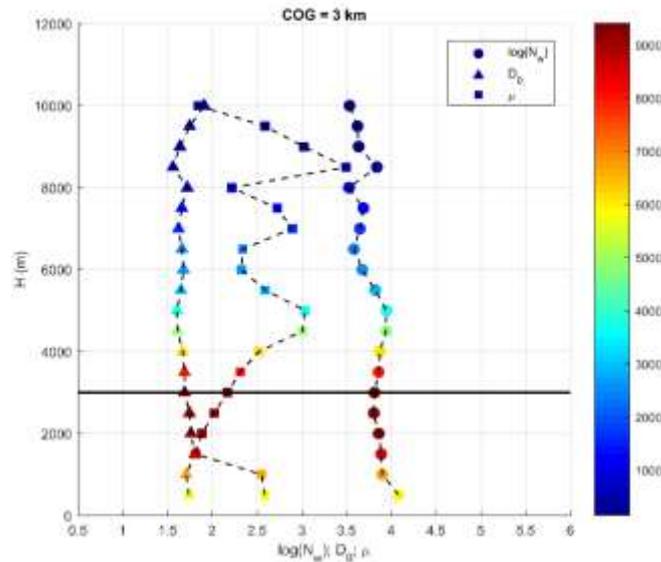
A Figura 6 mostra que há certa correlação entre a estrutura interna dos sistemas em função de COG. Para obter mais detalhes sobre essa relação, foram calculados os perfis médios das DSDs na forma da Equação (5). Vale ressaltar que esses cálculos foram baseados nos dados volumétricos, uma vez que não foi feita a interpolação de CAPPIs de  $Z_{dr}$  e  $K_{dp}$ . A partir desses dados, definiu-se uma resolução vertical de 500 m, a partir da qual foram obtidas médias dos parâmetros  $N_w$ ,  $D_0$  e  $\mu$ . Os resultados são apresentados nas Figuras 7-9 (por simplicidade, não

são mostrados os resultados para COG = 2,5 km e 3,5 km, que seguem padrão similar ao que será discutido).

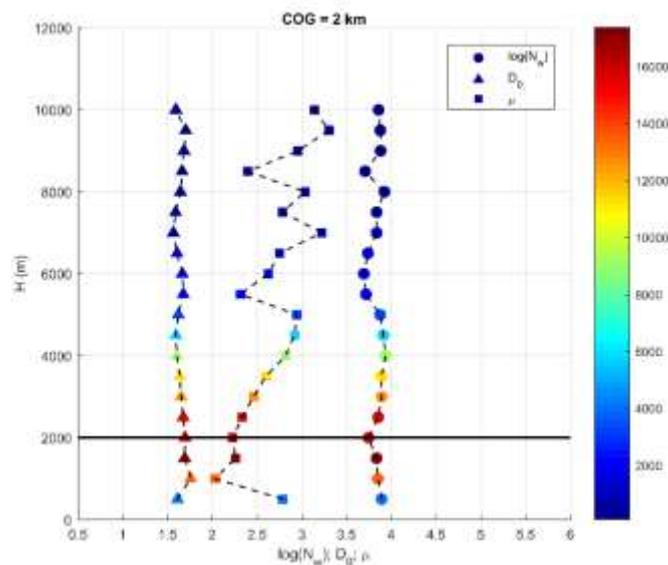
Primeiramente, nota-se um pico dos valores de  $\mu$  ao redor de 4500 m. É possível que estes valores estejam sob o efeito da banda brilhante. No entanto, é possível perceber que há um padrão de evolução dos parâmetros ao redor da altitude do COG. Note que, nas três figuras (7 a 9), os parâmetros  $N_w$  e  $\mu$  decaem ao cruzarem a linha do COG de cima para baixo, enquanto que o oposto ocorre com  $D_0$ . Essa evolução nos parâmetros está associada com gotas progressivamente maiores e DSDs que vão se alargando possivelmente devido ao processo de colisão-coalescência e ao *breakup*. De acordo com as Figuras 7-9, esse processo é favorecido ao redor do COG, uma vez que é a região onde há maior massa na nuvem. Note que conforme os pontos se afastam do COG e se aproximam da superfície há uma reversão do processo – abaixo de 2000 m na Figura 7, por exemplo. Neste caso, as gotas estão diminuindo de tamanho, enquanto que a DSD se torna mais estreita e com maior intercepto  $N_w$ . Ou seja, conforme as gotas se afastam da região de maior massa da nuvem, o processo de evaporação da precipitação começa a predominar. Finalmente, é interessante notar que o processo de evaporação é mais significativo para maiores valores de COG, uma vez que a precipitação precisa percorrer uma maior distância para atingir a superfície.



**Figura 7:** perfil vertical médio de  $N_w$ ,  $D_0$  e  $\mu$  para quando os sistemas apresentam COG = 4 km. As cores representam o número de dados para cada intervalo de altitude, onde são apresentados somente os dados onde esse número superou 80. A linha preta horizontal representa a altitude do COG.



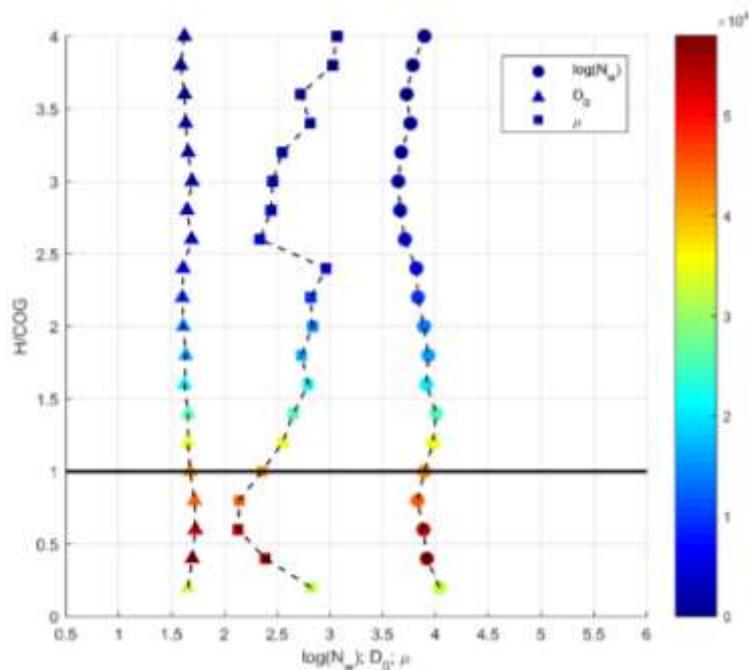
**Figura 8:** o mesmo que a Figura 7, mas para COG = 3 km.



**Figura 9:** o mesmo que a Figura 7, mas para COG = 2 km.

Uma vez que os resultados das Figuras 7-9 foram similares entre si, em termos dos padrões ao redor do COG, podemos utilizar uma normalização da altitude dos dados por COG para obter a Figura 10. Esta figura resume o que foi destacado acima e mostra o comportamento médio das DSDs ao redor do centro de gravidade dos sistemas. Um fator interessante de ser destacado é a amplitude de variação de  $\mu$  de cima para baixo do COG. A Figura 10 mostra que os valores de  $\mu$  atingem um máximo local um pouco inferior a 3 perto de  $H/\text{COG} = 1,5$ . Por outro lado,  $\mu$  atinge um mínimo local de pouco mais que 2 próximo a  $H/\text{COG} = 0,5$ . Ou seja, a amplitude de variação de  $\mu$  redor do COG é um pouco inferior a 1. Quando se faz uma análise similar de máximos e mínimos nas Figuras 7-9, percebe-se que tal amplitude tende a aumentar com COG. Ou seja, no início da detecção dos sistemas, os processos de alteração das DSDs estão mais intensos e, conforme o sistema se desenvolve e o COG decai, esses processos vão se estabilizando. Sendo assim, se temos a Figura 10 como exemplo, talvez seja possível associar o estágio de vida

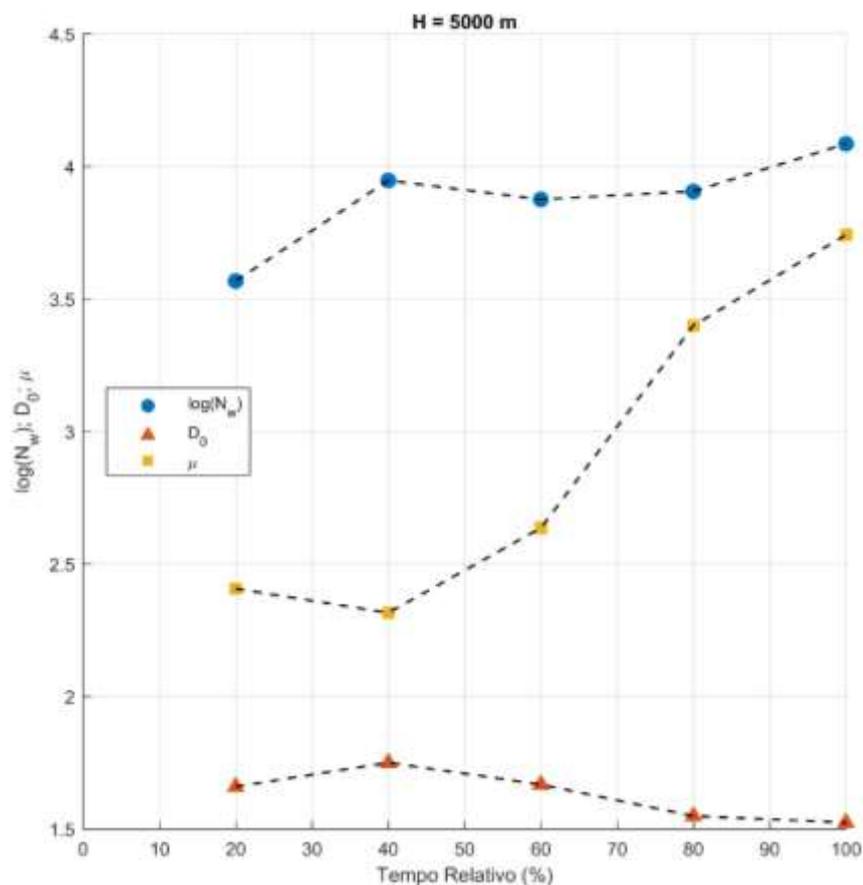
precipitação – e, portanto, quando o máximo de massa irá precipitar – ao COG e as DSDs ao seu redor.



**Figura 10:** perfis verticais de  $N_w$ ,  $D_0$  e  $\mu$ , onde a altitude foi normalizada por COG. As cores representam o número de dados em cada intervalo de 0,2 de  $H/COG$ . A linha preta horizontal mostra a altitude do COG.

Outra possível utilidade da análise dos parâmetros das DSDs pode ser através do seu contínuo monitoramento em um nível fixo ao longo do ciclo de vida do sistema precipitante. Aqui será mostrado o exemplo do nível de 5000 m ( $\pm 250$  m para possibilitar o cálculo das médias pelos volumétricos), que foi selecionado para garantir que estará acima do COG – outros níveis podem ser selecionados, que irão apresentar físicas diferentes visto o posicionamento relativo ao COG. Quando calculamos a média dos parâmetros das DSDs no nível de 5000 m em função do tempo relativo do sistema, obtemos os resultados mostrados na Figura 11.

Nota-se que os parâmetros apresentam um padrão claro de evolução ao longo do ciclo de vida, onde  $\mu$  e  $N_w$  crescem progressivamente enquanto que  $D_0$  diminui. Ou seja, ao longo da evolução do sistema, as gotas estão diminuindo no nível de 5000 m, com DSDs que se estreitam. Ou seja, no início do ciclo de vida do sistema, quando COG está mais próximo a 5000 m, a DSD apresenta característica de precipitação já processada. Conforme o sistema se desenvolve e o COG se afaste de 5000 m, os hidrometeoros neste nível vão perdendo tamanho e a DSD se estreita. Ou seja, tal padrão de evolução dos parâmetros em diferentes níveis verticais também pode ser utilizado para diagnosticar a evolução do sistema precipitante. Ao analisar as Figuras 7-11 em conjunto, conclui-se que, além do COG, também é interessante localizar os níveis onde  $\mu$  atinge valores abaixo de 2,5, uma vez que está associado com as maiores gotas e possivelmente à precipitação mais intensa. Quanto mais próximo à superfície esse nível estiver, mais próximo estará a maior descarga de massa de chuva na superfície.



**Figura 11:** evolução dos parâmetros da DSD gamma em função do tempo relativo dos sistemas para o nível fixo de 5000 m ( $\pm 250$  m).

#### 4. Conclusões

Neste estudo foram apresentadas características macro e microfísicas dos eventos precipitantes que ocorreram no verão de 2016/7 durante o experimento SOS-CHUVA. Os sistemas precipitantes foram rastreados de forma automática através do algoritmo ForTraCC, possibilitando a obtenção de variáveis Lagrangeanas. Foi mostrado que os sistemas ocorrem primariamente durante a tarde e final da tarde, com duração média de aproximadamente 25 minutos e área média de aproximadamente 50 km<sup>2</sup>. O percentil de 90% da duração e área chega a 1 hora e 100 km<sup>2</sup>, respectivamente. Para esses sistemas, foi introduzido o cálculo da altura do centro de gravidade (COG), o qual apresenta correlações com o ciclo de vida do sistema e suas características microfísicas.

Foi mostrado que o COG, que usualmente varia de 2 km a 4 km, apresenta correlações positivas com a quantidade total de água no sistema ( $W_T$ ), VIL e DVIL. Com relação à altura do topo das nuvens, estimada pelo *echo-top* de 20 dBZ, a correlação é menos clara. Notou-se que quando o COG varia de 2,5 km a 4 km, a altura mediana do topo equivalente se mantém relativamente constante em 8 km. Isto indica que sistemas com a mesma profundidade podem apresentar estruturas internas diferentes e, portanto, microfísicas distintas. Para compreender melhor o

papel de COG na estrutura e física dos sistemas, foram estudadas diversas propriedades deles em função de COG.

Descobriu-se que, em sua primeira detecção pelo ForTraCC (com limiar de  $5 \text{ mm h}^{-1}$  ou aproximadamente 34 dBZ), os sistemas usualmente apresentam COG relativamente elevado e em torno de 4 km. Neste primeiro momento, o perfil vertical médio de refletividade mostrou que a fase de gelo nos níveis altos (acima de 8 km) não está completamente desenvolvida. Conforme o sistema se desenvolve, o COG desce para aproximadamente 3,5 km enquanto que a fase de gelo se intensifica. A partir desse momento há continuação do decaimento do COG, enquanto que a fase de gelo nos níveis altos perde intensidade em favor dos níveis intermediários. Ou seja, interpreta-se que o sistema está em colapso de cima para baixo, até que o COG chegue no nível mais baixo identificado pela presente metodologia (2 km).

Conforme o COG dos sistemas decai, a microfísica dos hidrometeoros também se altera. Notou-se que as DSDs apresentam um padrão ao redor do nível de COG, independente de sua altura. Pensando em hidrometeoros em precipitação, observou-se que a DSD destes apresenta alargamento de cima do COG para baixo dele. No entanto, conforme se afasta mais do COG e em direção à superfície, o padrão se reverte e as gotas diminuem de tamanho enquanto que a DSD se estreita. Isto foi interpretado da seguinte maneira. Quando os hidrometeoros estão próximos do COG, eles crescem eficientemente por processos de coleta devido à alta disponibilidade de massa de água. Conforme os hidrometeoros precipitam para longe do COG eles entram em uma região que não apresenta tanta massa de água disponível e começam a diminuir em função da evaporação. A partir disso, sugere-se que o COG e as DSDs ao seu redor sejam monitoradas para auxiliar na previsão de evolução do sistema.

De modo geral, esta primeira etapa do trabalho mostrou que é possível analisar diversos aspectos dos sistemas precipitantes quando se discrimina os dados em função de COG. Esta propriedade, juntamente com o VIL médio dos sistemas, pode ser utilizada para construir o espaço de fase sugerido por Heiblum et al. (2016). Testes mais aprofundados com esse espaço de fase e o espaço microfísico de Cecchini et al. (2017) serão feitos no futuro através de estudos de caso. Este tipo de estudo também será realizado para confirmar os padrões gerais que foram introduzidos aqui. Espera-se que este tipo de análise sirva para complementar o diagnóstico de sistemas precipitantes para, no futuro, aprimorar as técnicas de *nowcasting* – seja de forma qualitativa ou quantitativa, dependendo dos resultados obtidos.

## 5. Referências

Heiblum, R. H., Altaratz, O., Koren, I., Feingold, G., Kostinski, A. B., Khain, A. P., Ovchinnikov, M., Fredj, E., Dagan, G., Pinto, L., Yaish, R., and Chen, Q.: Characterization of cumulus cloud fields using trajectories in the center-of-gravity vs. water mass phase space: 1. Cloud tracking and phase space description, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, doi:10.1002/2015JD024186, 2016a.

Cecchini, M. A., Machado, L. A. T., Wendisch, M., Costa, A., Krämer, M., Andreae, M. O., Afchine, A., Albrecht, R. I., Artaxo, P., Borrmann, S., Fütterer, D., Klimach, T., Mahnke, C., Martin, S. T., Minikin, A., Molleker, S., Pardo, L. H., Pöhlker, C., Pöhlker, M. L., Pöschl, U., Rosenfeld, D., and Weinzierl, B.: Illustration of microphysical processes in Amazonian deep convective clouds in the

gamma phase space: introduction and potential applications, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 14727-14746, <https://doi.org/10.5194/acp-17-14727-2017>, 2017.

Vila, D., Machado, L., Laurent, H., and Velasco, I.: Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters (ForTraCC) Using Satellite Infrared Imagery: Methodology and Validation, *Wea. Forecasting*, 23, 233–245, doi: 10.1175/2007WAF2006121.1, 2008.

Queiroz, A. P.: Monitoramento e previsão imediata de tempestades severas usando dados de radar, 2009, 114 p. (INPE-14181- TDI/1093). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2008. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtcm18@80/2008/11.17.19.50>>.

Kalogiros, J., M. N. Anagnostou, E. N. Anagnostou, M. Montopoli, E. Picciotti, and F. S. Marzano, 2013: Optimum estimation of rain microphysical parameters from X-band dual-polarization radar observables. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 51, 3063–3076, doi:10.1109/TGRS.2012.2211606.