

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

Maria Eugenia Baruzzi Frediani

Microfísica das nuvens Amazônicas:
Propriedades dos hidrometeoros observados durante
as campanhas WetAMC/TRMM/LBA 1999 e
DryToWet/RACCI 2002

São Paulo

2008

Maria Eugenia Baruzzi Frediani

**Microfísica das nuvens Amazônicas:
Propriedades dos hidrometeoros observados durante
as campanhas WetAMC/TRMM/LBA 1999 e
DryToWet/RACCI 2002**

Tese apresentada ao Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Ciências Atmosféricas
Orientador: Prof. Dr. Carlos Augusto Morales Rodriguez

São Paulo

2008

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Flávia e Fernando Frediani, pelo carinho, suporte, aposta e confiança em meu trabalho. Aos meus irmãos, Fernanda e Mário, por terem estado ao meu lado ao longo deste caminho.

Ao meu orientador, Carlos Morales, por ter sempre acreditado em mim, pela paciência e compreensão nos momentos de dificuldade. Pela sua dedicação, disposição e proximidade.

Ao meu maior parceiro e companheiro, Renato Campos, pela motivação, apoio e lealdade.

Aos meus queridos amigos, colegas e todos aqueles que de um modo ou de outro contribuíram para que este trabalho acontecesse.

*“When things are going well, something will go wrong.
When things just can't get any worse, they will.
Anytime things appear to be going better, you have overlooked something.”*

Richard Feynman

RESUMO

A necessidade de ampliar o conhecimento sobre as características dos processos microfísicos das nuvens Amazônicas durante os diferentes regimes sazonais atuantes na região ao longo do ano, motivou o início deste estudo. Portanto, o objetivo principal deste trabalho foi a caracterização vertical interna das nuvens, através de medidas *in situ* realizadas por aeronaves instrumentadas durante as campanhas experimentais TRMM/LBA (1999) e Dry-To-Wet/RACCI (2002). As Estações Chuvosa, Seca e de Transição, apresentam comportamentos muito distintos entre si, causados tanto por fatores naturais, como a disponibilidade de vapor d'água na atmosfera, quanto pela ação do homem no meio ambiente, como o desmatamento e as queimadas. Através dos perfis verticais das nuvens, baseados em distribuições de tamanho dos hidrometeoros observados durante as campanhas, foi possível definir a estrutura interna típica das nuvens de cada estação. Durante a Estação Chuvosa, o número reduzido de aerossóis, possivelmente associado ao fato de apresentarem tamanhos maiores, fez com que houvesse maior eficiência no crescimento de gotículas por condensação, e conseqüentemente, no processo de colisão e coalescência. A moda de 32,5 μm , na Estação Chuvosa cresceu com gotículas $\sim 12,5\mu\text{m}$, enquanto que nas Estações Seca e de Transição $\sim 5,75\mu\text{m}$. Ainda, a Estação Seca apresentou uma segunda moda mais evidente apesar de menor concentração quando comparada com a Estação Chuvosa, em 170 μm , mostrando um atraso no crescimento de Colisão e Coalescência. As concentrações das modas de crescimento também apresentaram diferenças relevantes. No caso da moda de condensação, as concentrações máximas foram de 11,6; 93,9 e 126,0 $\text{cm}^{-3}\mu\text{m}^{-1}$, e no caso da moda de Colisão e Coalescência, as concentrações foram de 1,5; $2,6 \times 10^{-5}$ e $2,3 \times 10^{-5}\text{cm}^{-3}\mu\text{m}^{-1}$ para as Estações Chuvosa, Seca e de Transição, respectivamente. Além da caracterização das estações, foi possível encontrar indicativos sobre o efeito da poluição de origem antropogênica e as alterações da cobertura vegetal. Constatou-se uma maior eficiência dos processos de

crescimento de hidrometeoros em ambiente com pouca poluição sobre área de floresta. Esta eficiência foi retratada pela variação ao longo da vertical do diâmetro de 50% do conteúdo de água líquida, que sob condição pouco poluída sobre floresta foi de $16\mu\text{m}$, enquanto que sob condição intensamente poluída, foi de apenas $5,3\mu\text{m}$. Houve também, indícios de supressão de hidrometeoros grandes, tais como observados durante a Estação Chuvosa. Enquanto os hidrometeoros atingiram 12mm de diâmetro na Estação Chuvosa, nas Estações Seca e de Transição o diâmetro máximo observado foi de 3,8 e 4,4mm, respectivamente. Isto pode representar um efeito de inibição devido à competição pelo vapor entre a grande quantidade de gotículas. Porém, vale ressaltar que durante 2002 o avião não realizou vôos abaixo da isoterma de 0°C , podendo então ser um reflexo da amostragem de dados.

ABSTRACT

The need to extend our knowledge about the microphysical processes' characteristics of the Amazonian clouds during different seasonal regimes active has motivated the development of this study. Based on this premises the main objective of this study was related to the vertical characterization of the clouds, through *in situ* measurements obtained by instrumented aircrafts during the experimental field campaigns of TRMM/LBA (1999) and Dry-To-Wet/RACCI (2002). The seasonal regimes of the Amazonian region presented very distinctive behaviors among each other, i.e., natural factors: availability of water vapor in the atmosphere; or by human interference: deforestation and forest fires. Analyses of the hydrometeors size distribution vertical structures indicated some significant characteristics among each season. During the Wet Season the reduced number of aerosols, possibly associated to its greater sizes, promoted an enhancement in the condensation growing process efficiency and consequently, in the processes of collision and coalescence. In the Wet Season, the 32.5 μm cloud droplets mode grew with expense of the $\sim 12.5\mu\text{m}$ cloud droplets, while in the Dry and Transition Seasons' it was based on the cloud droplets of $\sim 5.75\mu\text{m}$. Moreover, the Dry Season presented a second coalescence mode, despite its lower concentration when compared to the Wet Season, situated in 170 μm which could demonstrated a delay in the collision and coalescence process. The concentrations of the growing modes also exhibited relevant differences. In the condensation mode, the maxima concentrations were 11.6; 93.9 e 126.0 $\text{cm}^{-3}\mu\text{m}^{-1}$, and in the Collision and Coalescence mode, the concentrations were 1.5; 2.6×10^{-5} e $2.3\times 10^{-5}\text{cm}^{-3}\mu\text{m}^{-1}$ for the Wet, Dry and Transition Seasons, respectively. Besides the characterization of the seasons, it was possible to encounter some indication of the effect of anthropogenic pollution and the replacement of the forest. It was found that environments less polluted over forest cover have better growing processes efficiency. This effectiveness was revealed by the D_0 (diameter that represents the 50% liquid water content) vertical

variation that in the low polluted condition over forest areas reached $16\mu\text{m}$ increase, while under heavy polluted condition it was only $5.3\mu\text{m}$. There were also some indication of large hydrometeors suppression, such as those observed during the Wet Season. The hydrometeors reached a diameter of 12mm in the Wet Season while in the Dry and Transition Seasons its was 3.8 and 4.4mm , respectively. These results could represent the water vapor competition associated to the aerosols concentration available, although it is worth to mention that during 2002 the aircraft did not accomplished flights below the 0°C isotherm. Therefore, this effect could be a consequence of the data sampling used in this study.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1: CURVA DE KELVIN	27
FIGURA 1.2: CURVA DE KÖHLER PARA UMA GOTÍCULA INICIADA A 0°C ATRAVÉS DE UMA SOLUÇÃO DE 10 ⁻¹⁶ G DE NaCl. OS VALORES S* E R* REPRESENTAM A SUPERSATURAÇÃO E RAIOS CRÍTICOS, RESPECTIVAMENTE.	27
FIGURA 1.3: PROCESSO INICIAL DE FORMAÇÃO DE GOTÍCULAS DE NUVEM PARA DIVERSOS TAMANHOS DE NÚCLEOS DE CONDENSACÃO E VARIAÇÃO DA SUPERSATURAÇÃO DO AMBIENTE, CONFORME OCORRE A CONDENSACÃO DO VAPOR. (ADAPTADO DE WALLACE E HOBBS 2006).....	34
FIGURA 1.4: NOMENCLATURA ADOPTADA PARA OS HIDROMETEOROS EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO.....	35
FIGURA 1.5: VALORES CALCULADOS PARA EFICIÊNCIA DE COLISÃO, E, COM A GOTA COLETORA COM RAIOS R1 E GOTÍCULA COLETADA COM RAIOS R2. (ADAPTADO DE WALLACE E HOBBS 2006).....	36
FIGURA 1.6: RELAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA MÉDIA DE CONGELAMENTO E DIÂMETRO DA GOTÍCULA. ITENS EM VERMELHO CORRESPONDEM À NUCLEACÃO HETEROGÊNEA E ITENS EM AZUL, NUCLEACÃO HOMOGÊNEA. (ADAPTADO DE WALLACE E HOBBS 2006)	37
FIGURA 1.7: CONDIÇÕES IDEAIS DE TEMPERATURA E UMIDADE PARA O CRESCIMENTO NATURAL DE DIVERSOS TIPOS DE CRISTAIS DE GELO. (ADAPTADO DE MAGONO E LEE, 1966)	38
FIGURA 1.8: ESPECTROS DE TAMANHO DE PARTÍCULAS DE NUVEM, OBSERVADOS PRÓXIMO AO TOPO DE NUVENS CONTINENTAIS DO TIPO CUMULUS: (A) EM SEIS PEQUENOS CUMULUS EM DESENVOLVIMENTO, (B) EM CINCO CUMULUS COMPLEXOS E (C) EM QUATRO CUMULUS EMBEBIDOS EM NUVENS ESTRATIFORMES. (ADAPTADA DE HOBBS ET AL 1980)	40
FIGURA 1.9: CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA, MÁXIMO, MÉDIO E ADIABÁTICO VERSUS A ALTITUDE ACIMA DA BASE DA NUVEM. (ADAPTADO DE SCHEMENAUER ET. AL. 1980).....	42
FIGURA 1.10: CONCENTRAÇÃO, DIÂMETRO E ESPECTRO DE GOTÍCULAS VERSUS A ALTITUDE ACIMA DA BASE DA NUVEM. (ADAPTADO DE SCHEMENAUER ET. AL. 1980).....	42
FIGURA 1.11: ESPECTRO DE GOTAS DE NUVEM EM UM CUMULUS ISOLADO PRÓXIMO À COSTA LESTE AUSTRALIANA. (A) AMOSTRAGENS ADJACENTES TOMADAS COM 100M DE DISTANCIA ENTRE SI, PRÓXIMO AO TOPO DE UMA NUVEM COM 1400M DE PROFUNDIDADE; (B) VARIAÇÕES COM A ALTURA DO ESPECTRO DE GOTÍCULAS. (ADAPTADO DE WARNER 1969).	43
FIGURA 1.12: CONCENTRAÇÃO MÉDIA DE CCN EM FUNÇÃO DA SUPERSATURAÇÃO NECESSÁRIA PARA ATIVAÇÃO; (A) SOBRE O OCEANO, (B) SOBRE O CONTINENTE E (C) MÉDIA DE TODAS AS OBSERVAÇÕES. (ADAPTADO DE TWOMEY E WOJCIECHOWSKI, 1969).....	44
FIGURA 1.13: DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE GOTÍCULAS EM NUVENS DO TIPO CUMULUS, SOBRE O CONTINENTE E SOBRE O OCEANO, TAL QUE, ω REPRESENTA O CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA EM CADA CASO. (ADAPTADO DE SQUIRES, 1958)	45
FIGURA 1.14: DISTRIBUIÇÃO NUMÉRICA DE TAMANHO MÉDIA (LINHA GROSSA) PARA OS TRÊS PERÍODOS METEOROLÓGICOS, SEPARADAS EM QUASE HIDROFÓBICAS (LINHA FINA) E MODERADAMENTE HIGROSCÓPICA (LINHA TRACEJADA). (ADAPTADO DE RISSLER ET. AL., 2006).....	51
FIGURA 3.1: MEDIÇÃO ÚNICA DE UMA NUVEM ISOLADA. (A) SÉRIE TEMPORAL DA TEMPERATURA DO AR (LARANJA), DO PONTO DE ORVALHO (AZUL CLARO), CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA OBTIDO PELO CSIRO-KING (AZUL) E PELA FSSP (VERMELHO); (B) CONCENTRAÇÃO DE PARTÍCULAS E GOTAS E (C) TRAJETÓRIA REALIZADA PELO AVIÃO E IMAGEM DE SATÉLITE CORRESPONDENTE (GOES IRCH4).	64
FIGURA 3.2: MÚLTIPLAS MEDIÇÕES DE UM ÚNICO SISTEMA. (A) SÉRIE TEMPORAL DA TEMPERATURA DO AR (LARANJA), DO PONTO DE ORVALHO (AZUL CLARO), CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA OBTIDO PELO CSIRO-KING (AZUL) E PELA FSSP (VERMELHO); (B) CONCENTRAÇÃO DE PARTÍCULAS E GOTAS E (C) TRAJETÓRIA REALIZADA PELO AVIÃO E IMAGEM DE SATÉLITE CORRESPONDENTE (GOES IRCH4).	65
FIGURA 3.3: COMPOSIÇÃO DAS TRAJETÓRIAS DIÁRIAS E COBERTURA VEGETAL REALIZADAS DURANTE A ESTAÇÃO CHUVOSA.	67
FIGURA 3.4: COMPOSIÇÃO DAS TRAJETÓRIAS DIÁRIAS E COBERTURA VEGETAL REALIZADAS DURANTE A ESTAÇÃO SECA.....	68
FIGURA 3.5: COMPOSIÇÃO DAS TRAJETÓRIAS DIÁRIAS E COBERTURA VEGETAL REALIZADAS DURANTE A ESTAÇÃO DE TRANSIÇÃO.	68
FIGURA 4.1: PERFIS VERTICAIS UTILIZADOS PARA CARACTERIZAR A ESTAÇÃO CHUVOSA: (A) NÚMERO TOTAL DE GOTÍCULAS MEDIDO PELA FSSP, (B), (C) E (D) CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA PROVENIENTE DOS SENSORES FSSP, 2DC E 2DP, RESPECTIVAMENTE.	76
FIGURA 4.2: DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE GOTÍCULAS E GOTAS, E DISTRIBUIÇÃO DE CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA POR TAMANHO, OBTIDAS COM OS SENSORES FSSP, 2DC E 2DP EM OS DIVERSOS NÍVEIS DE PRESSÃO PARA O CASO DA ESTAÇÃO CHUVOSA, CASO EC 01, DE 23/01/1999 DAS 20:21 ÀS 20:34Z.....	81
FIGURA 4.3: TRAJETÓRIA DO VÔO CORRESPONDENTE AO CASO EC01. À ESQUERDA, ALTITUDE VERSUS LONGITUDE E À DIREITA, LATITUDE VERSUS LONGITUDE. A LINHA CONTÍNUA REPRESENTA O PERCURSO REALIZADO PELO AVIÃO E OS PONTOS, AS COORDENADAS ONDE FORAM TOMADAS AS MEDIDAS UTILIZADAS NAS DISTRIBUIÇÕES. A ESTRELA REPRESENTA O INÍCIO DA TRAJETÓRIA.....	81
FIGURA 4.4: DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE GOTÍCULAS E GOTAS, E DISTRIBUIÇÃO DE CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA POR TAMANHO, OBTIDAS COM OS SENSORES FSSP, 2DC E 2DP EM OS DIVERSOS NÍVEIS DE PRESSÃO PARA O CASO DA ESTAÇÃO CHUVOSA, CASO EC02, DE 24/01/1999 DAS 20:11 ÀS 20:28Z.....	83

FIGURA 4.5: TRAJETÓRIA DO VÔO CORRESPONDENTE AO CASO EC02. À ESQUERDA, ALTITUDE VERSUS LONGITUDE E À DIREITA, LATITUDE VERSUS LONGITUDE. A LINHA CONTÍNUA REPRESENTA O PERCURSO REALIZADO PELO AVIÃO E OS PONTOS, AS COORDENADAS ONDE FORAM TOMADAS AS MEDIDAS UTILIZADAS NAS DISTRIBUIÇÕES. A ESTRELA REPRESENTA O INÍCIO DA TRAJETÓRIA.....	84
FIGURA 4.6: DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE GOTÍCULAS E GOTAS, E DISTRIBUIÇÃO DE CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA POR TAMANHO, OBTIDAS COM OS SENSORES FSSP, 2DC E 2DP EM OS DIVERSOS NÍVEIS DE PRESSÃO PARA O CASO DA ESTAÇÃO CHUVOSA, CASO EC04, DE 30/01/1999 DAS 19:12 ÀS 20:54Z.....	85
FIGURA 4.7: TRAJETÓRIA DO VÔO CORRESPONDENTE AO CASO EC04. À ESQUERDA, ALTITUDE VERSUS LONGITUDE E À DIREITA, LATITUDE VERSUS LONGITUDE. A LINHA CONTÍNUA REPRESENTA O PERCURSO REALIZADO PELO AVIÃO E OS PONTOS, AS COORDENADAS ONDE FORAM TOMADAS AS MEDIDAS UTILIZADAS NAS DISTRIBUIÇÕES. A ESTRELA REPRESENTA O INÍCIO DA TRAJETÓRIA.....	86
FIGURA 4.8: DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE GOTÍCULAS E GOTAS, E DISTRIBUIÇÃO DE CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA POR TAMANHO, OBTIDAS COM OS SENSORES FSSP, 2DC E 2DP EM OS DIVERSOS NÍVEIS DE PRESSÃO PARA O CASO DA ESTAÇÃO CHUVOSA, CASO EC06, DE 20/02/1999 DAS 20:00 ÀS 20:14Z.....	88
FIGURA 4.9: TRAJETÓRIA DO VÔO CORRESPONDENTE AO CASO EC06. À ESQUERDA, ALTITUDE VERSUS LONGITUDE E À DIREITA, LATITUDE VERSUS LONGITUDE. A LINHA CONTÍNUA REPRESENTA O PERCURSO REALIZADO PELO AVIÃO E OS PONTOS, AS COORDENADAS ONDE FORAM TOMADAS AS MEDIDAS UTILIZADAS NAS DISTRIBUIÇÕES. A ESTRELA REPRESENTA O INÍCIO DA TRAJETÓRIA.....	89
FIGURA 4.10: DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE GOTÍCULAS E GOTAS, E DISTRIBUIÇÃO DE CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA POR TAMANHO, OBTIDAS COM OS SENSORES FSSP, 2DC E 2DP EM OS DIVERSOS NÍVEIS DE PRESSÃO PARA O CASO DA ESTAÇÃO CHUVOSA, CASO EC03, DE 26/01/1999 DAS 20:32 ÀS 22:12Z.....	90
FIGURA 4.11: TRAJETÓRIA DO VÔO CORRESPONDENTE AO CASO EC03. À ESQUERDA, ALTITUDE VERSUS LONGITUDE E À DIREITA, LATITUDE VERSUS LONGITUDE. A LINHA CONTÍNUA REPRESENTA O PERCURSO REALIZADO PELO AVIÃO E OS PONTOS, AS COORDENADAS ONDE FORAM TOMADAS AS MEDIDAS UTILIZADAS NAS DISTRIBUIÇÕES. A ESTRELA REPRESENTA O INÍCIO DA TRAJETÓRIA.....	91
FIGURA 4.12: DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE GOTÍCULAS E GOTAS, E DISTRIBUIÇÃO DE CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA POR TAMANHO, OBTIDAS COM OS SENSORES FSSP, 2DC E 2DP EM OS DIVERSOS NÍVEIS DE PRESSÃO PARA O CASO DA ESTAÇÃO CHUVOSA, CASO EC05, DE 01/02/1999 DAS 18:24 ÀS 19:55Z.....	92
FIGURA 4.13: TRAJETÓRIA DO VÔO CORRESPONDENTE AO CASO EC05. À ESQUERDA, ALTITUDE VERSUS LONGITUDE E À DIREITA, LATITUDE VERSUS LONGITUDE. A LINHA CONTÍNUA REPRESENTA O PERCURSO REALIZADO PELO AVIÃO E OS PONTOS, AS COORDENADAS ONDE FORAM TOMADAS AS MEDIDAS UTILIZADAS NAS DISTRIBUIÇÕES. A ESTRELA REPRESENTA O INÍCIO DA TRAJETÓRIA.....	93
FIGURA 4.14: DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE GOTÍCULAS E GOTAS, E DISTRIBUIÇÃO DE CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA POR TAMANHO, OBTIDAS COM OS SENSORES FSSP, 2DC E 2DP EM OS DIVERSOS NÍVEIS DE PRESSÃO PARA O CASO DA ESTAÇÃO CHUVOSA, CASO EC07, DE 21/02/1999 DAS 19:45 ÀS 20:49Z.....	94
FIGURA 4.15: TRAJETÓRIA DO VÔO CORRESPONDENTE AO CASO EC07. À ESQUERDA, ALTITUDE VERSUS LONGITUDE E À DIREITA, LATITUDE VERSUS LONGITUDE. A LINHA CONTÍNUA REPRESENTA O PERCURSO REALIZADO PELO AVIÃO E OS PONTOS, AS COORDENADAS ONDE FORAM TOMADAS AS MEDIDAS UTILIZADAS NAS DISTRIBUIÇÕES. A ESTRELA REPRESENTA O INÍCIO DA TRAJETÓRIA.....	95
FIGURA 4.16: PERFIS VERTICAIS UTILIZADOS PARA CARACTERIZAR A ESTAÇÃO SECA: (A) NÚMERO TOTAL DE GOTÍCULAS MEDIDO PELA FSSP, (B), (C) E (D) CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA PROVENIENTE DOS SENSORES FSSP, 200X E 200Y, RESPECTIVAMENTE. ...	96
FIGURA 4.17: DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE GOTAS E GOTÍCULAS, E DISTRIBUIÇÃO DE CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA POR TAMANHO, OBTIDAS COM OS SENSORES FSSP, 200X E 200Y EM OS DIVERSOS NÍVEIS DE PRESSÃO PARA O CASO DA ESTAÇÃO SECA, CASO ES08, DE 05/10/2002 DAS 16:43 ÀS 18:04Z.....	98
FIGURA 4.18: TRAJETÓRIA DO VÔO CORRESPONDENTE AO CASO ES08. À ESQUERDA, ALTITUDE VERSUS LONGITUDE E À DIREITA, LATITUDE VERSUS LONGITUDE. A LINHA CONTÍNUA REPRESENTA O PERCURSO REALIZADO PELO AVIÃO E OS PONTOS, AS COORDENADAS ONDE FORAM TOMADAS AS MEDIDAS UTILIZADAS NAS DISTRIBUIÇÕES. A ESTRELA REPRESENTA O INÍCIO DA TRAJETÓRIA.....	99
FIGURA 4.19: DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE GOTAS E GOTÍCULAS, E DISTRIBUIÇÃO DE CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA POR TAMANHO, OBTIDAS COM OS SENSORES FSSP, 200X E 200Y EM OS DIVERSOS NÍVEIS DE PRESSÃO PARA O CASO DA ESTAÇÃO SECA, CASO ES09, DE 05/10/2002 DAS 19:57 ÀS 20:31Z.....	101
FIGURA 4.20: TRAJETÓRIA DO VÔO CORRESPONDENTE AO CASO ES09. À ESQUERDA, ALTITUDE VERSUS LONGITUDE E À DIREITA, LATITUDE VERSUS LONGITUDE. A LINHA CONTÍNUA REPRESENTA O PERCURSO REALIZADO PELO AVIÃO E OS PONTOS, AS COORDENADAS ONDE FORAM TOMADAS AS MEDIDAS UTILIZADAS NAS DISTRIBUIÇÕES. A ESTRELA REPRESENTA O INÍCIO DA TRAJETÓRIA.....	101

FIGURA 4.21: DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE GOTAS E GOTÍCULAS, E DISTRIBUIÇÃO DE CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA POR TAMANHO, OBTIDAS COM OS SENSORES FSSP, 200X E 200Y EM OS DIVERSOS NÍVEIS DE PRESSÃO PARA O CASO DA ESTAÇÃO SECA, CASO ES11, DE 08/10/2002 DAS 19:20 ÀS 20:10Z.	103
FIGURA 4.22: TRAJETÓRIA DO VÔO CORRESPONDENTE AO CASO ES11. À ESQUERDA, ALTITUDE VERSUS LONGITUDE E À DIREITA, LATITUDE VERSUS LONGITUDE. A LINHA CONTÍNUA REPRESENTA O PERCURSO REALIZADO PELO AVIÃO E OS PONTOS, AS COORDENADAS ONDE FORAM TOMADAS AS MEDIDAS UTILIZADAS NAS DISTRIBUIÇÕES. A ESTRELA REPRESENTA O INÍCIO DA TRAJETÓRIA.....	103
FIGURA 4.23: PERFIS VERTICAIS UTILIZADOS PARA CARACTERIZAR A ESTAÇÃO SECA: (A) NÚMERO TOTAL DE GOTÍCULAS MEDIDO PELA FSSP, (B), (C) E (D) CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA PROVENIENTE DOS SENSORES FSSP, 200X E 200Y, RESPECTIVAMENTE. .	104
FIGURA 4.24: DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE GOTAS E GOTÍCULAS, E DISTRIBUIÇÃO DE CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA POR TAMANHO, OBTIDAS COM OS SENSORES FSSP, 200X E 200Y EM OS DIVERSOS NÍVEIS DE PRESSÃO PARA O CASO DA ESTAÇÃO SECA, CASO ES03, DE 28/09/2002 DAS 17:53 ÀS 19:11Z.	106
FIGURA 4.25: : TRAJETÓRIA DO VÔO CORRESPONDENTE AO CASO ES03. À ESQUERDA, ALTITUDE VERSUS LONGITUDE E À DIREITA, LATITUDE VERSUS LONGITUDE. A LINHA CONTÍNUA REPRESENTA O PERCURSO REALIZADO PELO AVIÃO E OS PONTOS, AS COORDENADAS ONDE FORAM TOMADAS AS MEDIDAS UTILIZADAS NAS DISTRIBUIÇÕES. A ESTRELA REPRESENTA O INÍCIO DA TRAJETÓRIA.....	106
FIGURA 4.26: DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE GOTAS E GOTÍCULAS, E DISTRIBUIÇÃO DE CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA POR TAMANHO, OBTIDAS COM OS SENSORES FSSP, 200X E 200Y EM OS DIVERSOS NÍVEIS DE PRESSÃO PARA O CASO DA ESTAÇÃO SECA, CASO ES05, DE 04/10/2002 DAS 15:17 ÀS 16:10Z.	108
FIGURA 4.27: TRAJETÓRIA DO VÔO CORRESPONDENTE AO CASO ES05. À ESQUERDA, ALTITUDE VERSUS LONGITUDE E À DIREITA, LATITUDE VERSUS LONGITUDE. A LINHA CONTÍNUA REPRESENTA O PERCURSO REALIZADO PELO AVIÃO E OS PONTOS, AS COORDENADAS ONDE FORAM TOMADAS AS MEDIDAS UTILIZADAS NAS DISTRIBUIÇÕES. A ESTRELA REPRESENTA O INÍCIO DA TRAJETÓRIA.....	108
FIGURA 4.28: DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE GOTAS E GOTÍCULAS, E DISTRIBUIÇÃO DE CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA POR TAMANHO, OBTIDAS COM OS SENSORES FSSP, 200X E 200Y EM OS DIVERSOS NÍVEIS DE PRESSÃO PARA O CASO DA ESTAÇÃO SECA, CASO ES06, DE 04/10/2002 DAS 18:18 ÀS 18:28Z.	109
FIGURA 4.29: : TRAJETÓRIA DO VÔO CORRESPONDENTE AO CASO ES06. À ESQUERDA, ALTITUDE VERSUS LONGITUDE E À DIREITA, LATITUDE VERSUS LONGITUDE. A LINHA CONTÍNUA REPRESENTA O PERCURSO REALIZADO PELO AVIÃO E OS PONTOS, AS COORDENADAS ONDE FORAM TOMADAS AS MEDIDAS UTILIZADAS NAS DISTRIBUIÇÕES. A ESTRELA REPRESENTA O INÍCIO DA TRAJETÓRIA.....	110
FIGURA 4.30: PERFIS VERTICAIS UTILIZADOS PARA CARACTERIZAR A ESTAÇÃO SECA: (A) NÚMERO TOTAL DE GOTÍCULAS MEDIDO PELA FSSP, (B), (C) E (D) CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA PROVENIENTE DOS SENSORES FSSP, 200X E 200Y, RESPECTIVAMENTE. .	110
FIGURA 4.31: DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE GOTAS E GOTÍCULAS, E DISTRIBUIÇÃO DE CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA POR TAMANHO, OBTIDAS COM OS SENSORES FSSP, 200X E 200Y EM OS DIVERSOS NÍVEIS DE PRESSÃO PARA O CASO DA ESTAÇÃO SECA, CASO ES01, DE 23/09/2002 DAS 19:07 ÀS 19:18Z.	112
FIGURA 4.32: TRAJETÓRIA DO VÔO CORRESPONDENTE AO CASO ES01. À ESQUERDA, ALTITUDE VERSUS LONGITUDE E À DIREITA, LATITUDE VERSUS LONGITUDE. A LINHA CONTÍNUA REPRESENTA O PERCURSO REALIZADO PELO AVIÃO E OS PONTOS, AS COORDENADAS ONDE FORAM TOMADAS AS MEDIDAS UTILIZADAS NAS DISTRIBUIÇÕES. A ESTRELA REPRESENTA O INÍCIO DA TRAJETÓRIA.....	112
FIGURA 4.33: DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE GOTAS E GOTÍCULAS, E DISTRIBUIÇÃO DE CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA POR TAMANHO, OBTIDAS COM OS SENSORES FSSP, 200X E 200Y EM OS DIVERSOS NÍVEIS DE PRESSÃO PARA O CASO DA ESTAÇÃO SECA, CASO ES02, DE 24/09/2002 DAS 19:55 ÀS 20:33Z.	114
FIGURA 4.34: TRAJETÓRIA DO VÔO CORRESPONDENTE AO CASO ES02. À ESQUERDA, ALTITUDE VERSUS LONGITUDE E À DIREITA, LATITUDE VERSUS LONGITUDE. A LINHA CONTÍNUA REPRESENTA O PERCURSO REALIZADO PELO AVIÃO E OS PONTOS, AS COORDENADAS ONDE FORAM TOMADAS AS MEDIDAS UTILIZADAS NAS DISTRIBUIÇÕES. A ESTRELA REPRESENTA O INÍCIO DA TRAJETÓRIA.....	114
FIGURA 4.35 : DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE GOTAS E GOTÍCULAS, E DISTRIBUIÇÃO DE CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA POR TAMANHO, OBTIDAS COM OS SENSORES FSSP, 200X E 200Y EM OS DIVERSOS NÍVEIS DE PRESSÃO PARA O CASO DA ESTAÇÃO SECA, CASO ES04, DE 30/09/2002 DAS 18:25 ÀS 18:44Z.	116
FIGURA 4.36: TRAJETÓRIA DO VÔO CORRESPONDENTE AO CASO ES04. À ESQUERDA, ALTITUDE VERSUS LONGITUDE E À DIREITA, LATITUDE VERSUS LONGITUDE. A LINHA CONTÍNUA REPRESENTA O PERCURSO REALIZADO PELO AVIÃO E OS PONTOS, AS COORDENADAS ONDE FORAM TOMADAS AS MEDIDAS UTILIZADAS NAS DISTRIBUIÇÕES. A ESTRELA REPRESENTA O INÍCIO DA TRAJETÓRIA.....	116
FIGURA 4.37: DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE GOTAS E GOTÍCULAS, E DISTRIBUIÇÃO DE CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA POR TAMANHO, OBTIDAS COM OS SENSORES FSSP, 200X E 200Y EM OS DIVERSOS NÍVEIS DE PRESSÃO PARA O CASO DA ESTAÇÃO SECA, CASO ES07, DE 04/10/2002 DAS 18:56 ÀS 19:31Z.	118

FIGURA 4.38: TRAJETÓRIA DO VÔO CORRESPONDENTE AO CASO ES07. À ESQUERDA, ALTITUDE VERSUS LONGITUDE E À DIREITA, LATITUDE VERSUS LONGITUDE. A LINHA CONTÍNUA REPRESENTA O PERCURSO REALIZADO PELO AVIÃO E OS PONTOS, AS COORDENADAS ONDE FORAM TOMADAS AS MEDIDAS UTILIZADAS NAS DISTRIBUIÇÕES. A ESTRELA REPRESENTA O INÍCIO DA TRAJETÓRIA.....	118
FIGURA 4.39 : DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE GOTAS E GOTÍCULAS, E DISTRIBUIÇÃO DE CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA POR TAMANHO, OBTIDAS COM OS SENSORES FSSP, 200x E 200y EM OS DIVERSOS NÍVEIS DE PRESSÃO PARA O CASO DA ESTAÇÃO SECA, CASO ES10, DE 06/10/2002 DAS 19:38 ÀS 20:35Z.....	120
FIGURA 4.40: TRAJETÓRIA DO VÔO CORRESPONDENTE AO CASO ES10. À ESQUERDA, ALTITUDE VERSUS LONGITUDE E À DIREITA, LATITUDE VERSUS LONGITUDE. A LINHA CONTÍNUA REPRESENTA O PERCURSO REALIZADO PELO AVIÃO E OS PONTOS, AS COORDENADAS ONDE FORAM TOMADAS AS MEDIDAS UTILIZADAS NAS DISTRIBUIÇÕES. A ESTRELA REPRESENTA O INÍCIO DA TRAJETÓRIA.....	120
FIGURA 4.41: PERFIS VERTICAIS UTILIZADOS PARA CARACTERIZAR A ESTAÇÃO DE TRANSIÇÃO: (A) NÚMERO TOTAL DE GOTÍCULAS MEDIDO PELA FSSP, (B), (C) E (D) CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA PROVENIENTE DOS SENSORES FSSP, 200x E 200y, RESPECTIVAMENTE.	121
FIGURA 4.42: DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE GOTAS E GOTÍCULAS, E DISTRIBUIÇÃO DE CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA POR TAMANHO, OBTIDAS COM OS SENSORES FSSP, 200x E 200y EM OS DIVERSOS NÍVEIS DE PRESSÃO PARA O CASO DA ESTAÇÃO SECA, CASO ET01, DE 09/10/2002 DAS 18:17 ÀS 19:12Z.....	123
FIGURA 4.43: TRAJETÓRIA DO VÔO CORRESPONDENTE AO CASO ET01. À ESQUERDA, ALTITUDE VERSUS LONGITUDE E À DIREITA, LATITUDE VERSUS LONGITUDE. A LINHA CONTÍNUA REPRESENTA O PERCURSO REALIZADO PELO AVIÃO E OS PONTOS, AS COORDENADAS ONDE FORAM TOMADAS AS MEDIDAS UTILIZADAS NAS DISTRIBUIÇÕES. A ESTRELA REPRESENTA O INÍCIO DA TRAJETÓRIA.....	123
FIGURA 4.44: DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE GOTAS E GOTÍCULAS, E DISTRIBUIÇÃO DE CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA POR TAMANHO, OBTIDAS COM OS SENSORES FSSP, 200x E 200y EM OS DIVERSOS NÍVEIS DE PRESSÃO PARA O CASO DA ESTAÇÃO SECA, CASO ET02, DE 11/10/2002 DAS 14:55 ÀS 15:23Z.....	125
FIGURA 4.45: TRAJETÓRIA DO VÔO CORRESPONDENTE AO CASO ET02. À ESQUERDA, ALTITUDE VERSUS LONGITUDE E À DIREITA, LATITUDE VERSUS LONGITUDE. A LINHA CONTÍNUA REPRESENTA O PERCURSO REALIZADO PELO AVIÃO E OS PONTOS, AS COORDENADAS ONDE FORAM TOMADAS AS MEDIDAS UTILIZADAS NAS DISTRIBUIÇÕES. A ESTRELA REPRESENTA O INÍCIO DA TRAJETÓRIA.....	125
FIGURA 4.46: DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE GOTAS E GOTÍCULAS, E DISTRIBUIÇÃO DE CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA POR TAMANHO, OBTIDAS COM OS SENSORES FSSP, 200x E 200y EM OS DIVERSOS NÍVEIS DE PRESSÃO PARA O CASO DA ESTAÇÃO SECA, CASO ET03, DE 12/10/2002 DAS 17:05 ÀS 17:21Z.....	127
FIGURA 4.47: TRAJETÓRIA DO VÔO CORRESPONDENTE AO CASO ET03. À ESQUERDA, ALTITUDE VERSUS LONGITUDE E À DIREITA, LATITUDE VERSUS LONGITUDE. A LINHA CONTÍNUA REPRESENTA O PERCURSO REALIZADO PELO AVIÃO E OS PONTOS, AS COORDENADAS ONDE FORAM TOMADAS AS MEDIDAS UTILIZADAS NAS DISTRIBUIÇÕES. A ESTRELA REPRESENTA O INÍCIO DA TRAJETÓRIA.....	127
FIGURA 4.48: DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE GOTAS E GOTÍCULAS, E DISTRIBUIÇÃO DE CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA POR TAMANHO, OBTIDAS COM OS SENSORES FSSP, 200x E 200y EM OS DIVERSOS NÍVEIS DE PRESSÃO PARA O CASO DA ESTAÇÃO SECA, CASO ET04, DE 13/10/2002 DAS 19:07 ÀS 19:23Z.....	129
FIGURA 4.49: TRAJETÓRIA DO VÔO CORRESPONDENTE AO CASO ET04. À ESQUERDA, ALTITUDE VERSUS LONGITUDE E À DIREITA, LATITUDE VERSUS LONGITUDE. A LINHA CONTÍNUA REPRESENTA O PERCURSO REALIZADO PELO AVIÃO E OS PONTOS, AS COORDENADAS ONDE FORAM TOMADAS AS MEDIDAS UTILIZADAS NAS DISTRIBUIÇÕES. A ESTRELA REPRESENTA O INÍCIO DA TRAJETÓRIA.....	129
FIGURA 5.1: DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE HIDROMETEOROS, OBTIDAS COM OS SENSORES FSSP, OAP-2DC E 2DP, ENTRE OS NÍVEIS DE PRESSÃO DE 900 A 500MB, PARA OS CASOS DA ESTAÇÃO CHUVOSA.	135
FIGURA 5.2: DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE HIDROMETEOROS, OBTIDAS COM OS SENSORES FSSP, 200x E 200y, ENTRE OS NÍVEIS DE PRESSÃO DE 900 A 500MB, PARA OS CASOS DA ESTAÇÃO SECA.	136
FIGURA 5.3: DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE HIDROMETEOROS, OBTIDAS COM OS SENSORES FSSP, 200x E 200y, ENTRE OS NÍVEIS DE PRESSÃO DE 900 A 500MB, PARA OS CASOS DA ESTAÇÃO DE TRANSIÇÃO.	137
FIGURA 5.4: DISTRIBUIÇÃO DE CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA POR TAMANHO, OBTIDA COM OS SENSORES FSSP, OAP-2DC E 2DP, ENTRE OS NÍVEIS DE PRESSÃO DE 900 A 500MB, PARA OS CASOS DA ESTAÇÃO CHUVOSA.	138
FIGURA 5.5: DISTRIBUIÇÃO DE CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA POR TAMANHO, OBTIDA COM OS SENSORES FSSP, 200x E 200y, ENTRE OS NÍVEIS DE PRESSÃO DE 900 A 500MB, PARA OS CASOS DA ESTAÇÃO SECA.....	139
FIGURA 5.6: DISTRIBUIÇÃO DE CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA POR TAMANHO, OBTIDA COM OS SENSORES FSSP, 200x E 200y, ENTRE OS NÍVEIS DE PRESSÃO DE 900 A 500MB, PARA OS CASOS DA ESTAÇÃO DE TRANSIÇÃO.....	140
FIGURA 5.7: FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA DO DIÂMETRO ONDE O CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA É 50% (D ₀), PARA AS CAMADAS ENTRE OS INTERVALOS DE PRESSÃO, 900-800, 800-700, 700-600 E 600-500MB, PARA A ESTAÇÃO CHUVOSA.....	141

FIGURA 5.8: FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA DO DIÂMETRO ONDE O CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA É 50% (D_0), PARA AS CAMADAS ENTRE OS INTERVALOS DE PRESSÃO, 900-800, 800-700, 700-600 E 600-500MB, PARA A ESTAÇÃO SECA.	142
FIGURA 5.9: FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA DO DIÂMETRO ONDE O CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA É 50% (D_0), PARA AS CAMADAS ENTRE OS INTERVALOS DE PRESSÃO, 900-800, 800-700, 700-600 E 600-500MB, PARA A ESTAÇÃO DE TRANSIÇÃO.	143
FIGURA 5.10: PERFIL VERTICAL DO DIÂMETRO DE 50% DO CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA, PARA AS ESTAÇÕES CHUVOSA (EC), SECA (ES) E DE TRANSIÇÃO (ET).	144
FIGURA 5.11: DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE HIDROMETEOROS, OBTIDAS COM OS SENSORES FSSP, 200X E 200Y, ENTRE OS NÍVEIS DE PRESSÃO DE 900 A 500MB, PARA OS CASOS POUCO POLUÍDOS SOBRE FLORESTA DA ESTAÇÃO SECA.	147
FIGURA 5.12: DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE HIDROMETEOROS, OBTIDAS COM OS SENSORES FSSP, 200X E 200Y, ENTRE OS NÍVEIS DE PRESSÃO DE 900 A 500MB, PARA OS CASOS MODERADAMENTE POLUÍDOS DA ESTAÇÃO SECA.	148
FIGURA 5.13: DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE HIDROMETEOROS, OBTIDAS COM OS SENSORES FSSP, 200X E 200Y, ENTRE OS NÍVEIS DE PRESSÃO DE 900 A 500MB, PARA OS CASOS INTENSAMENTE POLUÍDOS DA ESTAÇÃO SECA.	149
FIGURA 5.14: DISTRIBUIÇÃO DE CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA POR TAMANHO, OBTIDA COM OS SENSORES FSSP, 200X E 200Y, ENTRE OS NÍVEIS DE PRESSÃO DE 900 A 500MB, PARA OS CASOS POUCO POLUÍDOS SOBRE FLORESTA DA ESTAÇÃO SECA.	150
FIGURA 5.15: DISTRIBUIÇÃO DE CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA POR TAMANHO, OBTIDA COM OS SENSORES FSSP, 200X E 200Y, ENTRE OS NÍVEIS DE PRESSÃO DE 900 A 500MB, PARA OS CASOS MODERADAMENTE POLUÍDOS DA ESTAÇÃO SECA.	151
FIGURA 5.16: DISTRIBUIÇÃO DE CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA POR TAMANHO, OBTIDA COM OS SENSORES FSSP, 200X E 200Y, ENTRE OS NÍVEIS DE PRESSÃO DE 900 A 500MB, PARA OS CASOS INTENSAMENTE POLUÍDOS DA ESTAÇÃO SECA.	152
FIGURA 5.17: FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA DO DIÂMETRO ONDE O CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA É 50% (D_0), PARA AS CAMADAS ENTRE OS INTERVALOS DE PRESSÃO, 900-800, 800-700, 700-600 E 600-500MB, SOB CONDIÇÕES POUCO POLUÍDAS SOBRE FLORESTA (PPF) DA ESTAÇÃO SECA.	153
FIGURA 5.18: FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA DO DIÂMETRO ONDE O CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA É 50% (D_0), PARA AS CAMADAS ENTRE OS INTERVALOS DE PRESSÃO, 900-800, 800-700, 700-600 E 600-500MB, SOB CONDIÇÕES MODERADAMENTE POLUÍDAS (MP) DA ESTAÇÃO SECA.	154
FIGURA 5.19: FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA DO DIÂMETRO ONDE O CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA É 50% (D_0), PARA AS CAMADAS ENTRE OS INTERVALOS DE PRESSÃO, 900-800, 800-700, 700-600 E 600-500MB, SOB CONDIÇÕES INTENSAMENTE POLUÍDAS (MP) DA ESTAÇÃO SECA.	155
FIGURA 5.20: PERFIL VERTICAL DO DIÂMETRO DE 50% DO CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA, PARA AS CATEGORIAS POUCO POLUÍDO SOBRE FLORESTA (PPF), MODERADAMENTE POLUÍDO (MP) E INTENSAMENTE POLUÍDO (IP), DA ESTAÇÃO SECA.	156

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1: TIPOS DE NUVEM E SEUS VALORES CARACTERÍSTICOS DE CONTEÚDO DE ÁGUA LÍQUIDA, SUGERIDOS POR BOROVIKOV ET AL. (1963).....	41
TABELA 3.1: CRITÉRIOS APLICADOS PARA CLASSIFICAÇÃO DAS AMOSTRAGENS.	66
TABELA 3.2: PERÍODO DAS ESTAÇÕES SECA E DE TRANSIÇÃO DO ANO DE 2002.....	66
TABELA 3.3: REGIMES DA ESTAÇÃO CHUVOSA.	68
TABELA 3.4: PRINCIPAIS INFORMAÇÕES OBTIDAS ATRAVÉS DO LIVRO DE REGISTROS DO AVIÃO, DURANTE A ESTAÇÃO CHUVOSA, E IDENTIFICAÇÃO DOS TRECHOS ONDE AS MEDIÇÕES FORAM REALIZADAS SOBRE FLORESTA OU ÁREA DESMATADA. PARA DESCRIÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO, VIDE TABELA 3.1.....	71
TABELA 3.5: PRINCIPAIS INFORMAÇÕES OBTIDAS ATRAVÉS DO LIVRO DE REGISTROS DO AVIÃO, DURANTE A ESTAÇÃO SECA, E IDENTIFICAÇÃO DOS TRECHOS ONDE AS MEDIÇÕES FORAM REALIZADAS SOBRE FLORESTA OU ÁREA DESMATADA. PARA DESCRIÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO, VIDE TABELA 3.1.....	73
TABELA 3.6: CONTINUAÇÃO.....	75
TABELA 3.7: PRINCIPAIS INFORMAÇÕES OBTIDAS ATRAVÉS DO LIVRO DE REGISTROS DO AVIÃO, DURANTE A ESTAÇÃO DE TRANSIÇÃO, E IDENTIFICAÇÃO DOS TRECHOS ONDE AS MEDIÇÕES FORAM REALIZADAS SOBRE FLORESTA OU ÁREA DESMATADA. PARA DESCRIÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO, VIDE TABELA 3.1.....	75
TABELA 6.1: SÍNTESE DAS PRINCIPAIS VALORES OBTIDOS PARA CADA ESTAÇÃO (EC, ES E ET) E CONDIÇÃO DE POLUIÇÃO DA ESTAÇÃO SECA (PPF, MP E IP). AS COLUNAS, DA ESQUERDA PARA A DIREITA, REPRESENTAM: O DIÂMETRO MÉDIO DAS GOTÍCULAS QUE COMPUSERAM A 1ª MODA DA DISTRIBUIÇÃO; A CONCENTRAÇÃO NA 1ª MODA; O LWC NA 1ª MODA; O DIÂMETRO MÉDIO DAS GOTÍCULAS DA 2ª MODA; A CONCENTRAÇÃO NA 2ª MODA; O LWC NA 2ª MODA; O DIÂMETRO MÁXIMO OBSERVADO; O DIÂMETRO ONDE O LWC É 50%, O LWC TOTAL DE CADA SENSOR, FSSP, OAP-2DC/200x E OAP-2DP/200y.....	160

LISTA DE ABREVIATURAS

CC Colisão e Coalescência

CCN Núcleos De Condensação De Nuvem

(do inglês, Cloud Condensation Nuclei)

IC Núcleos de condensação de gelo

(do inglês, Ice Nuclei)

LBA Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia

LWC Conteúdo de água líquida

(do inglês, Liquid Water Content)

NCL Nível De Condensação Por Levantamento

TRMM Tropical Rainfall Measuring Mission

WETAMC Wet season Atmospheric Mesoscale Campaign

ZCAS Zona de Convergência do Atlântico Sul

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Formação de Gotículas e Gelo.....	25
1.2	Distribuição de Tamanho de Hidrometeoros	39
1.3	Análise de espectros.....	46
1.4	Padrões Observados na Amazônia: Estação Chuvosa	47
1.5	Padrões Observados na Amazônia: Estação Seca e de Transição	49
2	JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS	52
2.1	O Cenário Atual	52
2.2	A Importância e Necessidade do Estudo	53
3	TRATAMENTO DOS DADOS.....	53
3.1	Instrumentos Utilizados nas aeronaves.....	55
3.2	Correções e Calibrações dos Dados.....	62
3.3	Caracterização das Amostras	66
4	CARACTERIZAÇÃO DAS NUVENS.....	76
4.1	Estação Chuvosa, 1999	76
4.2	Estação Seca	96
4.3	Estação de Transição	121
5	DIFERENÇAS MICROFÍSICAS	130
5.1	Estação Chuvosa × Estação Seca × Estação de Transição.....	130
5.2	Poluído × Não Poluído.....	144
6	CONCLUSÕES.....	157
7	REFERÊNCIAS	161

1 INTRODUÇÃO

O ciclo hidrológico é movido por uma série de processos complexos. Dentre eles, o principal responsável pelo fechamento do ciclo é a precipitação. É nos trópicos que encontramos os sistemas convectivos responsáveis pela maior parte da precipitação global (Huffman et al 1997). Porém, para aprimorar qualquer estudo relativo à precipitação, como por exemplo, a obtenção de resultados mais precisos dos modelos numéricos de previsão de tempo e clima, ou mesmo para compreender melhor os impactos da interferência humana no meio ambiente, é imprescindível conhecer profundamente os mecanismos que atuam dentro das nuvens.

A ciência que descreve todos os processos internos à nuvem, desde a formação das gotículas até o momento em que a precipitação deixa sua base, é conhecida como microfísica de nuvens. Por meio dela, é possível compreender os processos responsáveis pela formação de precipitação, que é resultado da produção de gotas de tamanhos precipitáveis. Uma vez que a nuvem se forma, em seu interior encontram-se gotículas de diversos tamanhos, crescendo a diferentes taxas e por distintos processos. Este crescimento diferenciado das gotículas é causado pela variabilidade espaço-temporal de diversos parâmetros meteorológicos, como temperatura, pressão, disponibilidade de vapor d'água e núcleos de condensação. Como resultado, a concentração de gotículas varia ao longo do espectro de tamanho e, portanto, exibe uma função cuja forma é determinada pelos processos de crescimento, conhecida como Distribuição de Tamanho de gotas, ou Hidrometeoros (DTH).

Através de medições realizadas por aeronaves (Squires, 1958; Boravikov *et al.* 1963; Warner, 1969; Hobbs *et al.* 1980; Vali, 1997; Stith *et al.* 2002) é possível obter a DTH instantânea de uma nuvem, e através dela é possível identificar as características dos processos de crescimento bem como as condições ambientais que originaram tal distribuição.

Deste modo, a análise de múltiplas DTH obtidas *in-situ* permite compreender a dinâmica local de uma região e sua variabilidade sazonal, ou até mesmo quantificar a influência antropogênica na formação e desenvolvimento das nuvens.

A introdução deste trabalho apresenta os principais aspectos da teoria da Microfísica de Nuvens, os processos de nucleação, crescimento de gotículas e cristais de gelo e desenvolvimento de uma população de gotículas. Adiante, são discutidas algumas características relevantes das DTH obtidas através de medições com aeronaves em diversas regiões do mundo. Também são abordados alguns dos principais padrões sazonais do clima na Amazônia, estação chuvosa, seca e de transição, especialmente durante as campanhas experimentais realizadas em 1999 e 2002. Uma vez que este estudo utiliza observações sobre a região Amazônica, o segundo capítulo, Justificativa e Objetivos, compreende uma breve discussão do estado da Arte, *i.e.*, os aspectos microfísicos da região, e discute a importância deste estudo. No terceiro capítulo, Dados, são descritos com maiores detalhes as fontes e os dados utilizados ao longo de todo desenvolvimento do trabalho, e em seguida, expõe alguns detalhes dos sensores a bordo das aeronaves utilizadas durante as campanhas experimentais tratadas neste trabalho. O quarto capítulo, Metodologia, descreve todas as etapas de tratamento e correção dos dados. O quinto capítulo, Análises, discute os resultados obtidos e o sexto capítulo, apresenta as conclusões.

1.1 Formação de Gotículas e Gelo

Uma parcela de ar está saturada quando sua pressão parcial de vapor é igual à pressão de vapor exercida por uma superfície plana de água. Isto significa que a camada de ar contida em um recipiente termicamente isolado parcialmente preenchido com água, estará saturada quando a transferência de moléculas entre a fase líquida e de vapor for igual. Esta é uma situação de equilíbrio e a pressão de vapor exercida pela parcela de ar é função somente de sua temperatura, como descreve a equação de Clausius-Clapeyron (1.1):

$$\frac{de_s}{dT} = \frac{L_v e_s}{R_v T^2} \quad 1.1$$

Onde,

e_s é a pressão de vapor de saturação, T é a temperatura do ar, L_v é o calor latente de evaporação e R_v é a constante do gás para o vapor de água.

Na atmosfera a saturação pode ser atingida pelo resfriamento adiabático de uma parcela de ar em ascensão, por levantamento forçado, por convecção ou por mistura de massas de ar. A nucleação de gotículas ou cristais de gelo pode ocorrer a partir da saturação de uma parcela de ar em determinado nível de temperatura e pressão, quando esta parcela continua a ascender pela ação do empuxo sobre ela exercido ou pelas forças mecânicas de levantamento. Quando condução ocorre, a liberação de calor latente devido à condensação do vapor pode aumentar a força do empuxo.

- **Nucleação Homogênea e Heterogênea**

Para que uma gotícula de água pura cresça, a pressão de vapor de saturação sobre a superfície esférica da gota deve ser inferior à pressão de vapor de saturação do ambiente, como descreve a Equação de Kelvin (1.2).

$$e_s(r) = e_s(\infty) \exp\left(\frac{2\sigma}{rR_v\rho T}\right) \quad 1.2$$

Onde,

$e_s(r)$ é a pressão de vapor de saturação sobre a superfície esférica de uma gotícula de raio r com tensão superficial σ e densidade ρ a uma temperatura T . $e_s(\infty)$ é a pressão de vapor de saturação sobre uma superfície plana de água, comumente chamada de e_s do ambiente.

Tal que a supersaturação é definida pela razão $e_s(r)/e_s(\infty)$ como:

$$S [\%] = 100 * \left(\frac{e_s(r)}{e_s(\infty)} - 1\right) \quad 1.3$$

A diferença entre as pressões de vapor exercidas pela superfície esférica e plana é conseqüência das diferenças entre as tensões superficiais de cada uma, *i.e.*, quanto maior o raio da gotícula maior será a tensão intra-molecular na sua superfície e, portanto, maior é a dificuldade que as moléculas têm de escaparem. Através da Equação de Kelvin (1.2) é possível observar que quanto maior o raio inicial da gotícula, menor será a pressão de vapor de saturação. Assim, para um raio infinito, a pressão de vapor de saturação sobre a superfície esférica se iguala à pressão de vapor de saturação sobre a superfície plana, tornando possível a condensação do vapor sobre este tipo de superfície. Entretanto, como mostra a Figura 1.1, na atmosfera a formação de gotículas por nucleação homogênea requer valores elevados de supersaturação, portanto não ocorre espontaneamente, pois para que uma molécula de água dê origem à uma gotícula seria necessário uma supersaturação das ordem de 400%.

Como a supersaturação observada na atmosfera raramente excede 102%, para que uma gotícula se forme é necessário que haja nucleação heterogênea, *i.e.*, presença de núcleos de condensação (CCN). Os CCN atuam como soluto e reduzem a pressão de vapor de saturação sobre a solução da gota, permitindo sua formação em baixa supersaturação (Figura 1.2). Desta maneira, o processo de surgimento e crescimento das gotículas se dá pela combinação do efeito de soluto, promovido pela presença de certas substâncias que compõem os núcleos de condensação, e pelo efeito de curvatura, que favorece o crescimento das

gotículas através da condensação do vapor sobre sua superfície, curva de Köhler (Köhler, 1921, Equação 1.4).

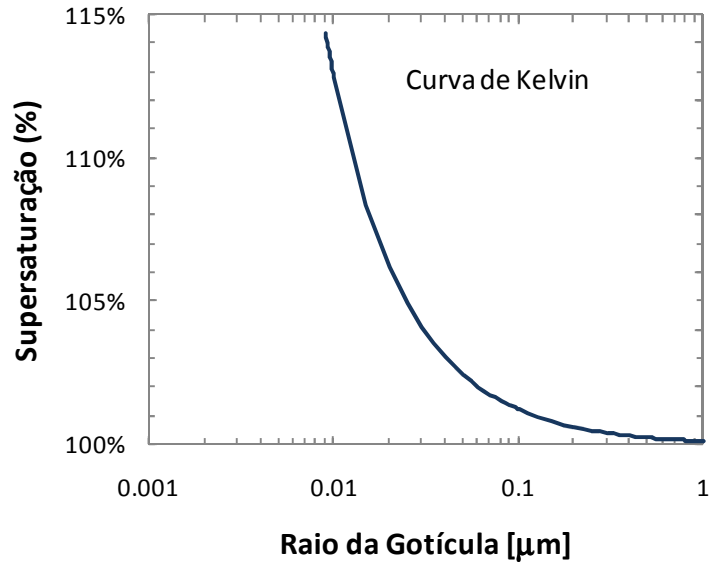


Figura 1.1: Curva de Kelvin

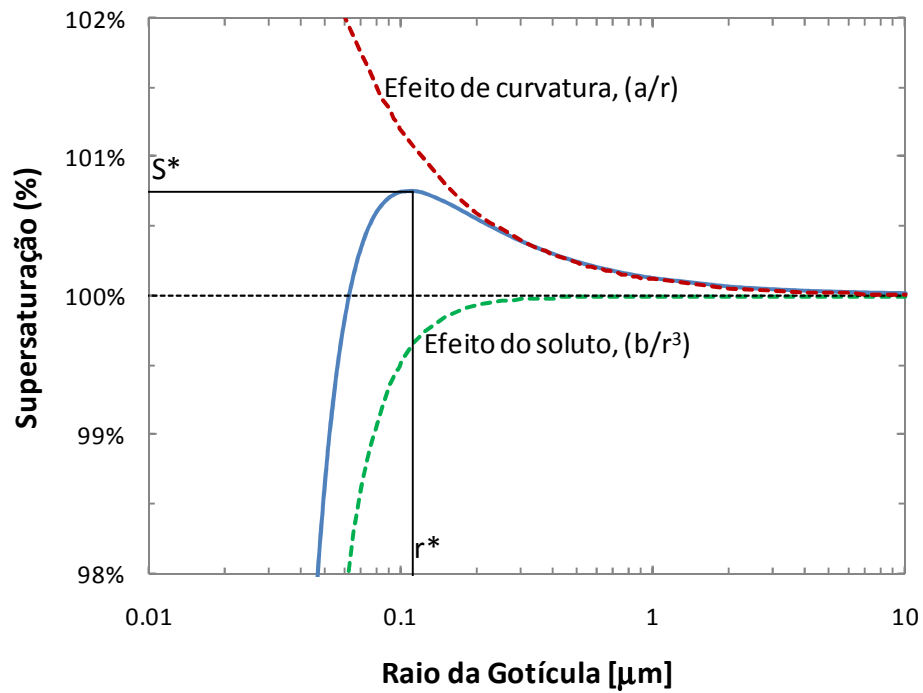


Figura 1.2: Curva de Köhler para uma gotícula iniciada a 0°C através de uma solução de 10^{-16}g de NaCl. Os valores S^* e r^* representam a Supersaturação e raio crítico, respectivamente.

Equação de Köhler:

$$\frac{e_s(r)}{e_s(\infty)} = 1 + \frac{a}{r} - \frac{b}{r^3} \quad 1.4$$

Onde,

$a = 2\sigma/\rho_l R_v T \approx 3,3 \times 10^{-5}/T$ e $b = 3im_v M/4\pi\rho_l m_s \approx 4,3iM/m_s$, i é o grau de dissociação iônica, M é a massa de soluto, m_s é o peso molecular do soluto e m_v é o peso molecular do vapor. O termo $(1 + a/r)$ é o termo de curvatura e (b/r^3) é o termo de soluto.

A curva de Köhler (Equação 1.4) apresenta a dependência pressão de vapor de saturação da gotícula em função do termo de curvatura (a/r) e do soluto (b/r^3), conforme mostra a Figura 1.2. Observa-se que o efeito do soluto é de diminuir a Supersaturação crítica necessária para que a gotícula cresça. Quando a gota cresce em ambiente supersaturado ($S > I$), a gotícula pode ser ativada, pois o seu crescimento não depende mais da supersaturação do meio, já que a gotícula adquire um tamanho grande suficiente para que seu crescimento passe a ser regido pelo efeito de curvatura, ou seja, a tensão superficial da gotícula é capaz de impedir que as moléculas de água escapem para o ambiente. O tamanho do raio de uma gotícula onde sua função de crescimento deixa de seguir o efeito de soluto e passa a ser determinada pelo efeito de curvatura, é conhecido como raio crítico, representado na Figura 1.2 por r^* . Após atingir o raio crítico a gotícula se encontra ativada e continuará a crescer mesmo em ambiente subsaturado.

- **Crescimento por condensação de uma gotícula isolada**

O processo de crescimento de uma gotícula se dá pela difusão das moléculas de água sobre a sua superfície. A taxa de crescimento de uma gotícula esférica, estacionária, por condensação, dr/dt , pode ser obtida através da Lei de Fick. O fluxo em um campo de vapor isotrópico com densidade constante, ρ_∞ , situado a uma distância R do centro da gotícula, é dado por:

$$F_w = D \frac{d\rho}{dR} \quad 1.5$$

Onde,

r é o raio da gotícula; D é o coeficiente de difusão de vapor d'água no ar e ρ é a densidade de vapor na superfície da gota. .

A taxa de transporte de massa, obtida através da área pelo fluxo:

$$T_w = 4\pi r^2 F_w = \text{constante} = \frac{dm}{dt} \quad 1.6$$

$$\frac{dm}{dt} = 4\pi r^2 D \left(\frac{d\rho}{dR} \right) \quad 1.7$$

$$4\pi D \int_{\rho}^{\rho_{\infty}} d\rho = \frac{dm}{dt} \int_r^{r_{\infty}} \frac{dR}{R^2} \quad 1.8$$

O crescimento por difusão de vapor uma gota isolada em repouso num campo de vapor é obtido pela integração da Equação 1.7:

$$\frac{dm}{dt} = 4\pi r D (\rho_{\infty} - \rho) \quad 1.9$$

- Se $\rho_{\infty} > \rho$, a gota cresce
- Se $\rho_{\infty} < \rho$, a gota evapora

De forma que ρ_{∞} é determinado pelas condições ambiente, e ρ depende do tamanho, composição química e temperatura da gota. Entretanto, a temperatura na superfície da gota não é a mesma do ambiente, já que a liberação de calor latente tende a aumentar a temperatura da gota. Então, considerando a difusão de calor:

$$dQ = L_v \frac{dm}{dt} \quad 1.10$$

Onde,

L é o calor latente de evaporação da água, $L=2,5.10^6 \text{J/kg}$.

A taxa de condução (dissipação) de calor sobre a superfície da gota (calor sensível)

é:

$$-4\pi r^2 K \frac{dT}{dR} = dQ = L_v \frac{dm}{dt} \quad 1.11$$

Onde,

K é o coeficiente de condutividade térmica.

$$4\pi K \int_T^{T_\infty} dT = L_v \frac{dm}{dt} \int_r^{r_\infty} \frac{dR}{R^2} \quad 1.12$$

A difusão de calor sobre a superfície da gota é obtida pela integração da Equação 1.12:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{4\pi r K}{L_v} (T_r - T_\infty) \quad 1.13$$

Uma vez que m é dado por $m = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho$:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{4}{3}\pi \rho 3r^2 \frac{dr}{dt} \quad 1.14$$

Substituindo na Equação de difusão de vapor 1.9, aplicando a Equação geral dos gases para o vapor de água ($e = \rho R_v T$), e assumindo $\frac{1}{T_\infty} \sim \frac{1}{T}$:

$$r \frac{dr}{dt} \cong \frac{D}{\rho R_v T_\infty} (e_\infty - e) \quad 1.15$$

Similarmente:

$$r \frac{dr}{dt} \cong \frac{K}{\rho L_v} (T - T_\infty) \quad 1.16$$

Sendo a supersaturação ambiente $S = \frac{e_\infty}{e_{s_\infty}}$, a Equação 1.15 fica:

$$r \frac{dr}{dt} \frac{\rho R_v T_\infty}{D} = (S e_{s_\infty} - e) = \left(S - \frac{e}{e_{s_\infty}} \right) e_{s_\infty} \quad 1.17$$

Rearranjando os termos, e multiplicando por $e_s = e_s(r)$:

$$\frac{e_s}{e_{s_\infty}} = \frac{e_s}{e} \left(S - \frac{\rho R_v T_\infty}{D e_s} r \frac{dr}{dt} \right) \quad 1.18$$

Assumindo que $e^x = 1 + x$ para $x \ll 1$, e aplicando à forma da Equação de Clausius-Clapeyron (1.1) dada por:

$$\frac{e_s}{e_{s_\infty}} = \exp \left(\frac{L_v}{R_v T_\infty^2} (T - T_\infty) \right) \quad 1.19$$

temos que: $\frac{L_v}{R_v T_\infty^2} (T - T_\infty) \ll 1$ e portanto, $\frac{e_s}{e_{s_\infty}} \approx 1 + \left(\frac{L_v}{R_v T_\infty^2} (T - T_\infty) \right)$ 1.20

Utilizando as Equações 1.16 e 1.18

$$1 + \frac{\rho L_v^2}{K R_v T_\infty^2} r \frac{dr}{dt} = \frac{e_s}{e} \left(S - \frac{\rho R_v T_\infty}{D e_s} r \frac{dr}{dt} \right) \quad 1.21$$

Definindo os termos de condução de calor e vapor como F_k e F_d , respectivamente:

$$F_k = \frac{\rho L_v^2}{K R_v T_\infty^2} \quad 1.22$$

$$F_D = \frac{\rho R_v T_\infty}{D e_s} \quad 1.23$$

Incluindo os efeitos de curvatura na pressão de vapor de equilíbrio da gota, a aproximação para a taxa de crescimento de uma gota por condensação fica:

$$r \frac{dr}{dt} = \frac{(S-1) - \frac{a}{r} + \frac{b}{r^3}}{[F_D + F_k \frac{e}{e_s}]} \quad 1.24$$

Onde,

F_k é o termo de condução de calor e F_d é o termo de difusão de vapor.

Quando a gotícula se torna suficientemente grande, os termos $\frac{a}{r}$ e $\frac{b}{r^3}$ podem ser desprezados, $\frac{e}{e_s} = 1$, e a taxa de crescimento de uma única gotícula pode ser representada pela Equação 1.25, conhecida como aproximação parabólica de crescimento:

$$r(t) = \sqrt{r_0^2 + 2t \frac{(S-1)}{[F_k + F_d]}} \quad 1.25$$

- **Crescimento de uma população de gotículas**

Enquanto o crescimento de uma gotícula depende somente da relação entre a supersaturação, temperatura, soluto e raio de curvatura; o crescimento de uma população de gotículas depende também do consumo de vapor de água da nuvem em desenvolvimento, provocando uma variação temporal da super saturação.

Esta variação depende de um termo de produção de vapor, determinado pelo resfriamento durante a ascensão adiabática (corrente ascendente), e de um termo de consumo, movido pela condensação do vapor em gotículas (Equação 1.26). Uma vez que o termo de consumo prevalece sobre o termo de produção, as gotículas não ativadas evaporam de forma a suprir a deficiência de vapor, provocada pelo crescimento das gotículas ativadas. A Figura 1.3 descreve a evolução deste processo ao longo do tempo. Após a supersaturação atingir o valor máximo, $S \sim 0,4\%$, as gotículas não ativadas, $M=10^{-18}$ e $M=10^{-19}$, evaporam. Já as gotículas que permanecem, $M=10^{-15}$, $M=10^{-16}$ e $M=10^{-17}$, após certo tempo, apresentam uma acentuada diminuição na sua taxa de crescimento, pois mesmo que haja supersaturação, sua área superficial aumenta com o quadrado do raio e a taxa de condensação de vapor em torno da gotícula não é suficiente para manter a mesma taxa de crescimento anterior, tal como descrito pela Equação Parabólica (Equação 1.25). Observa-se ainda que a supersaturação crítica diminui, mesmo com a evaporação da gotícula não ativada, pois ela não é suficiente para suprir o vapor condensado nas gotículas maiores.

$$\frac{dS}{dt} = P - C = \frac{1}{T} \left[\frac{\varepsilon L g}{R_d c_p T} - \frac{g}{R_d} \right] \frac{dz}{dt} - \rho \left[\frac{R_d T}{\varepsilon e_s} + \frac{\varepsilon L^2}{p T c_p} \right] \frac{d\chi}{dt} \quad 1.26$$

Onde,

P é o termo de produção e C é o termo de condensação. dz/dt é a velocidade vertical do ar, $d\chi/dt$ é a taxa de condensação em unidades de massa de condensado por massa de ar por unidade de tempo. c_p é calor específico a pressão constante, $c_p=1005,0 \text{ J/kgK}$, R_d é a constante dos gases para o ar seco, $R_d=287,05 \text{ J/kgK}$, L é o calor latente de evaporação da água, $L=2,5 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$, p é a pressão atmosférica, e_s é a pressão de vapor de saturação ambiente, e $\varepsilon=R'/R_v=0,622$,

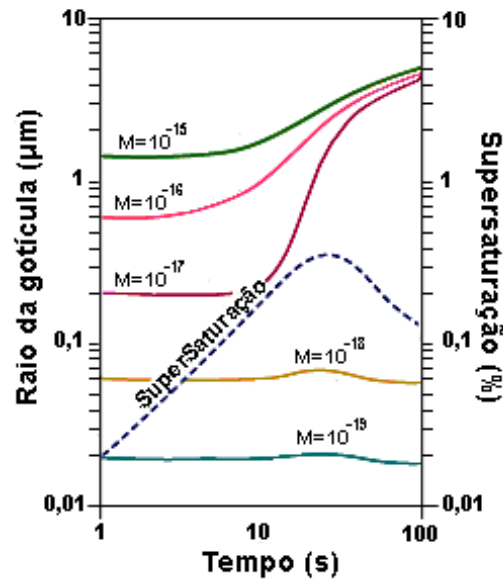


Figura 1.3: Processo inicial de formação de gotículas de nuvem para diversos tamanhos de núcleos de condensação e variação da Supersaturação do ambiente, conforme ocorre a condensação do vapor. (Adaptado de Wallace e Hobbs 2006).

Com o auxílio dos processos turbulentos (Almeida, 1976, 1979) e núcleos de condensação gigantes, algumas gotículas crescem rapidamente até o tamanho de $20\mu\text{m}$, quando tem início o processo de crescimento por colisão e coalescência (de agora em diante CC) que permite que as gotículas cresçam até gotas de chuva. McDonald (1958) sugeriu o limite de $r = 100\mu\text{m}$ para diferenciar gotas de nuvem das gotas de chuva, contudo, ao tratar de uma gota de chuva típica é assumido raio de $1000\mu\text{m}$. A nomenclatura adotada neste trabalho para os intervalos de tamanho dos hidrometeoros, de agora em diante, será tal como descreve a Figura 1.4.

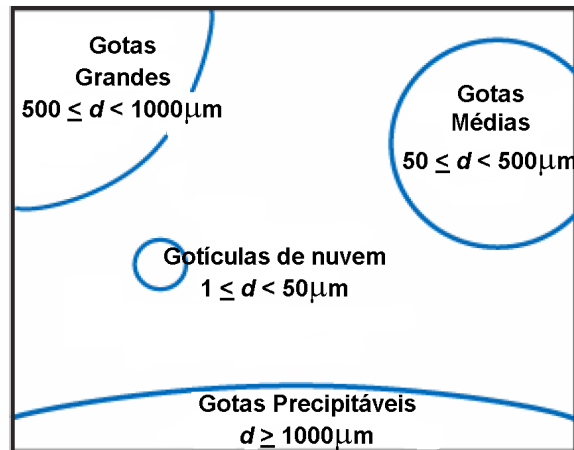


Figura 1.4: Nomenclatura adotada para os hidrometeoros em função do diâmetro.

Colisões entre gotículas ocorrem principalmente por efeito gravitacional, ou seja, quanto maior for a diferença da velocidade relativa entre gotas grandes e pequenas, maior a chance de ocorrer colisão entre as gotículas. A eficiência de colisão (Figura 1.5) depende das forças inerciais e aerodinâmicas, pois quanto maior a inércia da gotícula a ser coletada, maior é a dificuldade de ser defletida pelo fluxo do ar para fora da área de colisão da gota coletora. Além disso, colisão não significa que haverá coalescência. Ao colidirem, as gotículas podem simplesmente não coalescer, podem coalescer temporariamente e após a separação manterem suas identidades originais, ou ainda podem coalescer e em seguida sofrer uma quebra em numerosas gotículas pequenas. Desta forma, o crescimento por CC (Equação 1.27) depende do conteúdo de água líquida da nuvem e da eficiência de coleta isto é, a turbulência no interior da nuvem:

$$\frac{dR}{dt} = \frac{\pi}{3} \int_0^R \left(\frac{R+r}{R} \right)^2 [u(R) - u(r)] n(r) r^3 E(R, r) dr \quad 1.27$$

Onde,

R é o raio da gota coletora, r é o raio da gota coletada, $u(R)$ é a velocidade terminal da gota coletora, $u(r)$ é a velocidade terminal da gota coletada, $n(r)$ é a distribuição de gotículas e $E(R, r)$ é a eficiência de coleta.

Pode-se ainda reescrever de forma simplificada (Modelo de Bowen), assumindo que as gotículas coletadas são muito menores que a gota coletora, tal que $u(R) \gg u(r)$ e $(R + r)^2/R^2 \sim 1$:

$$\frac{dR}{dt} = \frac{\bar{E}M}{4\rho_l} u(R) \quad 1.28$$

Onde,

\bar{E} é o valor médio efetivo da eficiência de coleta da população de gota e M é o conteúdo de água líquida da nuvem.

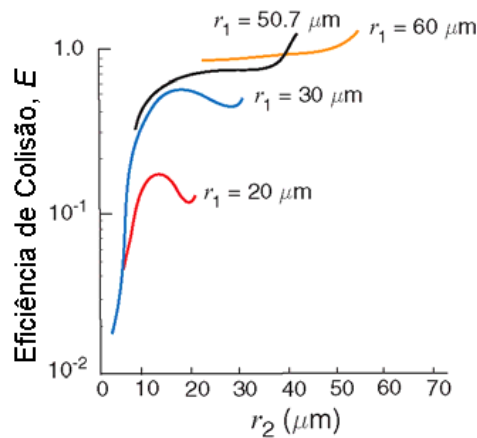


Figura 1.5: Valores calculados para Eficiência de Colisão, E , com a gota coletora com raio r_1 e gotícula coletada com raio r_2 . (Adaptado de Wallace e Hobbs 2006)

Analisando a equação parabólica de crescimento por condensação, observa-se um efeito de estreitamento do espectro que representa uma baixa eficiência de coleta entre gotículas com raio muito pequeno. Dessa maneira, é inviável obter gotas de chuva em intervalos de tempo da ordem de 30 minutos. Deste modo, para que o processo de CC se inicie e haja formação de precipitação num intervalo de tempo tal como é observado, é necessário que existam outros processos intermediários como, flutuações da supersaturação, promovendo crescimento diferenciado por condensação (Baker *et. al* 1980); efeitos turbulentos que geram coalescência estocástica (Almeida, 1976, 1979 e Wang *et. al* 2006); atuação de CCN gigantes; e efeitos de entranhamento.

- **Gelo**

Uma vez que a nuvem atinge temperaturas abaixo de 0°C , pode haver formação de gelo por congelamento de gotículas de nuvem ou sublimação de vapor. Quando presentes, os embriões de gelo (gotículas que congelam ou núcleos de gelo), crescem rapidamente por sublimação devido à diferença entre as pressões de vapor da água e do gelo, levando à evaporação de gotículas quando o ambiente encontrar-se subsaturado em relação à água. O surgimento de embriões de gelo pode acontecer por nucleação homogênea ou heterogênea. No caso homogêneo, é necessário que haja uma reorganização das moléculas de água em uma estrutura cristalina. O congelamento espontâneo depende tanto da temperatura quanto do tamanho da gota que sofre o processo (Figura 1.6). A temperatura de nucleação homogênea do gelo é inversamente proporcional ao tamanho da gota, no caso de uma gotícula de $5\mu\text{m}$ o congelamento ocorre em temperaturas próximas a -40°C .

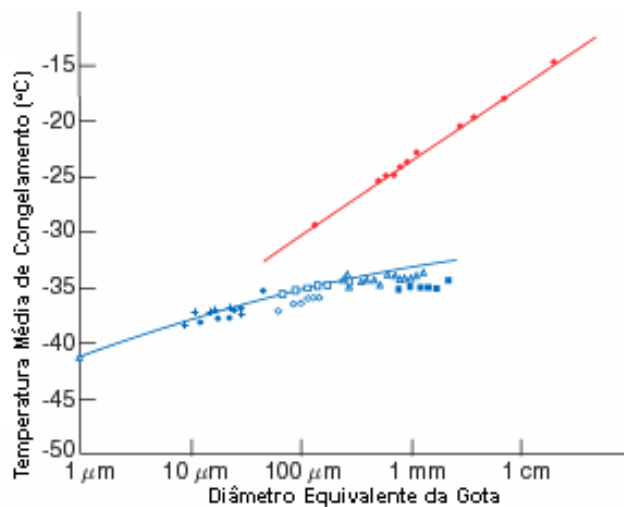


Figura 1.6: Relação entre a temperatura média de congelamento e diâmetro da gotícula. Itens em vermelho correspondem à nucleação heterogênea e itens em azul, nucleação homogênea. (Adaptado de Wallace e Hobbs 2006)

Cristais de gelo formados por nucleação heterogênea surgem quando a temperatura do topo da nuvem está em torno de -5°C e a ativação pelo núcleo de gelo pode ocorrer por deposição, congelamento, contato ou imersão. Os tipos de partículas que servem como

núcleos de gelo nem sempre são os mesmos que servem como CCN, especialmente porque na maior parte das vezes eles são insolúveis em água. Partículas com o espaçamento molecular e arranjo cristalográfico similares às do gelo com estrutura hexagonal tendem a serem núcleos de gelo eficientes.

O tipo de cristal de gelo resultante do processo de nucleação depende de diversos fatores físicos e químicos, como por exemplo, a composição do núcleo de gelo, o processo de ativação, e as condições de supersaturação, intensidade e tempo de permanência na corrente ascendente. A face de um cristal de gelo é predominantemente hexagonal e pode apresentar formas semelhantes a colunas, pratos ou dendritos. A Figura 1.7 mostra diversos cristais de gelo e as condições ideais de temperatura e umidade para sua formação.

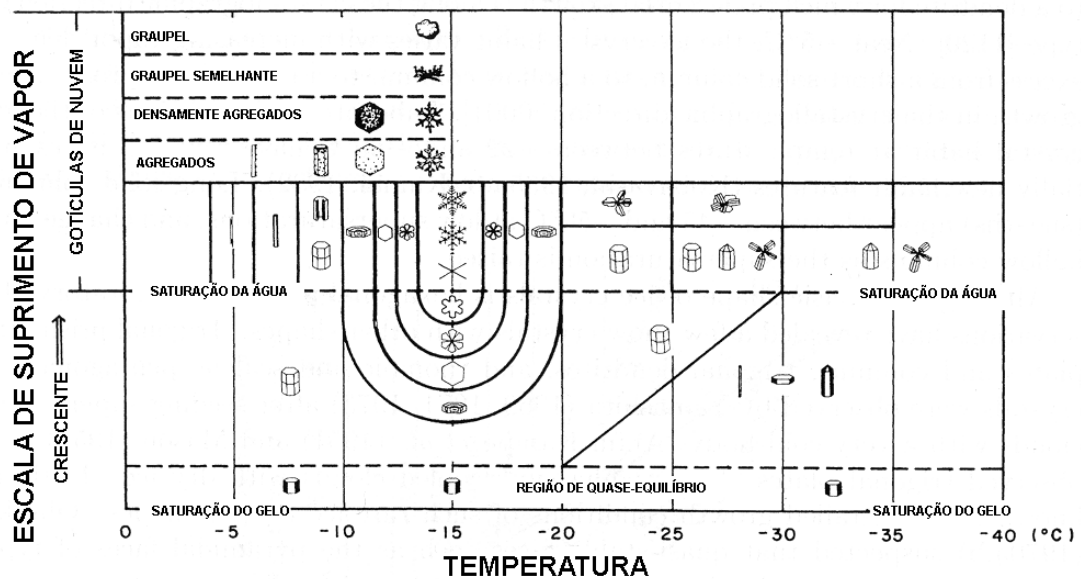


Figura 1.7: Condições ideais de temperatura e umidade para o crescimento natural de diversos tipos de cristais de gelo. (Adaptado de Magono e Lee, 1966)

Do mesmo modo que ocorrem colisões entre gotículas, quando a temperatura está abaixo de 0°C podem ocorrer colisões seguidas de coalescência entre cristais de gelo. Neste caso, o processo pode ser chamado de acreção ou agregação. As partículas de gelo conhecidas

como graupel são partículas que crescem pelo processo de acreção (riming), *i.e.*, quando gotas super-resfriadas são capturadas por uma partícula de gelo e congelam instantaneamente. Se o congelamento não for imediato, há formação de uma estrutura mais densa, conhecida como granizo. Já os flocos de neve são partículas formadas pelo processo de agregação, ou seja, pela união de cristais de gelo e são encontrados com maiores dimensões próximos a 0°C (Pruppacher e Klett, 1997). A equação de crescimento do gelo por acreção ou agregação surge de forma similar à Equação 1.21, porém adaptações são feitas para incluir a composição e forma do gelo.

1.2 Distribuição de Tamanho de Hidrometeoros

A forma da distribuição de tamanhos de gotas depende do estágio de desenvolvimento da nuvem, especialmente no caso de nuvens Cumulus. Assim, no estágio maduro o espectro de distribuição é mais largo que nos estágios inicial e de decaimento, pois, no estágio inicial os processos microfísicos de coalescência foram recentemente iniciados, e no estágio final as gotas maiores já precipitaram e não resta mais energia para realimentação do sistema. A Figura 1.8 mostra algumas diferenças entre os espectros de distribuição de tamanho de gotas, onde Cumulus de tempo bom apresentam espectros mais estreitos que Cumulus complexos (Cumulus Congestus, Cumulonimbus e sistemas convectivos) e Cumulus que se desenvolvem embebidos em uma camada de nuvem estratiforme apresentam espectros mais amplos. A Figura 1.8 (b) e (c), ilustra distribuições de nuvens onde as gotículas têm tamanhos maiores, e a presença destas gotículas deu início ao processo de colisão e coalescência dentro destas nuvens, provocando o surgimento de uma nova moda de crescimento, em torno de 60 μ m de diâmetro. Este efeito será discutido com maiores detalhes adiante.

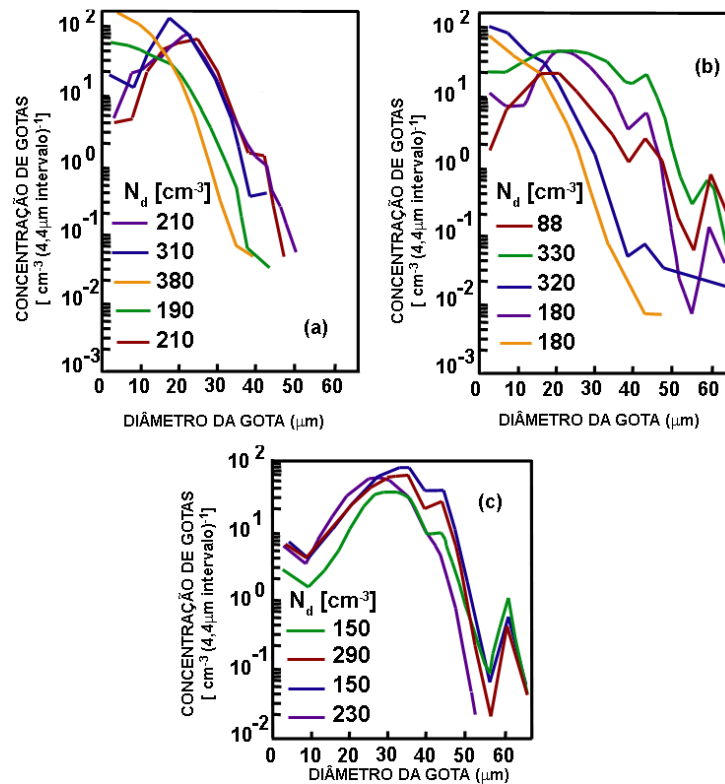


Figura 1.8: Espectros de tamanho de partículas de nuvem, observados próximo ao topo de nuvens continentais do tipo Cumulus: (a) em seis pequenos Cumulus em desenvolvimento, (b) em cinco Cumulus complexos e (c) em quatro Cumulus embebidos em nuvens estratiformes. (Adaptada de Hobbs et al 1980)

O crescimento de gotas é uma função não linear do conteúdo de água condensada. O conteúdo de água líquida aumenta com a altura e atinge um máximo na porção média/superior da nuvem e então decresce em direção ao topo. A região da nuvem que apresenta o máximo conteúdo de água líquida fica onde a corrente ascendente é mais intensa. Isso ocorre porque a diferença entre a temperatura da parcela em ascensão e a temperatura do ambiente aumenta a taxa de supersaturação. Conforme essa diferença de temperatura diminui, a corrente ascendente perde intensidade, a taxa de supersaturação fica reduzida e o conteúdo de água líquida também diminui. Apesar da alta variabilidade do conteúdo de água líquida entre as nuvens, Borovikov *et al.* (1963) sugeriu alguns valores característicos:

Cumulus – estágio inicial	0,2 – 0,5 g/m ³
Cumulus – estágio avançado	0,5 – 1,0 g/m ³
Cumulus Congestus / Cumulonimbus	0,5 – 3,0 g/m ³
Cumulus com intensa corrente ascendente	5 g/m ³
Alto cumulus / Altostratus	0,2 – 0,5 g/m ³
Stratus / Stratocumulus	0,1 – 0,5 g/m ³
Nimbostratus	0,2 – 0,5 g/m ³

Tabela 1.1: Tipos de nuvem e seus valores característicos de conteúdo de água líquida, sugeridos por Borovikov et al. (1963).

A Figura 1.9 e Figura 1.10 descrevem a estrutura vertical interna de uma nuvem Cumulus típica. A Figura 1.9 exibe o perfil vertical do conteúdo de água líquida médio e máximo, que aumenta com a altitude, mas não atinge o valor adiabático (calculado pela ascensão adiabática de uma parcela de ar) devido ao entranhamento da parcela em ascensão com o ar seco do ambiente. A Figura 1.10 apresenta a variação da concentração e do diâmetro e a evolução do espectro de gotículas com a altitude. A concentração exibe um aumento a partir da base da nuvem e atinge seu valor máximo quando o diâmetro médio das gotículas é da ordem de 10 μ m, e então começa a diminuir. Este ponto, onde a concentração apresenta o valor máximo, corresponde a máxima eficiência do processo de crescimento por difusão de vapor e ao início do processo de CC, que é responsável pelo aumento contínuo do diâmetro médio das gotículas com a altitude e o conseqüente alargamento da distribuição de gotículas.

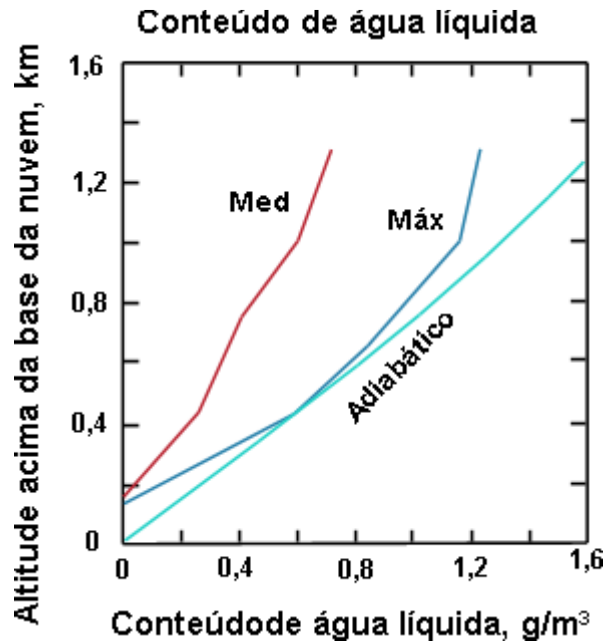


Figura 1.9: Conteúdo de água líquida, máximo, médio e adiabático versus a altitude acima da base da nuvem. (Adaptado de Schemenauer et. al. 1980).

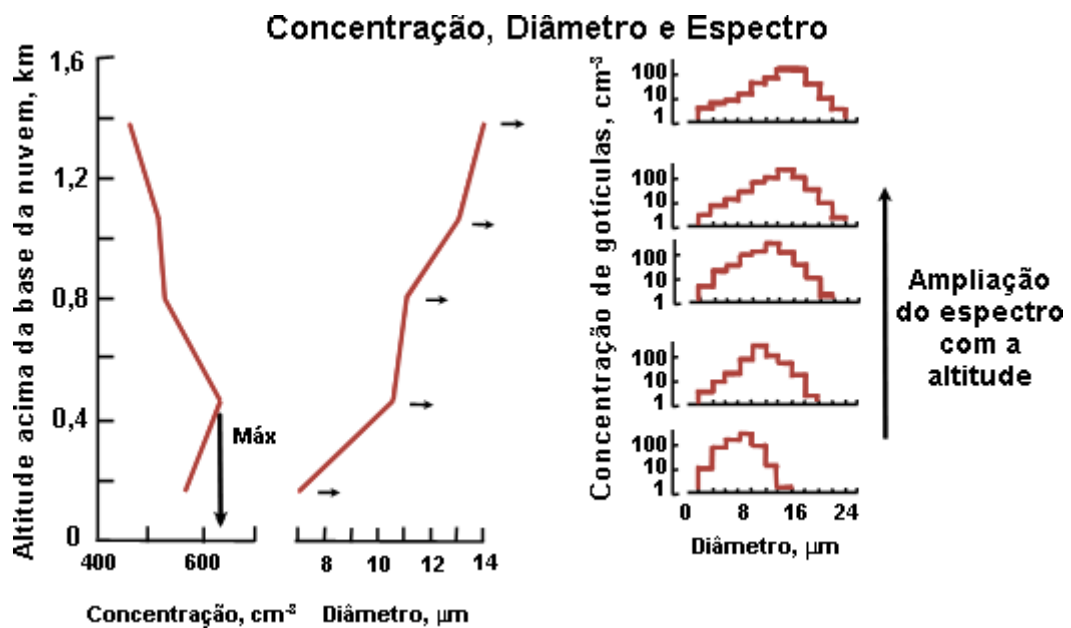


Figura 1.10: Concentração, diâmetro e espectro de gotículas versus a altitude acima da base da nuvem. (Adaptado de Schemenauer et. al. 1980).

Os espectros de tamanho de gotas muitas vezes apresentam duas modas de distribuição, que se tornam mais acentuadas com o aumento da altitude (Figura 1.11). Na Figura 1.11a, é possível notar uma distribuição bimodal, associada ao crescimento por

condensação e CC. As gotículas recém nucleadas são vistas em alta concentração e com diâmetro pequeno, em torno de $10\mu\text{m}$. A segunda moda da distribuição ocorre com gotículas entre 30 e $40\mu\text{m}$ que crescem por CC. A Figura 1.11b além de mostrar ambos os processos, evidencia que o processo de crescimento por condensação é mais acentuado nos níveis mais baixos e, a medida que aumenta a altitude, as gotículas crescem, e o processo de CC fica cada vez mais dominante. Warner (1969) afirmou que a segunda moda não pode ter origem no processo de condensação e que as distribuições bimodais são mais comuns em ambiente instáveis, ou seja, os processos turbulentos e o entranhamento de ar seco, principalmente no topo da nuvem, contribuem fortemente para o desenvolvimento do processo de CC.

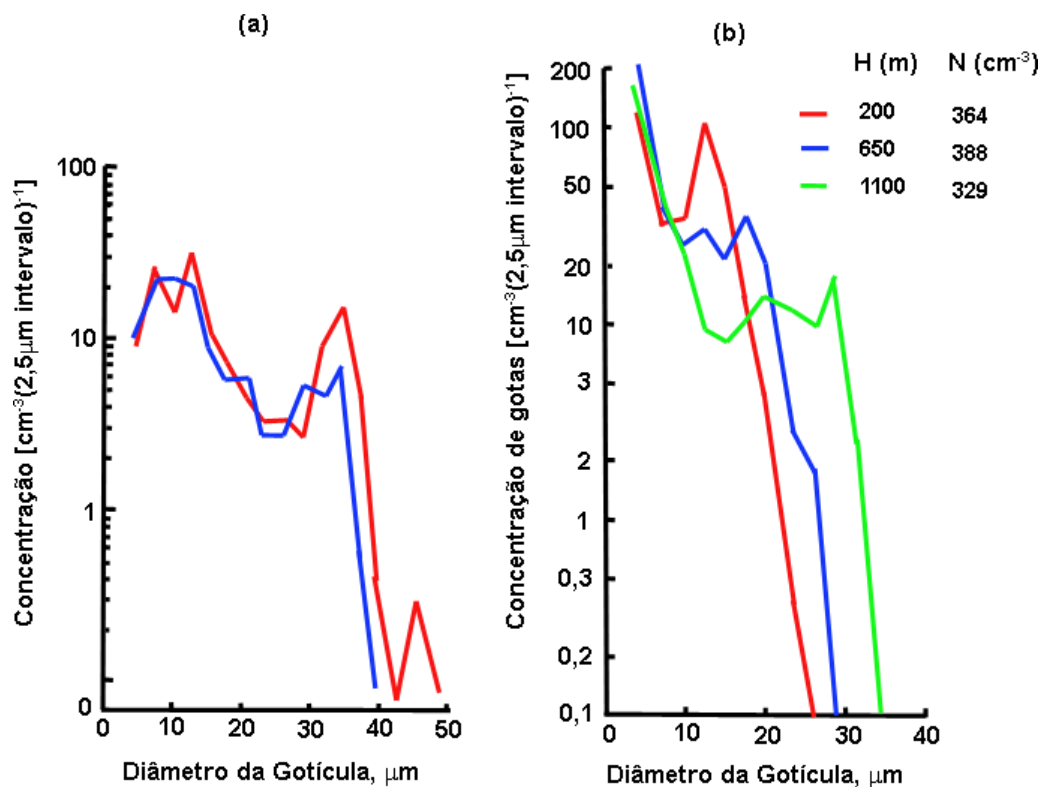


Figura 1.11: Espectro de gotas de nuvem em um Cumulus isolado próximo à costa leste Australiana. (a) Amostras adjacentes tomadas com 100m de distancia entre si, próximo ao topo de uma nuvem com 1400m de profundidade; (b) Variações com a altura do espectro de gotículas. (Adaptado de Warner 1969).

Os núcleos de condensação de nuvem (CCN) influenciam fortemente no tipo de distribuição observada. Sobre o oceano observa-se concentrações da ordem de $100\text{-}300\text{cm}^{-3}$, com tamanhos de alguns micrometros, enquanto sobre o continente, temos uma alta variabilidade, $600\text{-}3.000\text{cm}^{-3}$, com tamanhos pequenos, menores que $1\mu\text{m}$. Alguns autores (Rosenfeld, 1999; Williams et al. 2002; Andreae, 2004) afirmam que uma maior quantidade de CCN implica em maior competição pelo vapor, suprimindo a formação de precipitação na fase quente da nuvem e intensificando as tempestades. Entretanto, é necessário também considerar que o tamanho dos CCN observados sobre o oceano (ambiente limpo) é maior, fazendo com que o crescimento de gotículas por CC aconteça mais rapidamente. Os CCN observados sobre o continente (ambiente poluído) apresentam maior concentração e tamanhos menores. A Figura 1.12 mostra o contraste da concentração de CCN sobre continente e oceano. Considerando a relação direta entre a supersaturação e o tamanho do CCN (Equação de Köhler, 1.4), sobre o continente observa-se concentrações mais altas, porém com tamanhos menores. Esses fatores associados provocam o atraso no desenvolvimento das gotas de chuva, facilitando o transporte de água para temperaturas mais frias e contribuindo com a formação de nuvens mais profundas com maior quantidade de descargas elétricas (Albrecht, 2008).

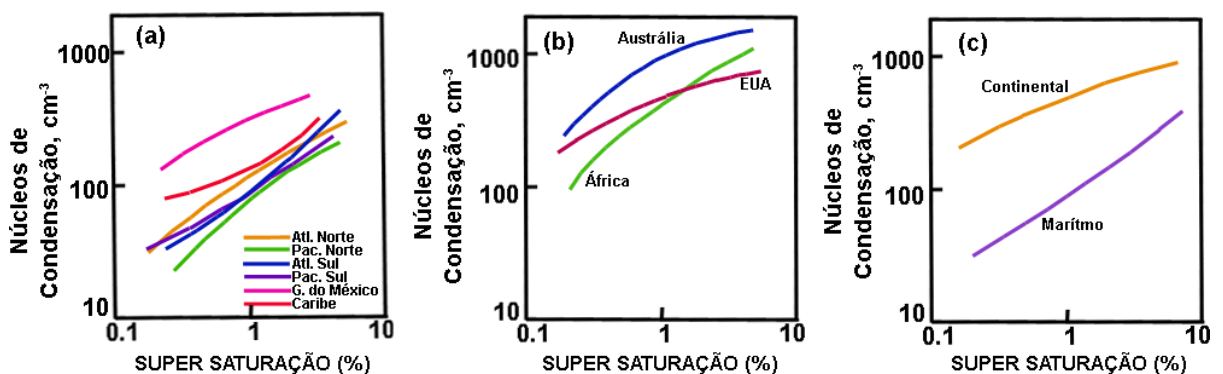


Figura 1.12: Concentração média de CCN em função da supersaturação necessária para ativação; (a) sobre o oceano, (b) sobre o continente e (c) média de todas as observações. (Adaptado de Twomey e Wojciechowski, 1969)

A Figura 1.13 mostra as diferenças nas distribuições de tamanho de gotículas sobre continente e oceano. Sobre o oceano, a amplitude do espectro é maior, em termos de gotículas de 5 a 45 μm , com concentração inferior a 40 cm^{-3} . Observa-se ainda que o processo de crescimento por CC já apresenta alguma eficiência, em 30 μm . Sobre o continente o espectro é mais estreito, as gotículas estão entre 4 e 20 μm , a concentração máxima observada está em torno de 220 cm^{-3} , quando as gotículas apresentam um diâmetro médio de apenas 14 μm .

Essas diferenças podem ser atribuídas ao tamanho dos CCN, sua respectiva concentração e a velocidade vertical presente.

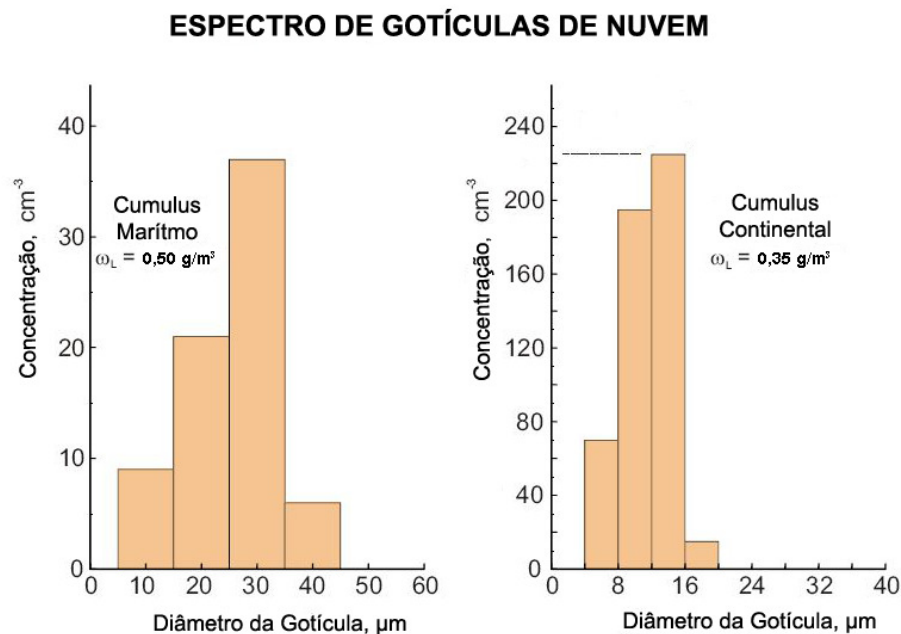


Figura 1.13: Distribuição de tamanho de gotículas em nuvens do tipo Cumulus, sobre o continente e sobre o oceano, tal que, ω_L representa o conteúdo de água líquida em cada caso. (Adaptado de Squires, 1958)

O atraso no início do processo de CC, de uma nuvem que se desenvolve em ambiente poluído, provocado pela maior quantidade de gotículas pequenas, pode inibir a formação da precipitação da fase quente e como consequência, aumentar o tempo de vida da nuvem (Albrecht 1989; Rosenfeld 2000; Ramanathan *et al.* 2001), tornando possível um maior

desenvolvimento vertical da nuvem e formação de tempestades severas. Entretanto, a grande concentração de CCN emitidos por queimadas pode absorver radiação solar e aquecer a atmosfera, reduzindo a incidência de radiação em superfície e por consequência a evaporação, podendo inibir a formação de nuvens e causando um déficit no ciclo hidrológico (Ramanathan *et al.* 2001; Kaufman *et al.* 2005).

As distribuições de hidrometeoros geralmente indicam um rápido decréscimo da concentração com o aumento do tamanho, especialmente para diâmetros maiores que 1mm, já que processos de colisão CC fazem com que a concentração de gotículas diminua enquanto aumentam de tamanho. Também expressam uma tendência de aumento do número de gotas grandes com o aumento da taxa de precipitação, pois as gotas precipitantes promovem a coleta de gotículas ao longo da sua trajetória.

1.3 Análise de espectros

Conforme os núcleos de condensação ascendem verticalmente através da corrente ascendente, o ambiente supersaturado faz com que o vapor se condense formando gotículas. O número de gotículas cresce à medida que a distância da base da nuvem aumenta, pois o aumento constante da supersaturação, intensificado pela corrente ascendente, promove uma formação contínua de gotículas até que o excesso de vapor seja totalmente consumido ou não haja mais núcleos de condensação. A partir deste momento, o número de gotículas ativadas permanece constante, mesmo que o movimento ascendente continue, e o crescimento das gotículas existentes continua acontecendo por difusão de vapor causando o aumento do conteúdo de água líquida da nuvem e uma consequente diminuição da supersaturação. Se o ambiente não contiver excesso de vapor, o conteúdo de água líquida, então, se mantém constante e, conforme o tamanho adquirido pelas gotículas ($R \sim 20\mu\text{m}$, segundo Rogers e Yau,

1989), o processo de CC pode ter início. Uma vez que pode ocorrer CC entre as gotículas, o perfil vertical deve apresentar uma diminuição da concentração, mas o conteúdo de água condensada não pode diminuir se não houver evaporação.

A diminuição do número de gotículas promovida pelo processo de CC deve estar associada a um conteúdo de água líquida constante, ou crescente se ainda houver excesso de vapor. Isto significa que quando as gotículas começam a coalescer espera-se que haja um aumento do conteúdo de água nos espectros de tamanho maiores. Com o crescimento das gotículas, o conteúdo de água líquida proveniente de gotas médias e grandes aumenta. Entretanto, também é possível que ocorra um consumo das gotículas, consequência de outros processos, como entranhamento. O entranhamento ocorre principalmente nas fronteiras da nuvem através da mistura com o ar mais frio e mais seco do ambiente. Esta mistura faz com que haja evaporação de gotículas de nuvem, provocando mais resfriamento pela perda de calor latente. As diferentes parcelas que sofrem a mistura se tornam mais frias e mais secas e, conseqüentemente mais densas que as parcelas ao redor, dando início a uma corrente descendente que provoca mais entranhamento ao longo de seu trajeto.

1.4 Padrões Observados na Amazônia: Estação Chuvosa

A precipitação na Amazônia, além de diferir das outras regiões como a África tropical, apresenta uma estrutura vertical típica, intermediária às observadas sobre continente e oceano tropical. Sua estrutura convectiva é controlada por variações dinâmicas e termodinâmicas da troposfera associadas às transições inter-sazonais, *i.e.*, Estação Seca, de Maio a Setembro, e Chuvosa, de Dezembro a Março (Rickenbach *et al.* 2001). Além disso, existe também uma variabilidade na concentração e composição dos CCN, regida não somente pelas condições naturais, como também antropogênica (Andreae *et al.* 2004).

Durante a estação chuvosa, a concentração de aerossóis é baixa (890cm^{-3} , Artaxo *et al.*, 2002), pois o regime de chuvas promove uma lavagem constante da atmosfera, mantendo sempre baixa a concentração de CCN. A disponibilidade de vapor associada com poucos núcleos de condensação permite que a precipitação se forme antes da nuvem atingir o nível de congelamento (Stith *et al.* 2002), mesmo sob ação de fracas correntes ascendentes.

As diferenças nos padrões sazonais de precipitação são resultados do tipo de formação das nuvens. Durante a Estação Chuvosa há influência de sistemas frontais estacionários oriundos de latitudes médias e assim, os processos de chuva estratiforme são favorecidos; pois há formação de uma estrutura de convecção local organizada regida pelo vento zonal, produzindo sistemas com características mais semelhantes aos oceânicos. Durante as Estações seca e de Transição, quando há dominância da termodinâmica local, células altamente convectivas são produzidas, originando sistemas com maior desenvolvimento vertical (Albrecht, 2008 e Morales *et al.*, 2004).

Além da variabilidade inter-sazonal, a Amazônia apresenta também uma variabilidade intra-sazonal durante a Estação Chuvosa, que é refletida na estrutura da convecção, causada pela mudança nos padrões de vento de baixos níveis. A alteração do comportamento dos ventos resulta em diferentes características, tal como da frequência de descargas elétricas e taxa de precipitação.

Muitos estudos já retrataram os padrões dos sistemas de nuvens observados na Amazônia durante a estação chuvosa (Rickenbach *et al.* 2001, Williams *et al.* 2002, Petersen e Rutledge 2001, Petersen *et al.* 2002, Carey *et al.* 2001). De modo geral, observou-se que durante o regime de ventos de Oeste (Leste), as nuvens observadas apresentam fracas (fortes) correntes ascendentes, baixa (maior) concentração de CCN, escassez (grande quantidade) de descargas elétricas, segundo Williams *et al.* (2002); e menor (maior) desenvolvimento vertical, menor (maior) extensão vertical de núcleos de precipitação acima de 30dBZ,

temperatura de brilho mais quentes (frias)e menores (maiores) taxas de precipitação segundo Petersen *et al.* (2002). Williams *et al.* (2002) sugerem que o regime de Oeste apresenta características semelhantes às nuvens marítimas, denominando este regime de Oceano Verde.

Entretanto, a variabilidade observada durante a Estação Chuvosa não é homogênea. Petersen *et al.* (2002) observaram que este comportamento é mais evidente na região sul da Amazônia, sendo que, a estrutura convectiva vertical é mais pronunciada durante o regime de Leste.

1.5 Padrões Observados na Amazônia: Estação Seca e de Transição

Na Amazônia durante a Estação Seca, ou pré monção (Williams *et al.* 2001), as nuvens se formam em ambiente poluído por intensa queima de biomassa, e esta região contribui com quase 30% de toda queima observada no planeta (Guyon *et al.* 2005). Os focos de incêndio emitem partículas na atmosfera e, no caso da Amazônia, chegam a aumentar em 100 vezes a concentração natural de aerossóis. Nessa estação o número médio de aerossóis observados foi de 8000cm^{-3} (Artaxo *et al.* 2002) com valores máximos atingindo 40.000cm^{-3} , enquanto que na estação chuvosa, o valor médio observado foi de 890cm^{-3} .

Altas concentrações de CCN permitem que a condensação produza um número maior de gotículas, entretanto, como a disponibilidade de vapor é limitada, essas gotículas podem não atingir a eficiência de coleta e o processo de coalescência é muitas vezes suprimido.

Em termos de distribuições de gotas, Martins (2006) observou que em ambiente poluído as distribuições são mais estreitas que as de ambiente limpo porque apesar da intensa produção de gotículas, o processo de coalescência não é eficiente. No âmbito da precipitação, modelos indicaram que a média da precipitação é maior quando a atmosfera está limpa, entretanto os picos são mais intensos quando a concentração de CCN é alta.

Desta maneira, durante a estação seca haveria maior dificuldade de produzir gotas precipitáveis, porém observa-se que ocorrem tempestades neste período. Segundo Williams *et al.* (2002), esta estação apresenta condições mais extremas que as observadas no regime de Leste da estação chuvosa. Portanto, existem outros mecanismos atmosféricos, além da eficiência de coleta, que dão início às tempestades e atuam durante a estação seca.

Albercht (2008) observou que o desmatamento na região afeta diretamente a estrutura termodinâmica da atmosfera aumentando a altura da base das nuvens e promovendo tempestades muito mais severas. Sobre as regiões de pastagem as correntes ascendentes foram mais intensas e foi observado um entranhamento mais enfraquecido por conta da menor espessura da camada quente. Segundo Andreae *et al.* (2004), a redução do tamanho das gotas em ambiente poluído eleva a altitude onde tem início a precipitação, e na presença de intensas correntes ascendentes, as nuvens têm maior desenvolvimento vertical, iniciando sua fase fria, podendo resultar em tempestades mais severas.

Rissler *et al.* (2006) constatou que na estação seca, devido à poluição, a distribuição numérica de tamanho dos aerossóis migra para intervalos de tamanhos maiores (Figura 1.14), e apesar da fração recém produzida ser predominantemente “quase hidrofóbica”, processos atmosféricos gradualmente convertem as partículas em “moderadamente higroscópicas”. Assim, a presença de alguns CCN gigantes produziria algumas gotas coletoras instantaneamente, antecipando o início da coalescência.

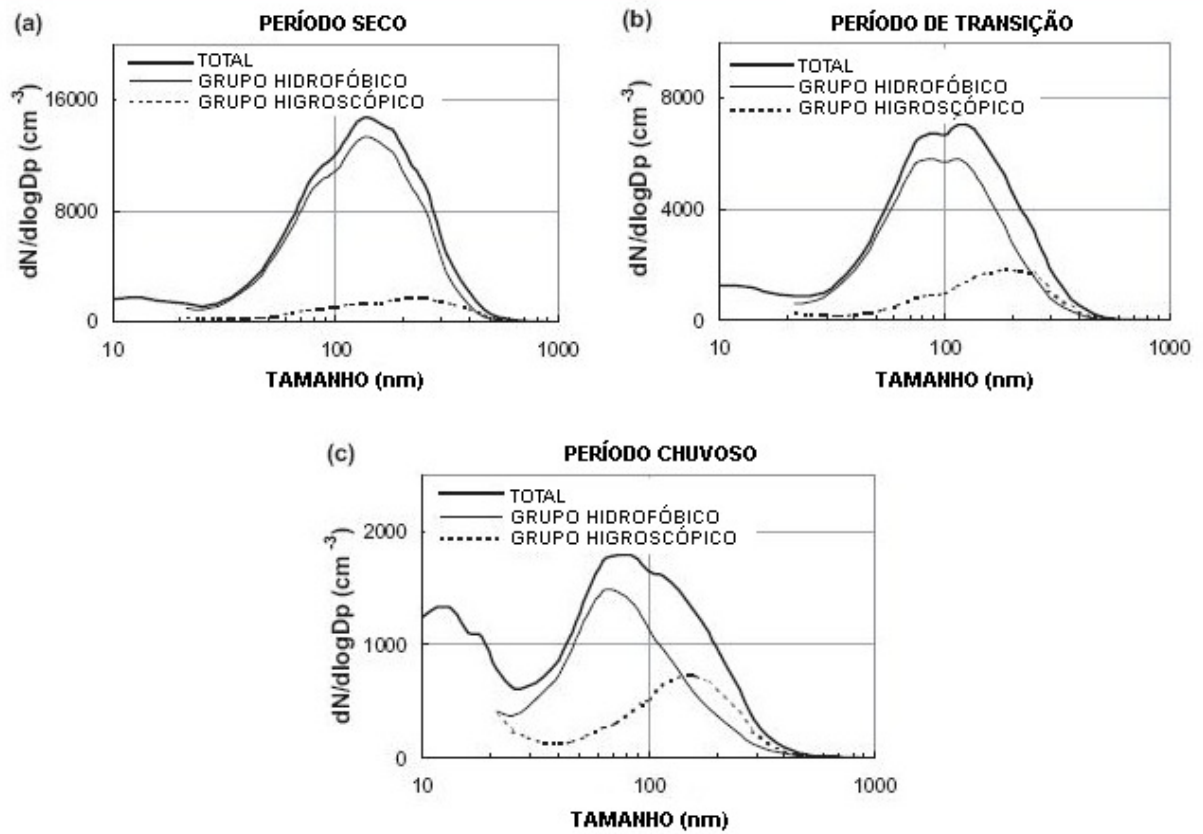


Figura 1.14: Distribuição numérica de tamanho média (linha grossa) para os três períodos meteorológicos, separadas em quase hidrofóbicas (linha fina) e moderadamente higroscópica (linha tracejada). (Adaptado de Rissler et. al., 2006).

2 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

2.1 O Cenário Atual

A região tropical concentra grande parte da precipitação global, porém as medidas são restritas a alguns sítios ou mesmo a campanhas experimentais. A precipitação nestas regiões está associada a sistemas convectivos que apresentam alta variabilidade espaço-temporal (Petersen *et al.* 2002, Rickenbach *et al.* 2001, Carey *et al.* 2001). Apesar deste conhecimento, os modelos numéricos de previsão do tempo e de estimativa de precipitação não possuem uma boa descrição da distribuição de tamanho de hidrometeoros nestas nuvens (Laurent *et al.* 2002), o que provoca grandes erros na definição do ciclo hidrológico. Além do mais, muitas caracterizações de sistemas de nuvens são baseadas em medidas de satélites (Kingsmill *et al.* 2004), cujas resoluções espaciais e temporais ainda não são suficientes para descrever os processos internos às nuvens (Vali 1997). O mesmo pode-se dizer dos efeitos dos aerossóis nas nuvens e precipitação (Conant *et al.* 2002, Rosenfeld e Lensky 1998, Hudson *et al.* 1991), que até recentemente somente haviam sido avaliados através de modelos e observações por satélite (Andreae *et al.* 2004). Desta forma, medidas *in situ* através de aeronaves são indispensáveis para estudos da composição e dos processos dentro de nuvens.

Os avanços obtidos nos últimos 50 anos evidenciam a importância do método, além disso, certos tipos de medidas somente podem ser realizados com sensores a bordo de aeronaves, e para alguns destes sensores não há substitutos. Mesmo sendo evidente a necessidade deste tipo de medidas para obtenção de maiores avanços na área, ainda há muito que ser melhorado em termos de volume de medidas e calibração dos instrumentos (Vali 1997).

2.2 A Importância e Necessidade do Estudo

Durante os anos de 1999 e 2002 foram realizadas duas campanhas experimentais na região Amazônica, que contaram com medidas de aviões instrumentados para a caracterização das nuvens e com radares meteorológicos para permitir observações tridimensionais da precipitação. Dessa maneira a proposta deste estudo é, a partir destes dois experimentos, aprimorar a descrição dos hidrometeoros nesta região, que poderá auxiliar o desenvolvimento de melhores parametrizações de nuvens utilizadas em modelos numéricos de previsão do tempo e clima. Para isto, tenta-se esclarecer os seguintes aspectos: os principais mecanismos de formação de gotículas e cristais de gelo dentro das nuvens na região Amazônica; verificar se existem diferenças entre as gotículas formadas durante a estação seca e a estação chuvosa; qual é o papel dos aerossóis, na formação ou inibição da precipitação; e finalmente caracterizar a distribuição de tamanho médio dos hidrometeoros dessas nuvens.

3 TRATAMENTO DOS DADOS

A campanha TRMM/LBA (Silva Dias *et al.*, 2002) realizada durante a estação chuvosa, de Janeiro à Fevereiro de 1999, teve como objetivo a avaliação dos produtos de estimativa de precipitação oriundos do radar meteorológico e dos algoritmos de estimativa de precipitação do satélite TRMM (Kummerow *et. al* 1998). Este experimento contou com as medidas de um avião instrumentado da Universidade de Dakota do Norte conhecido como UND Citation II. Esta plataforma possuía sensores capazes de medir a distribuição do tamanho dos hidrometeoros desde 5 a 25.000 μm , temperatura do ar e do ponto de orvalho, umidade relativa, conteúdo de água líquida e de gelo, velocidade vertical e pressão atmosférica. Como o Citation é um avião pressurizado, foi possível realizar medidas desde o

topo das nuvens (~ -50°C) até a base (~ 20°C). Os sensores a bordo do avião, utilizados para este estudo foram: sensor de Temperatura Total Rosemount, Higrômetro EG&G, sensores de Pressão Estática e Dinâmica Rosemount, sensor de Fio Quente Csiro King e Detector de Gelo Rosemount, e os contadores de hidrometeoros: Forward Scattering Spectrometer Probe -100 (FSSP), entre 5 e 40µm com intervalos de 5µm, Cloud Particle Imager (CPI), entre 40 e 150µm com intervalos de 10µm, Two-Dimensional Cloud Probe (2DC), entre 150 e 1000µm com intervalos de 50µm, High Volume Particle Sampler (HVPS) e Two-Dimensional Precipitation Probe (2DP), ambos entre 1000 e 25000µm com intervalos de 400µm.

A campanha Dry To Wet/ RACCI-2002 (Silva Dias *et al.*, 2005) foi realizada entre Setembro e Novembro de 2002, e tinha como objetivo principal o entendimento da convecção durante a transição entre as estações seca e chuvosa, além do impacto dos aerossóis de queimadas na formação das nuvens e precipitação. Nesta campanha as nuvens foram amostradas pelos aviões instrumentados da Universidade Estadual do Ceará - UECE, e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. A aeronave ALPA (Avião Laboratório para Pesquisas Atmosféricas) da UECE obteve as medidas de microfísica, utilizadas neste estudo, enquanto que a aeronave do INPE obteve medidas dos aerossóis e química da atmosfera. Diferentemente da campanha de 1999, estes aviões não eram pressurizados o que restringia às medidas até 15 mil pés (4.5 km) ou próximo da temperatura de 0°C. As medidas utilizadas foram obtidas pelos sensores: Temperatura Total Rosemount, Higrômetro EG&G, sensores de Pressão Estática e Dinâmica Rosemount, sensor de Fio Quente Csiro King, contador de CCN, Forward Scattering Spectrometer Probe -100, entre 2,5 e 47µm com intervalos de 1,5µm, One dimension Optical Array Probe (OAP-1D 200x), entre 20 e 300µm com intervalos de 30µm e OAP-1D 200y, entre 300 e 4500µm com intervalos de 300µm.

Além dos dados obtidos em cada campanha, este estudo fundamentou-se nas imagens do canal 04 do infravermelho, 10,8µm, do satélite GOES-8, disponíveis em

intervalos de 30 minutos, processadas pelo CPTEC/INPE, em uma grade regular de 4 x 4 km. Também foram utilizadas as imagens do satélite LANDSAT e livro dos registros de vôo do avião.

3.1 Instrumentos Utilizados nas aeronaves

O conhecimento do funcionamento dos instrumentos utilizados nos aviões permite maior compreensão dos dados que serão analisados, além de possibilitar a identificação de possíveis erros e divergências das medidas obtidas. Assim, a seguir são apresentados 11 sub-itens, que apresentam uma breve descrição de cada um dos sensores utilizados, conforme o manual do NCAR RAF Bulletin.

- **O termômetro de Temperatura Total:**

Baseia-se na resistência de um condutor, no caso a platina, que varia linearmente com a temperatura. Segundo Lawson e Cooper (1990), apesar de o sensor de temperatura Rosemount apresentar certa inércia na presença de gotas, o instrumento é molhável em nuvens do tipo cumulus e pode fornecer medidas erradas quando em baixas temperaturas. Além disso, neste tipo de sensor, obtêm-se erros resultantes da condução de calor local, do auto-aquecimento causado pela corrente usada para medir a resistência, do aquecimento do ar e finalmente da transferência radiativa de calor. Mesmo assim, para uso em aeronaves, esses erros podem ser desprezíveis afetando somente o tempo de resposta do instrumento.

As equações utilizadas para calcular a temperatura do ar medida pelo sensor de temperatura total de Rosemount são:

$$T_f[{}^{\circ}C] = T_s[{}^{\circ}C] * 21,619 - 56,7178 \quad 3.1$$

$$T_a [^{\circ}C] = \frac{(T_f [K])}{1 + \left[\frac{MACH^2 * R_f * \left(\frac{c_p}{c_v} - 1 \right)}{2} \right]} - 273,15 \quad 3.2$$

$$MACH = \sqrt{2 * \frac{c_v}{R_d} * \left[\left(\frac{QS [mb]}{PS [mb]} + 1 \right)^{\frac{R_d}{c_p}} - 1 \right]} \quad 3.3$$

Onde,

T_f é a temperatura na fuselagem, T_s é a temperatura dada pelo instrumento, T_a é a temperatura ambiente, R_f é o fator de correção dos sensores de temperatura, para a fuselagem $R_f=0,892$, c_p é calor específico a pressão constante, $c_p=1005,0 J/kgK$, c_v é o calor específico a volume constante, $c_v=718,0 J/kgK$ R_d é a constante dos gases para o ar seco, $R_d=287,05 J/kgK$, QS é a pressão dinâmica e PS é a pressão estática.

- **O Higrômetro EG&G:**

Mede a temperatura do ponto de orvalho através da técnica de espelhos resfriados, onde a temperatura de um espelho é reduzida até que a saturação do vapor seja atingida e haja depósito de água sobre o mesmo. Quando a água se deposita sobre o espelho, as propriedades de reflexão mudam e a temperatura do espelho, que corresponde à temperatura do ponto de orvalho, é detectada por um termômetro de resistência de platina. Este tipo de higrômetro fornece boas medidas quando em ar limpo apesar da lenta resposta. O instrumento não é confiável quando dentro de nuvens e apresenta incertezas para temperaturas de ponto de orvalho abaixo de $0^{\circ}C$, pois o vapor condensado no espelho pode ser água ou gelo (Vali 1997).

A equação utilizada para calcular a temperatura do ponto de orvalho medida pelo higrômetro EG&G é:

$$\begin{aligned} &\text{Se } TDP > 0,0: \\ TDPC [^{\circ}C] &= 20,0676 * TDP - 49,406 \end{aligned} \quad 3.4$$

$$\text{Se } TDP < 0,0: \quad 3.5$$

$$TDPC [^{\circ}C] = 20,067 * [0,009109 + TDP * (1,134055 + TDP * 0,001038)] - 49,406$$

Onde,

$TDPC$ é a temperatura do ponto de orvalho corrigida e TDP é a temperatura dada pelo instrumento.

- **O sensor de Pressão Estática e Dinâmica:**

Mede as pressões estática e de pitot, utilizadas para determinar a velocidade real do ar. A Pressão Dinâmica é produzida pelo ar em movimento e a Pressão Estática é produzida pela concentração das moléculas de ar, a pressão atmosférica. Desta forma, a pressão dinâmica é a diferença entre a pressão total do tubo de pitot e a pressão estática.

As equações utilizadas para calcular as pressões estática e dinâmica medidas pelo sensor são:

$$PSC [mb] = PS * 108,54 - 1,34 \quad 3.6$$

$$QCC [mb] = QC * 17,2166 - 0,141146 \quad 3.7$$

Onde,

PSC é a Pressão estática corrigida, PS é a pressão estática dada pelo instrumento, QCC é a pressão dinâmica corrigida e QC é a pressão dinâmica dada pelo instrumento.

- **O sensor de fio quente Csiro King:**

Relaciona a potência fornecida a um fio aquecido, causado pelo resfriamento da vaporização de gotas que atingem o instrumento. Vali (1997) descreve que o sensor Csiro King é mantido a uma temperatura constante ($\sim 160^{\circ}C$), e permanece protegido de perdas de calor para a estrutura de apoio. O conteúdo de água é derivado da potência necessária para manter o sensor à temperatura constante, sendo que o resfriamento devido à temperatura do ar é corrigido por equações de transferência de calor. Segundo King et.al. (1985) o erro na medição não ultrapassa 15%.

As equações utilizadas para calcular o conteúdo de água líquida medido pelo Csiro King são:

$$P = P_{DRY} + P_{WET}$$

$$P = N_u * \pi * k * (T_s[^\circ\text{C}] - T_a[^\circ\text{C}]) + l [m] * d[m] * [L + c_{lw} * (T_b[^\circ\text{C}] - T_a[^\circ\text{C}])] * U_a [m/s] * LWC[g/m^3] \quad 3.8$$

$$U_a[m/s] = \sqrt{\left(\frac{c_p}{c_v} * R_d * T_a[K]\right) * MACH} \quad 3.9$$

Onde,

P é a potência dissipada pelo sensor, P_{DRY} é a potência dissipada pelo efeito de resfriamento do ar seco, P_{WET} é a potência necessária para aquecer e vaporizar a água líquida, Nu é o número de Nusselt, que relaciona a perda de calor por condução à perda total de calor pelo ar seco, l é o comprimento do sensor, k é a condutividade térmica do ar seco, T_b é a temperatura de ebulição da água, d é o diâmetro do sensor, L é o calor latente de evaporação da água, $L=2,5*10^6\text{J/kg}$, c_{lw} é o calor específico da água líquida, $c_{lw}=4218\text{J/kgK}$, U_a é a velocidade real do ar, LWC é o conteúdo de água líquida e $MACH$, dado pela Equação 3.3.

- **O sensor FSSP:**

Relaciona a quantidade de luz pró espalhada por uma partícula esférica com o seu tamanho. O tamanho da partícula é calculado pela teoria de espalhamento de Mie, através do comprimento de onda incidente, do índice de reflexão da partícula e dos ângulos de espalhamento da luz coletada. Como os sensores não são capazes de distinguir entre água e gelo, muitas flutuações são obtidas devido às formas cristalinas, uma vez que o sensor é calibrado assumindo espalhamento esférico.

As equações utilizadas para calcular a concentração de gotas e o conteúdo de água líquida medidos pela FSSP são:

$$C [cm^{-3}] = \sum_{i=1}^{i=30} \frac{n_i}{DOF [mm] * SV[cm^3]} \quad 3.10$$

$$LWC [g/m^3] = \frac{\pi}{6} * \rho[g/m^3] * \sum C[cm^{-3}] * d_i^3 [cm] \quad 3.11$$

$$SV [cm^3] = U_a [m/s] * t[s] * BD[mm] * DOF[mm] \quad 3.12$$

$$DOF = 9482 * r^2 [mm] \quad 3.13$$

Onde,

C é a concentração de partículas por unidade de volume e n_i é o número de gotas detectadas no canal de tamanho i , ρ é a densidade da água e d_i é o diâmetro do canal de tamanho i , SV é o volume da amostra (sample volume), t é o tempo da amostragem e BD é o diâmetro efetivo do feixe de laser, $BD \sim 0,1mm$, DOF é a profundidade de campo (depth of field), DOF médio $\sim 2,9mm$, e r é o raio da partícula.

- **O sensor OAP-1D:**

Sensor que utiliza um laser para iluminar um arranjo linear de fotodiodos. Conforme a partícula passa pelo foco do feixe, uma sombra é criada nos diodos e a contagem de diodos sombreados representa o tamanho da partícula. Os sensores OAP 200X medem partículas com diâmetros de 40 μm a 280 μm com incrementos de 20 μm ; e os sensores OAP 200Y medem de 300 μm a 4 500 μm com incrementos de 300 μm .

As equações utilizadas para calcular a concentração de gotas medida pela OAP-1D são:

$$C [cm^{-3}] = \sum_{i=1}^{i=15} \frac{n_i}{SA} \quad 3.14$$

$$SA [cm^3] = \frac{d}{M} * (N - x - 1) * DOF [mm] * U_a \left[\frac{m}{s} \right] * t [s] \quad 3.15$$

Onde,

C é a concentração de partículas por unidade de volume, n_i é o número de gotas detectadas no canal de tamanho i , SA é a área da amostra (sample area), d é o diâmetro do diodo, $d=0,2mm$, M é um fator de magnitude, $M(200X)=10$ e $M(200Y)=0,667$, N é o número de diodos no arranjo, x é o número de diodos sombreados pela partícula, t é o tempo da amostragem, U_a é dado pela Equação 3.9 e DOF é dado pela Equação 3.13.

- **O sensor CPI:**

Fornece informação detalhada dos tamanhos e formas das partículas entre ~ 20 e $1000\mu m$ de diâmetro, com resolução de $2,3\mu m$. As partículas que atravessam uma intersecção de dois feixes de laser, com velocidades de até $200m/s$, acionam uma câmera de 75 frames por segundo, capaz de amostrar mais de 25 partículas por imagem. O sistema seleciona as

partículas de cada imagem e as dimensiona em tempo real, além de determinar a concentração ($V_{ar} * n^{\circ}$ partículas/área).

A equação utilizada para calcular a concentração de gotas medida pelo CPI é:

$$C [m^{-3}] = \sum_{i=1}^{i=11} \frac{n_i}{A [m^2] * U_a [m/s]} \quad 3.16$$

Onde,

C é a concentração de partículas por unidade de volume, n_i é o número de gotas detectadas no canal de tamanho i , A é a área da imagem e U_a é dado pela Equação 3.9.

- **Os sensores 2DC e 2DP:**

São arranjos ópticos de duas dimensões (OAP-2D) compostos por uma grade de fotodetectores que medem a sombra das partículas que atravessam o feixe de laser, gerando medidas bidimensionais do tamanho das partículas. As informações de tamanho e forma são obtidas posteriormente através de um algoritmo de reconhecimento. O sensor 2DC mede no intervalo de 25 μm a 800 μm e o 2DP no intervalo de 200 μm a 6400 μm .

A equação utilizada para calcular a concentração de gotas medida pelo 2DC e 2DP é:

$$C [l^{-1}] = SWD * \frac{1}{[(W + 4 * r [m]) * DOF [mm] * U_a [m/s] * t [s]]} \quad 3.17$$

Onde,

C é a concentração de partículas por unidade de volume, r é o raio da partícula, t é o tempo da amostragem, U_a é dado pela Equação 3.9, DOF é dado pela Equação 3.13, SWD é a sombra ou contagem das partículas, W é a largura do arranjo de díodos (800 μm para 2DC e 6400 μm para 2DP).

- **O HVPS:**

É um arranjo óptico de duas dimensões (OAP-2D) que mede tamanho, forma e concentração de partículas precipitáveis, com resolução de 200 μm e com tamanho de até 5cm.

A equação utilizada para calcular a concentração de gotas medida pelo HVPS é:

$$C [l^{-1}] = SWD * \frac{1}{[(W + 4 * r [m]) * DOF [mm] * U_a [m/s] * t [s]]} \quad 3.18$$

Onde,

C é a concentração de partículas por unidade de volume, t é o tempo da amostragem, U_a é dado pela Equação 3.9, DOF é dado pela Equação 3.13, W é a largura do arranjo de diodos, $W=5cm$.

- **O Detector de Gelo:**

É composto por uma unidade cilíndrica que vibra axialmente a uma frequência de 40Hz. O acúmulo de gelo no cilindro diminui a frequência de ressonância que então é comparada com o valor de referência, fornecendo a massa acumulada. Uma vez que certa quantidade de massa foi acumulada, o cilindro aquece até derreter o gelo em seu interior.

A equação utilizada para calcular o conteúdo de gelo medido pelo detector de gelo Rosemount é:

$$IWC [g/m^3] = G * \frac{dV}{dt} \frac{1}{E_c * d * l * U_a} \quad 3.19$$

Onde,

IWC é o conteúdo de água super resfriada, G é o coeficiente de sensibilidade que relaciona a taxa da mudança de massa à voltagem do sensor, dV/dt é a variação do volume no período, E_c é a eficiência de coleta, l é o comprimento do sensor, U_a é dado pela Equação 3.9, e d é a largura.

3.2 Correções e Calibrações dos Dados

Nesta seção são apresentados os procedimentos utilizados para calibrar os dados, uniformizar as medidas e classificá-las de forma a caracterizar as diferentes propriedades propostas no objetivo deste trabalho.

A primeira condição considerada para iniciar a caracterização dos hidrometeoros foi com relação às diferenças entre as bases de dados de cada campanha: WetAMC e Dry-to-Wet/RACCI. A fonte utilizada para a primeira campanha forneceu dados calibrados, compreendendo somente amostragens realizadas dentro de nuvens, sendo os valores médios em 6s. Neste caso, a única alteração realizada sobre a base de dados foi a conversão das unidades de medida dos valores das concentrações obtidos pela FSSP, que indicava unidades por litro por micrometro ($l \cdot \mu m^{-1}$) e foram convertidas para unidades por centímetro cúbico por micrometro ($cm^3 \cdot \mu m^{-1}$).

No caso da base de dados utilizada para a campanha Dry-to-Wet/RACCI, foi necessário um número maior de calibrações e ajustes, uma vez que estes dados não sofreram nenhum tipo de tratamento. Primeiramente foi realizada uma redução da frequência de amostragem, de 20Hz para 1Hz, a fim de minimizar os erros das medidas. Posteriormente, as medidas obtidas pela FSSP foram sincronizadas com o restante das medidas, já que foram coletadas por um outro sistema de aquisição de dados, e por isso apresentavam defasagem temporal entre si. Como o objetivo da campanha Dry-to-Wet/RACCI, além da compreensão dos mecanismos de convecção, era investigar o papel dos aerossóis, as medidas foram tomadas em ambiente com e sem nuvens. Por essa razão, foi necessário selecionar os trechos dos vôos em que a aeronave esteve dentro da nuvem, para que cada amostragem resultante pudesse ser classificada de maneira independente.

O critério adotado para separar os trechos de cada vôo foi baseado nas imagens do satélite GOES-IR, séries temporais de temperatura, ponto de orvalho, conteúdo de água líquida e concentração de hidrometeoros medida pela FSSP. Com a verificação simultânea das imagens de satélite e do comportamento dos parâmetros meteorológicos observados foi possível identificar os momentos de transição entre os ambientes com e sem nuvens. Já a análise da altitude, trajetória do avião e imagens de satélite possibilitou identificar múltiplas medições de uma única nuvem, e medições únicas de nuvens isoladas ao longo da rota da aeronave.

A Figura 3.1 e Figura 3.2 ilustram um exemplo da aplicação do critério de separação dos trechos. Cada figura é composta pelos painéis (a), (b) e (c), onde, (a) apresenta as séries temporais da temperatura do ar (laranja), do ponto de orvalho (azul claro), conteúdo de água líquida obtido pelo Csiro-King (azul) e pela FSSP (vermelho); (b) apresenta a evolução temporal da concentração de partículas e gotas em função do diâmetro e (c) apresenta a trajetória realizada pelo avião e os pontos com os valores numéricos das medidas.

Na Figura 3.1, as setas 1, 2, 3 e 4 apontam para o instante em que o avião entrou em uma nuvem. A seta 1 aponta para um ligeiro aumento seguido de uma diminuição da temperatura do ar; a seta 2 mostra o aumento da temperatura do ponto de orvalho, aproximando-a da temperatura do ar; a seta 3 mostra o súbito aparecimento do conteúdo de água líquida; e a seta 4 aponta para as partículas coletadas pela FSSP. Já as setas 5, 6, 7 e 8 indicam o instante onde o avião saiu da nuvem, e as séries temporais da temperatura do ar, do ponto de orvalho, conteúdo de água líquida e distribuição da FSSP retomam o padrão observado antes da penetração na nuvem. Por meio desta análise o trecho do vôo selecionado é indicado pela seta vermelha nos gráficos (b) e (c), e pelo ponto azul na imagem de satélite. O mesmo tipo de análise pode ser empregado na Figura 3.2, entretanto, nota-se no gráfico (c)

que neste caso o avião fez diversas amostragens de uma mesma nuvem, e por isso deu origem a um grupo de dados contínuo, abrangendo todo o trecho.

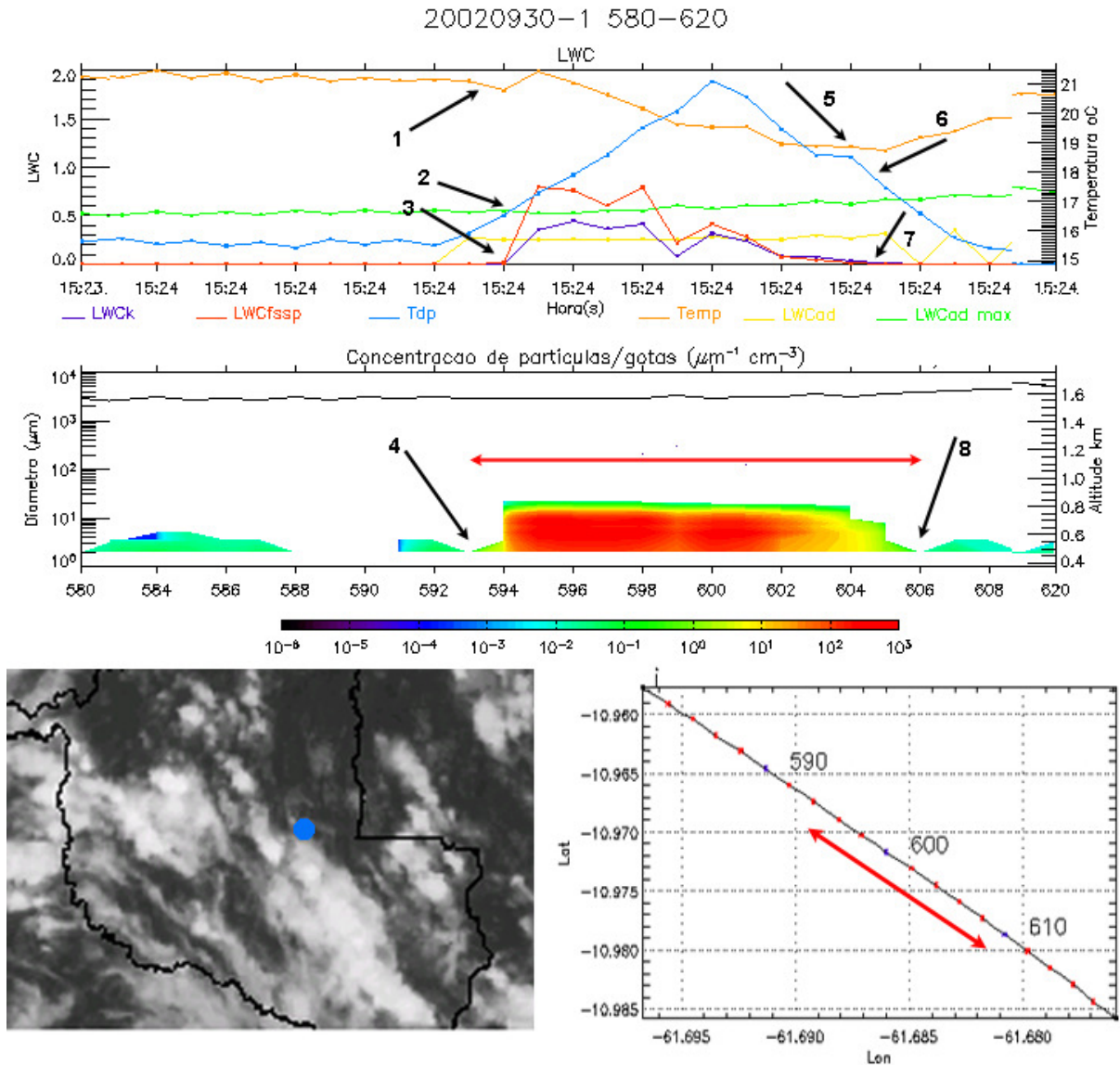


Figura 3.1: Medição única de uma nuvem isolada. (a) Série temporal da temperatura do ar (laranja), do ponto de orvalho (azul claro), conteúdo de água líquida obtido pelo Csiro-King (azul) e pela FSSP (vermelho); (b) Concentração de partículas e gotas e (c) Trajetória realizada pelo avião e imagem de satélite correspondente (GOES IRCH4).

Muita cautela teve de ser tomada no momento de identificar os trechos dentro de nuvem, pois as medidas da FSSP realizadas durante a estação seca acusaram presença de partículas com o avião fora de nuvem, tornando o procedimento de identificação mais complexo. Apesar dos valores de concentração medidos fora de nuvem terem sido

relativamente baixos, inferiores a 1 partícula/cm³ em diâmetros pequenos, menores que 10µm, estes números poderiam indicar um simples ruído ou mesmo medidas de aerossóis emitidos pelas queimadas, de forma que não poderiam ser considerados na caracterização.

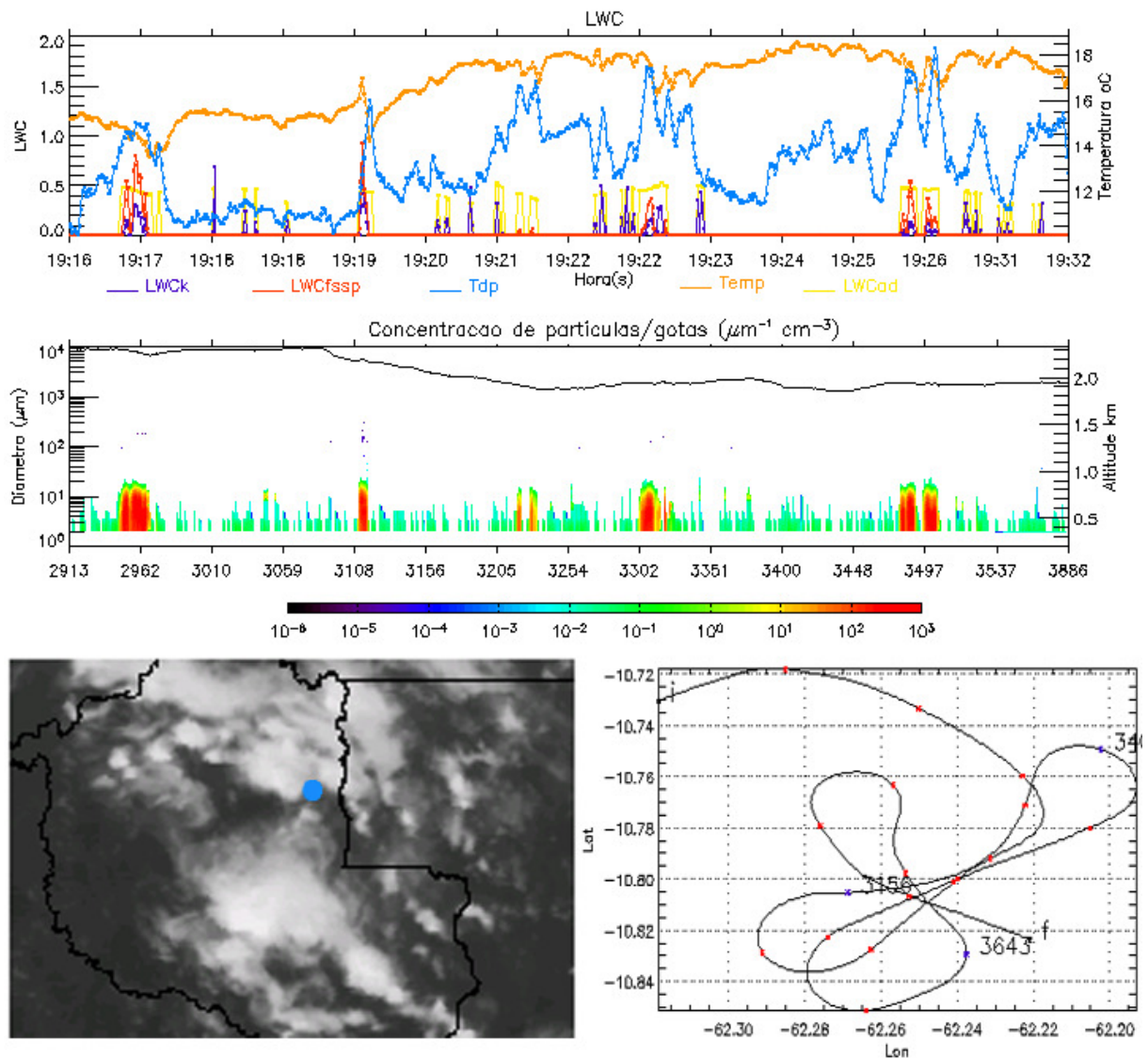


Figura 3.2: Múltiplas medições de um único sistema. (a) Série temporal da temperatura do ar (laranja), do ponto de orvalho (azul claro), conteúdo de água líquida obtido pelo Csiro-King (azul) e pela FSSP (vermelho); (b) Concentração de partículas e gotas e (c) Trajetória realizada pelo avião e imagem de satélite correspondente (GOES IRCH4).

A caracterização das nuvens foi fundamentada nas distribuições médias de tamanho de hidrometeoros por intervalos de temperatura (DTH), construídas de modo a representar sua estrutura vertical. Para viabilizar esta caracterização foi criada uma seqüência de etapas de

classificação com intuito de agrupar as amostragens realizadas em condições semelhantes, buscando verificar a existência de quaisquer possíveis particularidades em cada grupo definido.

3.3 Caracterização das Amostragens

A criação do método classificatório, adotado para agrupar as amostragens obtidas em condições semelhantes, teve como suporte imagens de satélite, as informações registradas durante os vôos e algumas definições apresentadas por outros pesquisadores, descritas na bibliografia utilizada. Os critérios aplicados estão na Tabela 3.1.

(a) Separação dos períodos: Chuvoso, Seco e Transição;
(b) Nuvens predominantes na região;
(c) Cobertura vegetal da região amostrada;
(d) Regime de vento dominante;
(e) Registros das condições atmosféricas elaborado pelos pesquisadores a bordo;
(f) Filtro de ruídos: Conteúdo de água líquida;
(g) Número de níveis verticais.

Tabela 3.1: Critérios aplicados para classificação das amostragens.

O critério (a) consistiu em separar as estações do ano em Estação Chuvosa, Seca e de Transição. As Estações Seca e de Transição de 2002 foram divididas obedecendo as características observadas por Vestin (2007) onde, quanto mais seca a atmosfera, mais favorecidas são as práticas de queimadas realizadas pela população local (Tabela 3.2).

Estação Seca: de 11 de Setembro a 08 de Outubro
Estação de Transição: de 09 a 30 de Outubro

Tabela 3.2: Período das Estações Seca e de Transição do ano de 2002.

Para identificação das nuvens observadas foram utilizadas as imagens do satélite GOES08, no canal infravermelho, 10,8 μ m, no horário mais próximo ao da amostragem. Através destas imagens foi possível definir o critério (b): condição de nebulosidade na região próxima ao vôo, Condição de formação convectiva ou estratificada. Pela falta de algumas seqüências de imagens, como nos dias 30/09, 04/10, 06/10, alguns grupos de amostragens ficaram sem a etapa de classificação.

O critério (c) compreendeu o mapeamento da cobertura vegetal, obtido pelo satélite LANDSAT e processado pelo Projeto PRODES/INPE de monitoramento sistemático do desflorestamento da Amazônia, e foi utilizado para diferenciar as medições realizadas sobre área desmatada e sobre floresta. As trajetórias dos dias de amostragem foram sobrepostas à cobertura vegetal, de modo que fosse possível definir o tipo de cobertura predominante sobre cada trecho. O resultado desta verificação pode ser visto nas Figura 3.3, Figura 3.4 e Figura 3.5, onde cada pixel do mapa corresponde a 1,8km, e são apresentados os principais tipos de cobertura vegetal: floresta, desmatamento, hidrografia e outras coberturas, como cidades ou cerrado; e as regiões sobrevoadas em cada dia de tomada de dados.

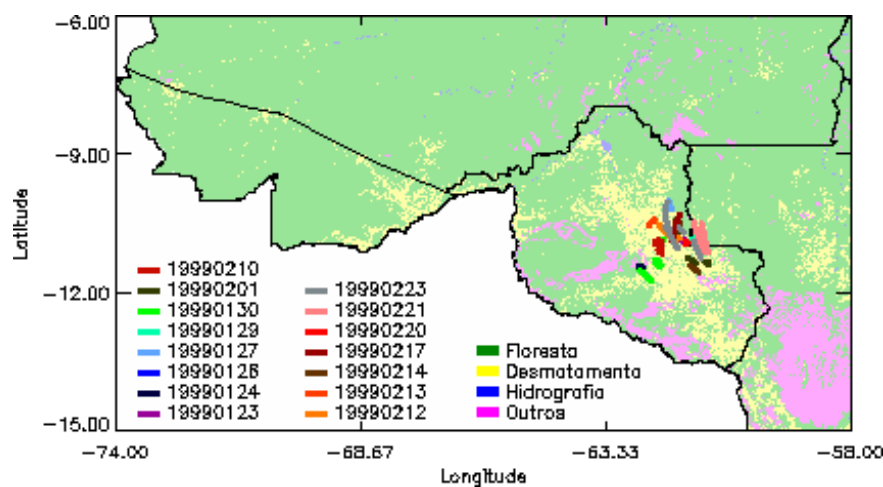


Figura 3.3: Composição das trajetórias diárias e cobertura vegetal realizadas durante a estação chuvosa.

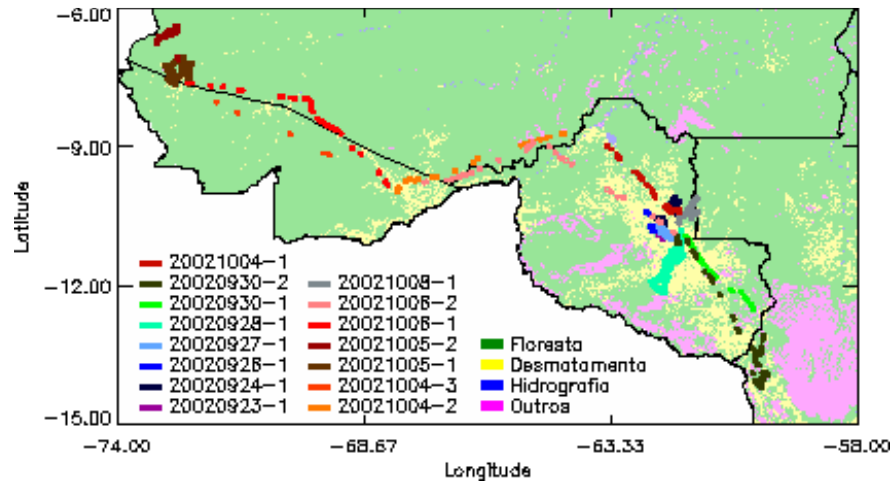


Figura 3.4: Composição das trajetórias diárias e cobertura vegetal realizadas durante a estação seca.

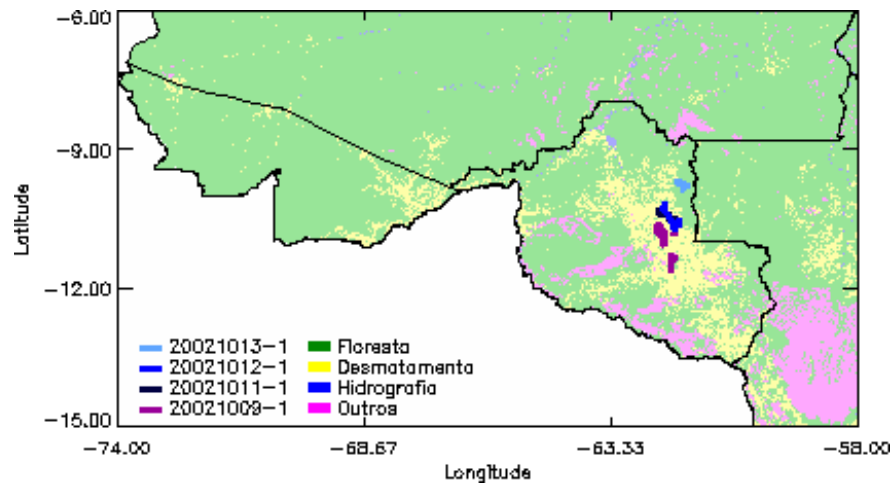


Figura 3.5: Composição das trajetórias diárias e cobertura vegetal realizadas durante a estação de transição.

O critério (d) obedeceu aos regimes de ventos predominantes, do ano de 1999 durante a estação chuvosa, entre 1000 e 800mb, e ao aparecimento da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), ambos observados por Rickenbach 2001 (Tabela 3.3).

Regime de Leste: de 19 a 29 de Janeiro e de 08 a 22 de Fevereiro	
Regime de Oeste:	
Sem formação da ZCAS: de 29 de Janeiro a 08 de Fevereiro.	Com presença marcante da ZCAS: de 22 de Fevereiro a 01 de Março.

Tabela 3.3: Regimes da Estação Chuvosa.

O critério (e) forneceu mais detalhes a partir das anotações realizadas pelos pesquisadores a bordo das aeronaves utilizadas nas campanhas. Deste registro, foram extraídas as informações que permitiram identificar algumas situações relevantes à análise, como por exemplo, as condições de proximidade a focos de queimadas, nuvens de tempestade, medições em setores estratiformes, presença de gelo, correntes ascendentes, etc.

O critério (f) foi aplicado com objetivo de eliminar os ruídos obtidos pela FSSP durante a Estação Seca e de Transição. Para garantir que as medidas utilizadas nas DTH fizessem parte de amostragens no interior de nuvens, somente foram utilizadas as medidas (acumulação para 1Hz) onde o conteúdo de água líquida integrado ao longo do espectro da FSSP fosse maior que $0,01\text{g/m}^3$. As concentrações observadas nos trechos identificados como fora de nuvem apresentaram valores da ordem de 10^{-1}cm^{-3} no canal médio de $2,75\mu\text{m}$, de 10^{-2}cm^{-3} nos canais médios entre $4,25$ e $7,25\mu\text{m}$; e 10^{-3}cm^{-3} nos canais médios de $8,75$ e $10,25\mu\text{m}$ (Figura 3.1 e Figura 3.2). A integração dessas concentrações equivale a valores de conteúdo de água líquida muito baixos, entre 10^{-3} e 10^{-4}g/m^3 , de forma que um limite inferior de $0,01\text{g/m}^3$ pode, seguramente, ser aplicado como filtro. Apesar das medidas da Estação chuvosa não terem exibido o mesmo tipo de ruído, para haver coerência, o filtro também foi aplicado.

Com o objetivo de caracterizar o perfil vertical dos hidrometeoros, as DTH foram calculadas para intervalos de pressão, viabilizando a representação da estrutura vertical interna das nuvens. Como as medições durante as Estações Seca e de Transição não foram realizadas em altitudes acima do nível de aproximadamente 5000m , o nível médio mais alto apresentado nas análises foi limitado em 500mb (média da camada entre 480 e 530mb), e o intervalo de pressão entre cada camada média foi de 50mb . Para este mesmo período, foi calculado o NCL médio e o valor encontrado para cada amostragem foi utilizado como da base da nuvem. O uso do filtro do LWC (critério g) seguido da separação das DTH em níveis

verticais resultou em algumas amostragens com um único nível médio de pressão. Para assegurar que a estrutura vertical dos casos pudesse ser analisada, o critério (g) estabeleceu que fossem utilizadas apenas as amostragens com mais de 3 níveis médios de pressão adjacentes.

As Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam o resultado obtido em cada etapa de classificação e um resumo das informações registradas pelos pesquisadores a bordo do avião. Os campos onde a cor de fundo é cinza foram excluídos das análises pelo critério (g) e os campos com cor de fundo branca apresentam, além do resultado dos critérios, a nomenclatura que foi utilizada para os casos que serão discutidos nas análises.

(a) Estação Chuvosa

23/01/1999 (b) Situação Convectiva. (c) Região desmatada. (d) Regime de Leste. (e) 20:21-20:34Z: Medições realizadas em espiral ascendente, em uma pequena célula isolada, com passagem pelo topo da célula. (g) 7 EC01	24/01/1999 (b) Situação Convectiva. (c) Região desmatada. (d) Regime de Leste. (e) 20:11-20:28Z: Descida de 100m seguindo cristais de gelo em queda através do nível de derretimento. (g) 4 EC02	26/01/1999 (b) Situação Convectiva. (c) Região desmatada. (d) Regime de Leste. (e) 20:32-22:12Z: Medições sucessivas de célula. (g) 5 EC03
27/01/1999 (b) Situação Convectiva. (c) Região desmatada. (d) Regime de Leste. (e) 21:20-21:23Z: Medições de uma bigorna de Cb. (g) 1	29/01/1999 (b) Situação Convectiva. (c) Região desmatada. (d) Regime de Leste. (e) 20:55-20:56Z: Medições de uma célula em dissipação. (g) 1	30/01/1999 (b) Situação Convectiva. (c) Região desmatada. (d) Regime de Oeste – Sem ZCAS. (e) 20:37-20:54Z: Medições em região estratiforme de células maduras. Observação de cristais, agregados, gotas e graupel. Observação de garoa sob a base da nuvem. Início de medições em espiral ascendente. (g) 4 EC04
01/02/1999 (b) Situação Convectiva. (c) Região desmatada. (d) Regime de Oeste – Sem ZCAS. (e) 18:24-19:55Z: Bigorna de células múltiplas – observação de gelo. Medições em célula convectiva com observação de graupel. (g) 3 EC05	10/02/1999 (b) Situação Convectiva. (c) Região desmatada. (d) Regime de Leste. (e) 19:24-20:05Z: Medições sucessivas de uma linha de células. (g) 5 (P<480mb)	12/02/1999 (b) Situação Convectiva. (c) Região desmatada. (d) Regime de Leste. (e) 19:47-20:13Z: Medições sucessivas de células. (g) 2
13/02/1999 (b) Situação Convectiva. (c) Região desmatada. (d) Regime de Leste. (e) 17:48-17:56Z: Medições sucessivas de células, observação de colunas, graupel e grandes partículas de gelo. (g) 1	14/02/1999 (b) Situação Convectiva. (c) Região desmatada. (d) Regime de Leste. (e) 18:33-18:59Z: Penetração em nuvem com muito gelo. Medições em célula com eco de 40 dBz. Observação de <i>Pileus</i> e graupel maiores que 1mm. (g) 2	17/02/1999 (b) Situação Convectiva. (c) Região desmatada e floresta. (d) Regime de Leste. (e) 18:06-18:34Z: Linha de células em desenvolvimento. Observação de muitas partículas irregulares maiores que 1mm. (g) 2

Tabela 3.4: Principais informações obtidas através do livro de registros do avião, durante a estação chuvosa, e identificação dos trechos onde as medições foram realizadas sobre floresta ou área desmatada. Para descrição da classificação, vide Tabela 3.1.

20/02/1999	21/02/1999	23/02/1999
(b) Situação Convectiva. (c) Região desmatada. (d) Regime de Leste. (e) 20:00:20:14Z: Medições realizadas em espiral descendente com observação de partículas de graupel de 400µm, gotas maiores que 1mm e precipitação na fronteira da nuvem. (g) 10 <u>EC06</u>	(b) Situação Convectiva. (c) Região de floresta. (d) Regime de Leste. (e) 19:45-20:49Z: Início de derretimento observado a -6°C. Presença de cristais de gelo, muitas partículas irregulares, colunas e graupel. (g) 4 <u>EC07</u>	(b) Situação Convectiva. (c) Região desmatada. (d) Regime de Oeste – Com ZCAS. (e1) 19:44-19:59Z: Linha de nuvens estratiformes. Medições realizadas em rota descendente, com observação de grandes partículas de gelo em 5000m de altitude. (g) 2 (e2) 20:18-21:01Z: Deslocamento para uma linha convectiva - Intensas células alinhadas com eco no radar de 40dBz. Medições em uma nova linha convectiva. Observação de partículas de $\approx 500\mu\text{m}$ e descargas elétricas próximas. (g) 4 (sendo 2 em P<480mb)

Tabela 3.4: Continuação

(a) Estação Seca

23/09/2002	24/09/2002	26/09/2002
(b) Situação Estratiforme. (c) Região desmatada. (e1) 19:07-19:18Z: Poluição intensa. Fumaça alimentando nuvens convectivas. Ascensão da aeronave pela corrente ascendente. (g) 3 <u>ES01</u>	(b) Situação Convectiva. (c) Região desmatada. (e1) 18:58-19:13Z: Poluição intensa. Região de nuvens rasas. (g) 1	(b) Situação Convectiva. (c) Região desmatada. (e) 18:37-19:55Z: Poluição moderada. Medições realizadas na base da nuvem. (g) 2
(e2) 19:58-20:01Z: Sem poluição. Nuvem de tempestade. Precipitação devido à fase de gelo. Precipitação de granizo. (g) 1	(e2) 19:55-20:33Z: Poluição intensa. Nuvem identificada por eco de radar, Intenso desenvolvimento vertical. Corrente ascendente de 5-10m/s, Corrente Descendente de 8.5m/s . (g) 4 <u>ES02</u>	
27/09/2002	28/09/2002	30/09/2002 – 1
(b) Situação Convectiva. (c) Região desmatada. (e1) 19:16-19:56Z: Poluição moderada. Medições realizadas na base da nuvem. Registro de precipitação fora da nuvem. (g) 1	(b) Situação Convectiva. (c) Região desmatada. (e) 17:53-19:11Z: Poluição moderada. Ausência de chuva quente. Encontro com linha de instabilidade. Corrente ascendente de 5m/s. Lenta ampliação do espectro com altitude, insuficiente para produzir chuva quente a 4500m de altitude. Observação de granizo e relâmpagos (vistos com radar 5 flashes/s). Término do vôo em chuva estratiforme. (g) 6 <u>ES03</u>	(b) Situação Estratiforme. (c) Região desmatada. (e1) 15:23-15:44Z: Sem poluição. Nuvens rasas. (g) 1 (e2) 15:44-15:55Z: Poluição leve. Nuvens rasas. (g) 1 (e3) 16:00-16:10Z: Poluição intensa. Penetração em um pequeno Piro Cumulus. (g) 1

Tabela 3.5: Principais informações obtidas através do livro de registros do avião, durante a estação seca, e identificação dos trechos onde as medições foram realizadas sobre floresta ou área desmatada. Para descrição da classificação, vide Tabela 3.1.

30/09/2002 – 2	04/10/2002 – 1	04/10/2002 – 2
(b) Situação Convectiva. (c) Região desmatada. (e1) 17:59-18:16Z: Poluição leve. Base de uma nuvem de tempestade em desenvolvimento. (g) 2		(b) Sem Imagem. (e1) 18:18-18:28Z: (c) Região desmatada. Poluição leve - moderada. (g) 3 <u>ES06</u>
(e2) 18:25-18:44Z: Poluição intensa. Medidas de um pequeno Piro Cumulus, desde o desenvolvimento até a dissipação. (g) 3 <u>ES04</u>	(b) Sem Imagem. (c) Região desmatada. (e) 15:17-16:10Z: Poluição moderada. Medidas de uma nuvem sem eco no radar e sem precipitação. (g) 5 <u>ES05</u>	
(e3) 18:46-18:56Z: Poluição moderada. Medidas em nuvens mais desenvolvidas, afastadas do Piro Cumulus. (g) 1 (e4) 19:03-19:57Z: Poluição moderada. Penetrações em células convectivas. (g) 3 (não seqüenciais) (e5) 20:05-20:32Z: Poluição moderada. Medições descendentes até a base da nuvem. (g) 3 (não seqüenciais)		(e2) 18:56-19:31Z: (c) Região desmatada. Poluição intensa. Penetração do mais intenso Piro Cumulus observado na estação. (g) 5 <u>ES07</u>
04/10/2002 – 3	05/10/2002 – 1	05/10/2002 – 2
(b) Sem Imagem (c) Região de floresta. (e) 21:25-22:13Z: Sem Poluição. Baixa concentração de partículas grandes. Observação de chuva quente. (g) 1	(b) Situação Convectiva. (c) Região de floresta. (e) 16:43-18:04Z: Sem poluição – dia mais limpo da campanha. Medições de uma nuvem desde a base até 4500m de altitude. Correntes ascendentes moderadas ~ 2,5m/s, com máximo de 5m/s Precipitação observada acima de 3000m. (g) 5 <u>ES08</u>	(b) Situação Convectiva. (c) Região de floresta. (e) 19:57-20:31Z: Sem poluição – dia mais limpo da campanha. Medições tomadas na mesma região do voo anterior. Foi observada precipitação na mesma altitude Forte eco no radar. (g) 5 <u>ES09</u>

Tabela 3.5: Continuação

* Durante a Estação Seca valores de corrente ascendente foram estimadas pela tripulação do ALPA, conforme o Log Book, as informações de relâmpagos eram visuais, e as do radar, transmitidas pela base de operação.

06/10/2002 – 1	06/10/2002 – 2	08/10/2002
(b) Situação Estratiforme (e1) 15:27-16:52Z: (c) Região de floresta. Sem Poluição. Observação de chuva quente e forte corrente ascendente nas regiões mais limpas. (g) 3 (não seqüenciais) (e2) 17:02-17:09Z: (c) Região desmatada. Início das condições poluídas. (g) 2	(b) Sem Imagem (e1) 18:31-18:32Z: (c) Região desmatada Penetração de Cb com regiões de chuva. (g) 0 (e2) 18:42-18:57Z: (c) Região desmatada Poluição moderada/ intensa. (g) 1 (e3) 19:05-19:35Z: (c) Região de floresta. Sem Poluição. (g) 1	(b) Situação Convectiva (c) Região desmatada. (e1) 18:56-19:02Z: Medições em nuvens convectivas. (g) 1 (e2) 19:20-20:10Z: (c) Região de floresta. Sem Poluição. (g) 5 <u>ES11</u>
	(e4) 19:38-20:35Z: (c) Região desmatada. (g) 3 <u>ES10</u>	

Tabela 3.6: Continuação

(a) Estação de Transição

09/10/2002	11/10/2002
(b) Situação Convectiva (c) Região desmatada. (e) 18:17-19:12Z: Convecção ativa com chuva. Correntes ascendentes maiores que 7,5m/s. Primeira observação de chuva quente nos elementos convectivos em crescimento. (g) 5 <u>ET01</u>	(b) Situação Estratiforme (c) Região desmatada. (e) 14:55-15:23Z: Sem registro de vôo. (g) 4 <u>ET02</u>
12/10/2002	13/10/2002
(b) Situação Convectiva (c) Região desmatada. (e) 17:05-17:21Z: Sem registro de vôo. (g) 4 <u>ET03</u>	(b) Situação Convectiva (c) Região de floresta. (e) 19:07-19:23Z: Sem registro de vôo. (g) 3 <u>ET04</u>

Tabela 3.7: Principais informações obtidas através do livro de registros do avião, durante a estação de transição, e identificação dos trechos onde as medições foram realizadas sobre floresta ou área desmatada. Para descrição da classificação, vide Tabela 3.1.

4 CARACTERIZAÇÃO DAS NUVENS

4.1 Estação Chuvosa, 1999

Nesta seção são apresentadas as descrições de cada um dos casos resultantes da metodologia descrita no capítulo anterior. Primeiramente são tratados os perfis verticais de concentração e LWC de partículas, em seguida são discutidas as distribuições dos hidrometeoros por nível de pressão, de cada caso individualmente. Cada sub item descreve uma estação, e ao final de cada um, há uma breve recapitulação dos aspectos mais relevantes dos casos da respectiva estação.

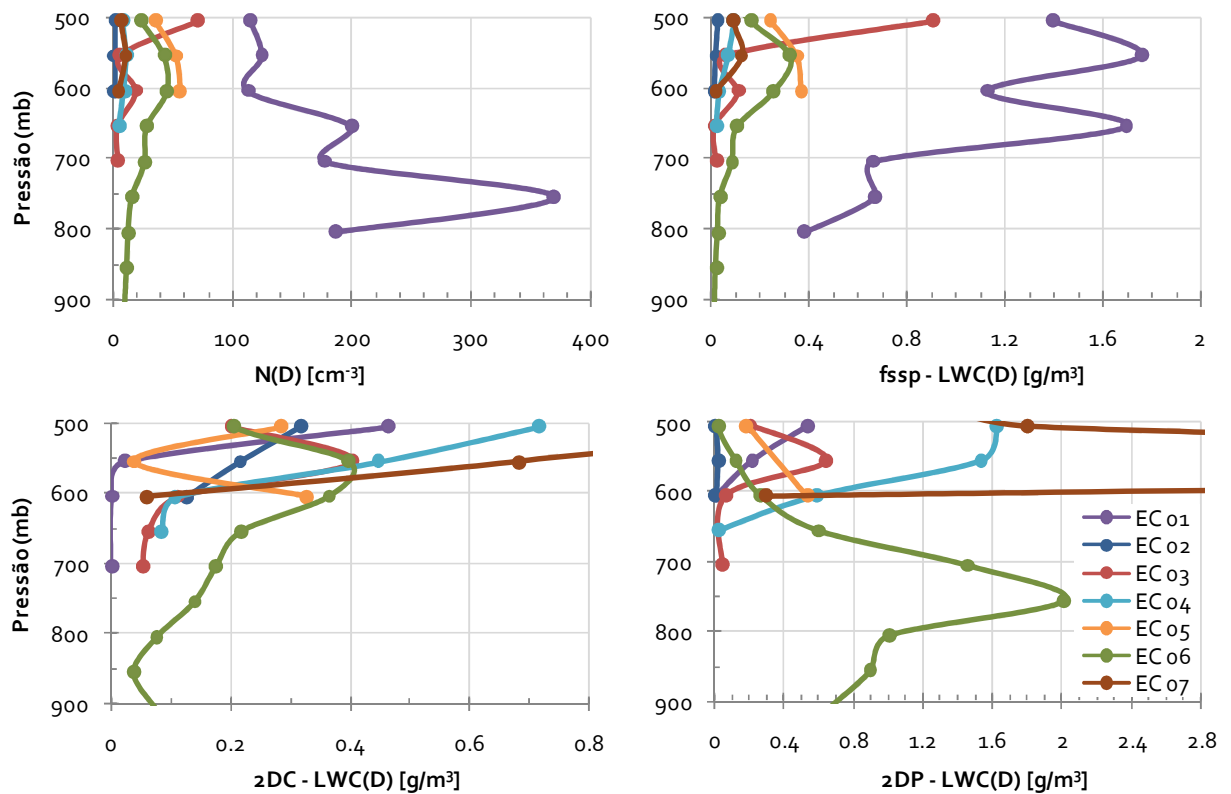


Figura 4.1: Perfis verticais utilizados para caracterizar a Estação Chuvosa: (a) número total de gotículas medido pela FSSP, (b), (c) e (d) conteúdo de água líquida proveniente dos sensores FSSP, 2DC e 2DP, respectivamente.

A Figura 4.1 apresenta quatro gráficos com perfis verticais, em função da pressão atmosférica, dos sete casos utilizados para caracterizar a estação chuvosa. O gráfico (a)

apresenta o número total de gotículas medido pela FSSP, enquanto que os gráficos (b), (c) e (d) apresentam o conteúdo de água líquida proveniente dos sensores FSSP, 2DC e 2DP, respectivamente. Todos os casos serão analisados individualmente, porém não seguirão a ordem cronológica usada para numerá-los, serão ordenados conforme o tipo de trajetória realizado para a tomada dos dados. A seqüência das análises será: EC01, EC02, EC04, EC06, onde os vôos foram realizados em rota espiral, seguidos dos casos EC03, EC05 e EC07, onde as trajetórias não exibiram uma forma definida.

Considerando o conteúdo de água proveniente de gotículas, o caso EC01 foi o que exibiu as maiores concentrações ao longo de todo perfil vertical, onde 85% do volume de água foi observado no sensor FSSP. Seguido da amostragem EC01, o caso EC05 apresentou 41% do LWC fornecido por gotículas de até $47\mu\text{m}$ de diâmetro. Com respeito ao conteúdo de água líquida proveniente de gotas médias ($50 \leq d < 500\mu\text{m}$) e grandes ($500 \leq d < 1000\mu\text{m}$), o caso EC02 exibiu 86% da água líquida em gotas com diâmetro entre 150 e $1000\mu\text{m}$. No espectro das gotas precipitáveis ($d \geq 1000\mu\text{m}$), o caso EC06 exibiu 85% do LWC total em precipitação..

Dentre os casos que compõem a Estação Chuvosa, o caso EC01 (curva roxa, Figura 4.1) apresentou medidas em ambiente convectivo durante o Regime de Ventos de Leste, nos níveis médios entre 800 (16,7°C) e 500mb (-2,8°C). A distribuição vertical de hidrometeoros deste vôo apresentou três regiões onde foi observado um aumento seguido de uma diminuição do número de gotículas, entre 800 e 700mb (10,5°C), primeiro máximo de gotículas, e entre 700 e 600mb (3,9°C), segundo máximo de gotículas, e o terceiro entre 600 e 500mb. Esta variação do número de gotículas refletiu no LWC obtido pela FSSP, que sofreu o mesmo tipo de variação ao longo da vertical, porém em diferentes proporções, exibindo a máxima concentração de gotículas e LWC da Estação Chuvosa (370cm^{-3} em 750mb, e $1,75\text{g/m}^3$ em 550mb, respectivamente). Entre 750 e 700mb, onde se observou o maior decréscimo da

concentração de gotículas, a variação correspondente do LWC não foi tão significativa, uma redução de $\sim 200\text{cm}^{-3}$ gotículas provocou uma variação de menos de $0,1\text{g/m}^3$ do LWC. Este tipo de comportamento, provavelmente, foi consequência de processos CC entre as gotículas, pois a coalescência reduz o número de gotículas, mas não afeta o LWC. Entre 700 e 650mb e entre 600 e 550mb, o efeito contrário foi observado, um pequeno aumento da concentração de gotículas, 20cm^{-3} , provocou um aumento de mais de 1g/m^3 do LWC. Este padrão sugere que houve uma injeção de gotículas maiores, possivelmente provenientes da quebra de algumas gotas médias observadas com a OAP-2DC.

Os perfis verticais de LWC obtidos através dos sensores OAP não registraram gotas no intervalo de pressão entre 800 e 700mb. Apesar do aumento significativo do LWC da FSSP com a altura, o mesmo não teve reflexo para os diâmetros maiores, OAP-2DC e 2DP. Somente em 500mb, o volume de gotas médias e grandes atingiu $0,46\text{g/m}^3$. As gotas precipitáveis (acima de $1000\mu\text{m}$) apareceram pela primeira vez em 600mb com $0,011\text{g/m}^3$ e exibiram seu LWC máximo no topo, em 500mb, de $0,54\text{g/m}^3$. Neste nível, a temperatura média abaixo de 0°C , indica que as medidas obtidas pela OAP-2DC e 2DP poderiam, na verdade, ser medidas de gelo, uma vez que este tipo de sensor não distingue água líquida de gelo. Neste caso, a camada apresentaria uma fase mista, e o processo de Bergeron seria responsável pela sublimação das gotículas menores, como pode ser observado entre os níveis de 550 e 500mb no espectro da FSSP.

A Figura 4.2 apresenta as DTH e as distribuições de conteúdo de água líquida por intervalo de classe de distribuição, para os diversos níveis de pressão do caso EC01. Os gráficos localizados na parte superior deste painel exibem a concentração dos hidrometeoros em cada um dos sensores, FSSP, OAP – 2DC e OAP – 2DP, da esquerda para a direita, respectivamente. Os gráficos exibidos na parte inferior apresentam o conteúdo de água líquida para cada um dos sensores, respeitando a mesma ordem dos gráficos acima.

A DTH obtida pela FSSP mostra que os níveis médios de 800 (laranja) e 750mb (verde), onde o primeiro máximo de LWC (Figura 4.1) foi observado, foi composto principalmente por gotículas pequenas com diâmetros entre 12,5 e 17,5 μm . O nível mais baixo (800 a 750mb) apresentou uma menor concentração que o nível imediatamente acima, sendo os valores máximos de 19 e 43 $\text{cm}^{-3}\mu\text{m}^{-1}$ (com diâmetro médio de 17,5 e 12,5 μm), respectivamente, indicando que novas gotículas se formaram durante a ascensão entre estes níveis. As medidas obtidas próximas à base da nuvem apresentaram uma distribuição bastante diferente dos níveis acima. Em 700mb (turquesa) a DTH exibiu um comportamento diferente, aparentando um estágio intermediário entre os níveis de 750 e 650mb (azul claro). O valor máximo da concentração de gotículas pequenas (12,5 μm) foi consideravelmente menor, 12 $\text{cm}^{-3}\mu\text{m}^{-1}$, e as gotículas acima de 22,5 μm começaram a aparecer em maior concentração. Neste nível, apesar da máxima concentração ter sido de gotículas com diâmetro de 12,5 μm , o LWC máximo esteve associado à gotículas com diâmetro de 27,5 μm . Este efeito retrata o início do processo de crescimento por CC conforme a ascensão vertical, uma vez que foi observada uma redução da concentração de gotículas pequenas, junto à um aumento significativo das gotículas maiores.

Entre 650 a 550mb (lilás), observou-se um aumento da concentração das gotículas maiores, com os máximos da concentração e LWC para gotículas com diâmetro de 32,5 μm . Conforme a Figura 4.1, sendo o LWC nestes níveis foi claramente maior que nos níveis inferiores. Foi possível constatar que durante a transição entre os níveis de 700 a 650mb houve uma remoção de parte das gotículas pequenas, e o aumento da concentração de gotículas maiores, criando uma segunda moda para a distribuição. A união de tais efeitos evidencia a iniciação do processo de crescimento por CC ao longo do deslocamento vertical das parcelas. Os últimos níveis de pressão apresentados nesta análise, de 650 a 500mb (roxo), exibiram uma distribuição bimodal bem definida, com centro em 17,5 e 32,5 μm . O aumento

da eficiência da CC durante a ascensão fica evidente no nível de 500mb, onde conteúdo de água líquida das gotículas pertencentes à segunda moda foi uma ordem de grandeza maior que o da primeira moda, 0,63 e 0,05 g/m³, respectivamente. A evolução ao longo da vertical para uma distribuição com duas modas é consequência da CC entre as gotículas, que faz com que a população entre 17,5 e 32,5µm seja coletada por gotículas maiores e desenvolvam outra moda de distribuição, com centro num diâmetro maior, neste caso ainda no espectro da FSSP, em 32,5µm. A iniciação do processo de CC entre gotículas, aparentemente pouco provável, foi causada por uma eficiência de coleta relativamente alta. Considerando que o diâmetro das gotículas que estariam sendo coletadas era de 22,5µm, o diâmetro das gotículas coletoras para uma eficiência de coleta de 0,6 seria de 37,5µm (Klett e Davis, 1973), exatamente como foi observado na distribuição.

As distribuições obtidas pela OAP – 2DC mostram que, com o aumento da altitude, a concentração e o conteúdo de água das gotas também aumentaram. Este aumento evidencia que o processo de CC se tornou significativo. Também foi possível verificar que as maiores gotas, com diâmetro máximo de 1mm, também estiveram nos níveis mais altos, indicando que no momento da tomada dos dados a corrente ascendente ainda era forte o suficiente para sustentar essas gotas. (Gunn e Kinzer, 1949, a corrente ascendente para sustentar gotas com diâmetro de 1mm seria de 4,03m/s). A OAP – 2DP registrou o diâmetro máximo de 1,2mm , o menor observado na estação, com o mesmo padrão de distribuição da OAP – 2DC, ou seja, maiores concentrações em níveis mais altos. Apesar da nuvem praticamente não ter apresentado gotas de tamanhos precipitáveis nos diversos níveis de pressão, não há como afirmar se o nível mais alto, 500mb, correspondia ao topo da nuvem. Deste modo, é possível que houvesse gotas maiores em níveis mais elevados.

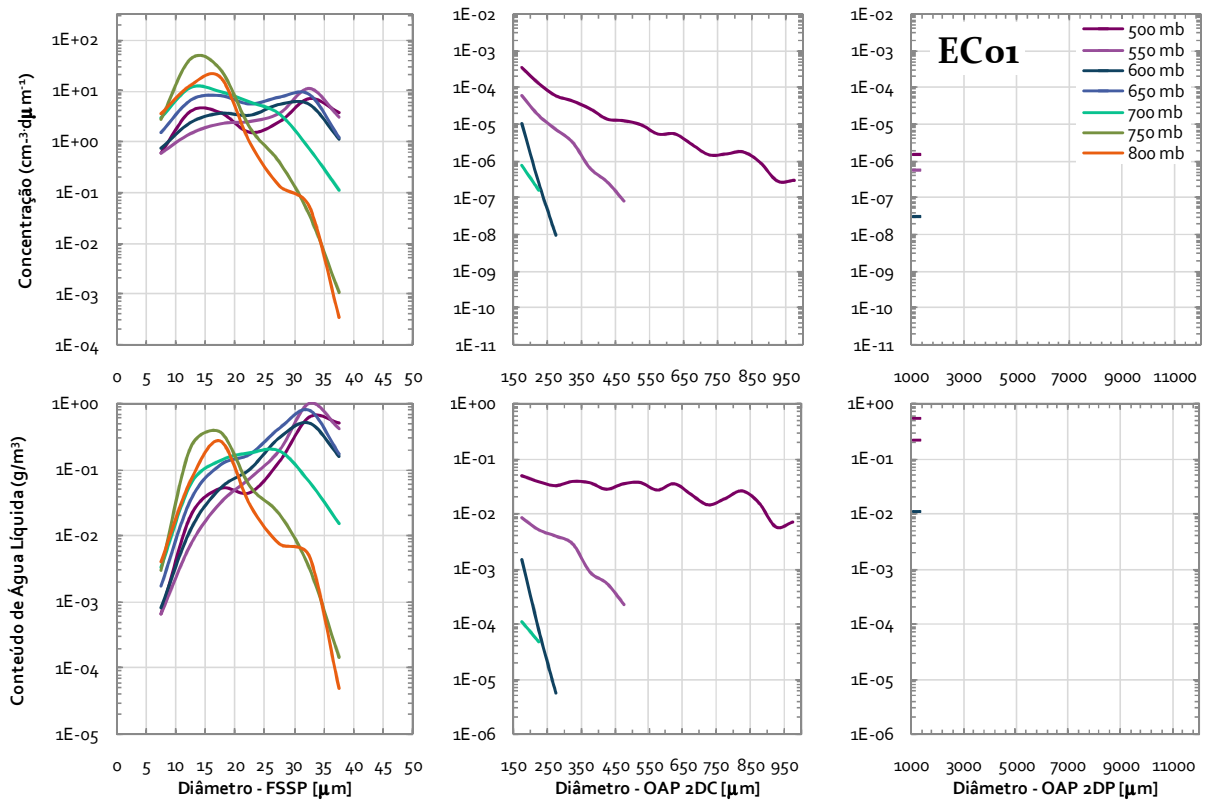


Figura 4.2: Distribuição de tamanho de gotículas e gotas, e distribuição de conteúdo de água líquida por tamanho, obtidas com os sensores FSSP, 2DC e 2DP em os diversos níveis de pressão para o caso da Estação chuvosa, caso EC 01, de 23/01/1999 das 20:21 às 20:34Z.

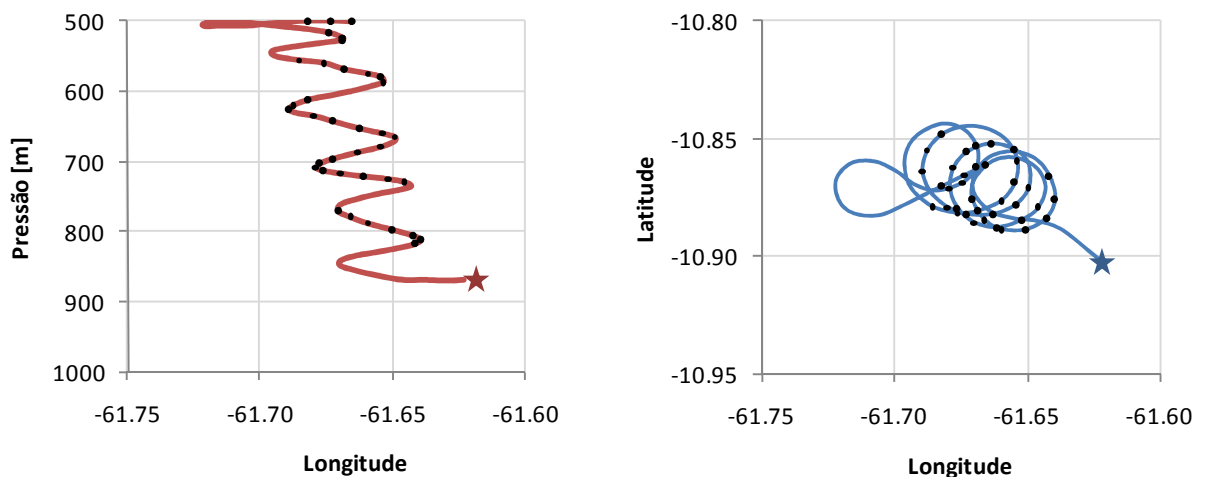


Figura 4.3: Trajetória do vôo correspondente ao caso EC01. À esquerda, Altitude versus Longitude e à direita, Latitude versus Longitude. A linha contínua representa o percurso realizado pelo avião e os pontos, as coordenadas onde foram tomadas as medidas utilizadas nas distribuições. A estrela representa o início da trajetória.

A Figura 4.3 mostra a trajetória do vôo, à esquerda estão as coordenadas de altitude em função da longitude e à direita estão as coordenadas de latitude em função da longitude, onde é possível verificar que as medidas foram tomadas em uma ascensão contínua com trajetória em espiral, permitindo afirmar que as distribuições apresentadas na Figura 4.2 pertenciam à mesma nuvem.

O caso EC02 (Figura 4.1, curva azul escura) apresentou medidas em ambiente convectivo durante o Regime de Ventos de Leste, entre os níveis médios entre 600 (2,9°C) e 500mb (-2,3°C). O conteúdo de água de gotículas exibiu um perfil crescente com a altitude, porém com valores relativamente baixos para a estação, sendo que a máxima concentração foi observada no topo (500mb) com $2,15\text{cm}^{-3}$, e o LWC deste mesmo nível foi de $0,03\text{g/m}^3$. O maior volume de água líquida foi registrado pela OAP – 2DC, correspondendo a 86% do LWC total da nuvem, com perfil vertical crescente com a altitude e valor máximo observado no topo, de $0,31\text{g/m}^3$. A OAP – 2DP apresentou o máximo LWC em 550mb (1,4°C) de $0,03\text{g/m}^3$.

A Figura 4.4 mostra maior concentração de gotículas ($0,11\text{cm}^{-3}\mu\text{m}^{-1}$) no nível mais baixo (600mb), com diâmetro médio em torno de $12,5\mu\text{m}$. Nos níveis acima, a máxima concentração ficou situada na segunda moda da distribuição, em $37,5\mu\text{m}$, onde também foram observados os máximos do LWC, com maior concentração e água líquida localizados no nível mais alto (500mb). A redução da concentração das gotículas e o aumento do diâmetro médio da primeira moda durante a ascensão entre os níveis, retrata que as gotículas cresceram por CC, o que também pode ser visto através de aumento do conteúdo de água líquida entre os níveis de 600 e 500mb. As DTH das gotas médias e grandes exibiram um decréscimo da concentração com o aumento do tamanho, sendo as maiores concentrações presentes no topo. No entanto o LWC destas gotas exibiu tendência de aumento, indicando que havia crescimento por CC nesta faixa do espectro. As gotas precipitáveis somente foram registradas

com diâmetros entre 1,0 e 1,2mm, exceto pelo nível de 550mb (lilás), cuja concentração e conteúdo de água líquida diminuíram com o aumento do tamanho. O tamanho máximo registrado das gotas precipitáveis foi de 2,4mm de diâmetro. A Figura 4.5 mostra a trajetória do vôo realizada em ascensão contínua em espiral, permitindo afirmar que as distribuições do caso EC02 pertenciam à mesma nuvem.

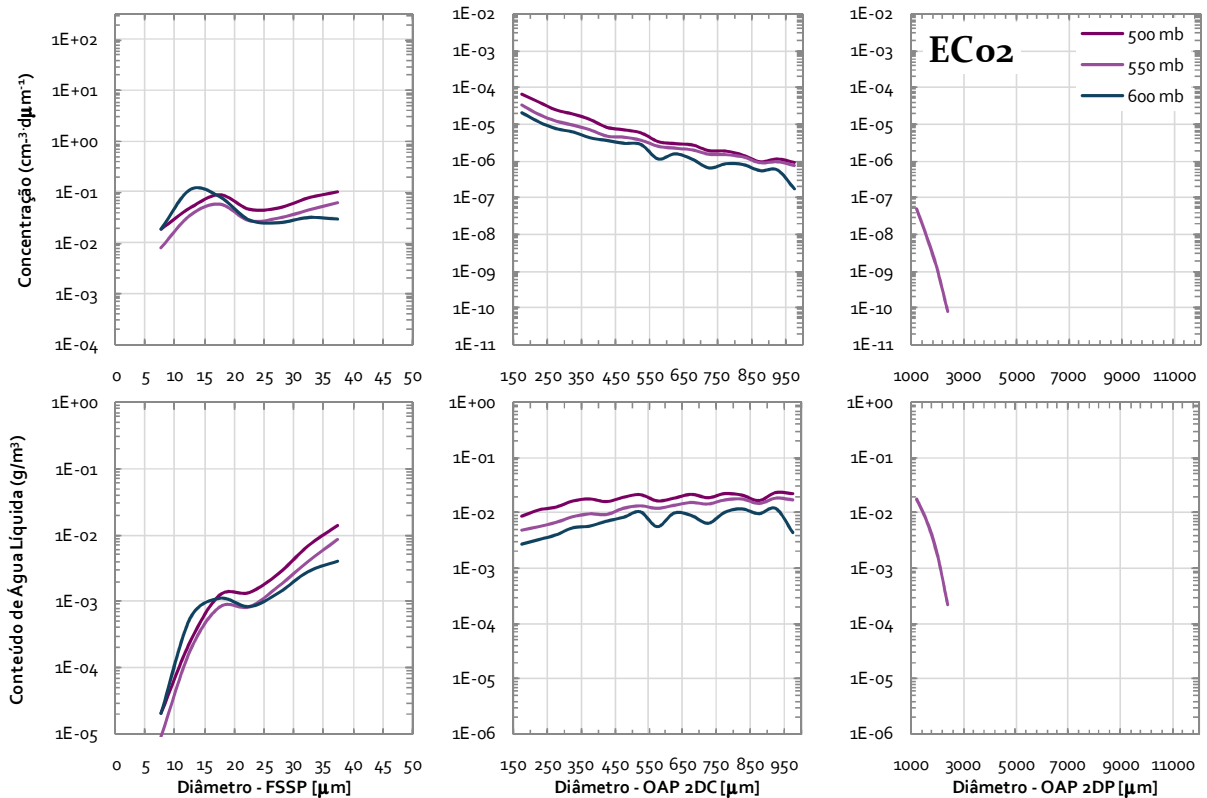


Figura 4.4: Distribuição de tamanho de gotículas e gotas, e distribuição de conteúdo de água líquida por tamanho, obtidas com os sensores FSSP, 2DC e 2DP em os diversos níveis de pressão para o caso da Estação chuvosa, caso EC02, de 24/01/1999 das 20:11 às 20:28Z.

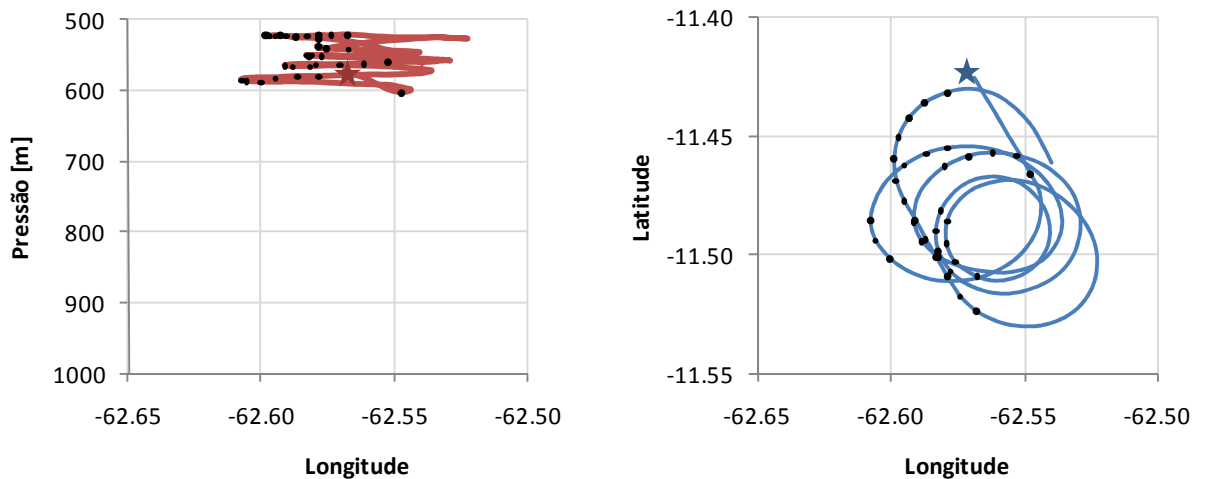


Figura 4.5: Trajetória do voo correspondente ao caso EC02. À esquerda, Altitude versus Longitude e à direita, Latitude versus Longitude. A linha contínua representa o percurso realizado pelo avião e os pontos, as coordenadas onde foram tomadas as medidas utilizadas nas distribuições. A estrela representa o início da trajetória.

O caso EC04 foi medido em ambiente com formação convectiva, durante o Regime de Ventos de Oeste, sem a presença da ZCAS. O perfil vertical apresentou medidas entre 650 (6,5°C) e 500mb (-2,1°C), como mostra a Figura 4.1 (curva azul clara). O número máximo de gotículas ($11,4\text{cm}^{-3}$) ocorreu em 550mb (0,1°C) e o conteúdo de água total destas gotículas variou pouco ao longo da vertical, entre $0,02\text{g/m}^3$ na base, e $0,09\text{g/m}^3$ no ponto de máximo, em 500mb. Em contrapartida, as medidas de gotas médias, grandes e precipitáveis apresentaram um valor mais elevado de conteúdo de água líquida. As gotas médias e grandes tiveram um perfil crescente com a altitude, atingindo $0,71\text{g/m}^3$ em 500mb e as gotas precipitáveis apresentaram um valor máximo de $1,62\text{g/m}^3$ no mesmo nível, sendo responsáveis por 71% do LWC total da nuvem.

A Figura 4.6 retrata que a maior concentração de gotículas ocorre com diâmetro médio de $12,5\mu\text{m}$, durante a condensação, porém o maior conteúdo de água de gotículas esteve localizado em diâmetros maiores que $30\mu\text{m}$, correspondendo ao aparecimento da segunda moda onde o crescimento ocorre por CC. Tanto a concentração quanto o volume de água das gotículas menores, até $12,5\mu\text{m}$, foram maiores no nível de 600mb. As gotículas

maiores que $12,5\mu\text{m}$ concentraram-se nos níveis mais altos de 550 (lilás) e 500mb (roxo). As OAP indicaram que tal comportamento se manteve, com a maior quantidade de gotas médias e grandes nas maiores altitudes, podendo implicar que a fase fria da nuvem estava ativa. A maior concentração e água líquida de hidrometeoros precipitáveis foi registrada em 500mb, e seu tamanho máximo atingiu $9,2\text{mm}$ em 600mb. O tamanho máximo observado destes hidrometeoros permite afirmar que estes não se tratavam de gotas, mas de agregados de gelo. A Figura 4.7 mostra que as medidas foram tomadas continuamente em duas regiões distintas da nuvem.

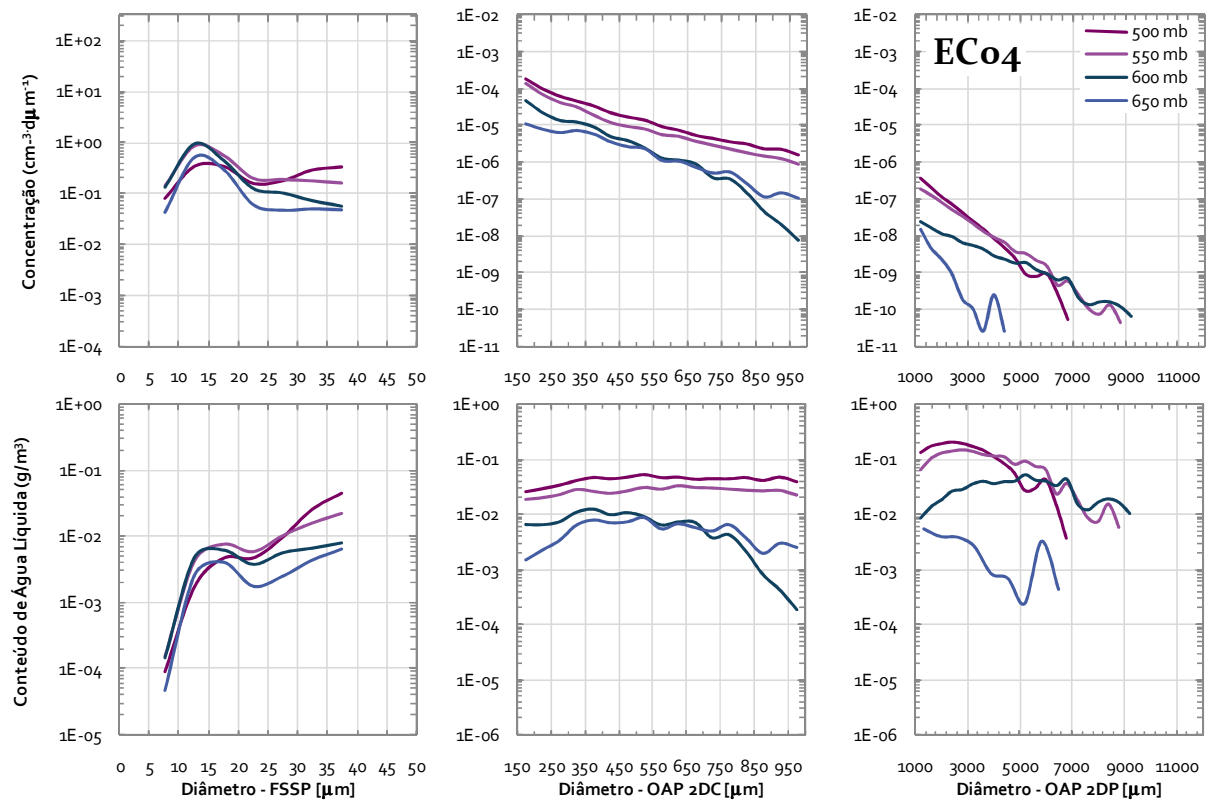


Figura 4.6: Distribuição de tamanho de gotículas e gotas, e distribuição de conteúdo de água líquida por tamanho, obtidas com os sensores FSSP, 2DC e 2DP em os diversos níveis de pressão para o caso da Estação chuvosa, caso ECo4, de 30/01/1999 das 19:12 às 20:54Z.

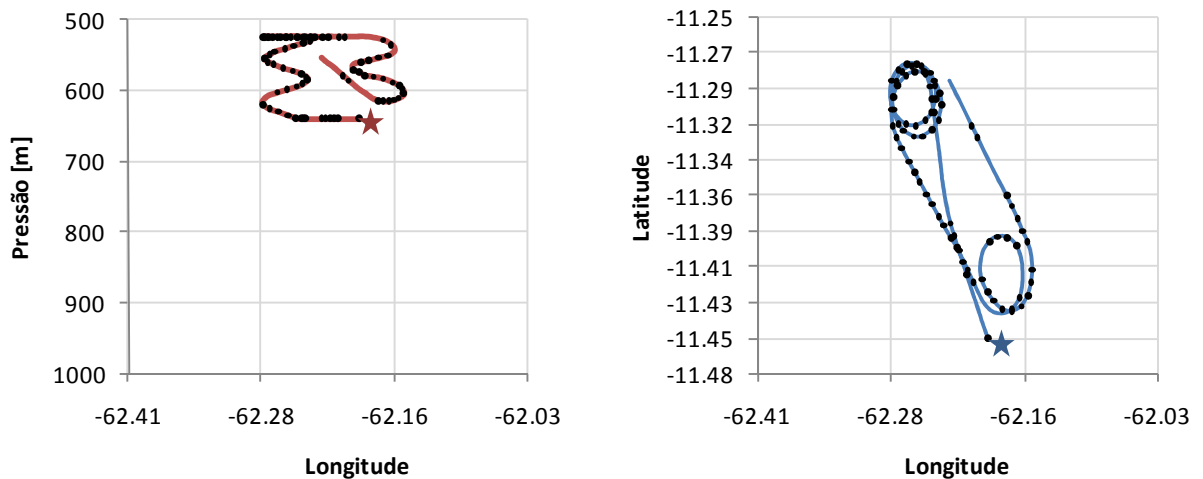


Figura 4.7: Trajetória do voo correspondente ao caso EC04. À esquerda, Altitude versus Longitude e à direita, Latitude versus Longitude. A linha contínua representa o percurso realizado pelo avião e os pontos, as coordenadas onde foram tomadas as medidas utilizadas nas distribuições. A estrela representa o início da trajetória.

No caso EC06, a Figura 4.1 (curva verde) mostra que as medidas, pertencentes ao Regime de Ventos de Leste, tiveram início em 900mb ($21,7^{\circ}\text{C}$), e foram até 500mb ($-7,12^{\circ}\text{C}$). Somente no intervalo entre 550 ($3,9^{\circ}\text{C}$) e 500mb foi possível verificar uma leve diminuição tanto da concentração quanto do LWC medido pela FSSP. Neste caso, simultaneamente à redução do LWC das gotículas, foi observada água líquida em ambos os espectros das OAP-2DC e 2DP, indicando que, provavelmente, houve uma coleta realizada pelas gotas médias e grandes. O perfil vertical de água da FSSP mostrou que a maior concentração das gotículas esteve localizada em níveis elevados, sendo o máximo observado em 550mb. Além disso, está implícito que houve uma corrente ascendente forte o suficiente para sustentar as gotas com tamanho correspondente ao intervalo medido pelo sensor 2DC, que também apresentaram a maior concentração na mesma região das gotículas medidas pela FSSP. Já as gotas maiores, medidas a partir do 2DP, contribuíram com 71% do conteúdo de água líquida total do caso e aparentemente foram responsáveis pela coleta das gotículas presentes nas porções mais baixas da nuvem, pois apresentam o máximo conteúdo de água, de $2,0\text{g}/\text{m}^3$, em 750mb, fornecendo evidências que estavam precipitando.

A Figura 4.8 mostra maior concentração de gotículas em $12,5\mu\text{m}$, enquanto que o LWC foi máximo para diâmetros maiores que $32,5\mu\text{m}$. A distribuição obtida pela FSSP apresentou maiores concentrações nas distribuições de níveis mais elevados, podendo ser um indicativo de fortes correntes ascendentes, uma vez que a concentração máxima de gotículas (máxima supersaturação) foi observada em níveis mais frios. Além disso, houve duas modas bem distintas em todos os níveis verticais, sendo a segunda moda uma consequência do processo de CC, pois apesar do diâmetro médio dessas gotículas ser ainda muito pequeno, há possibilidade de uma boa eficiência de coleta, tal como foi descrito anteriormente no caso EC01. As gotículas pequenas, até $12,5\mu\text{m}$, foram as que apresentaram maior concentração em todos os níveis de pressão. Em contrapartida, o LWC fornecido por gotículas estas gotículas pequenas nos níveis acima de 700mb , foi menor que o LWC proveniente de gotículas maiores, com diâmetros acima de $32,5\mu\text{m}$. Gotículas maiores, entre $17,5$ e $27,5\mu\text{m}$, apresentaram maior concentração e conteúdo de água no nível intermediário de 600mb ; e gotículas acima de $32,5\mu\text{m}$ de diâmetro, exibiram a maior concentração e volume em 550mb . A baixa concentração das gotículas grandes, acima de $30\mu\text{m}$, nos níveis mais quentes é um indicativo de que a maior eficiência do processo de CC ocorreu nos níveis mais elevados da nuvem.

As distribuições obtidas pela OAP-2DC mostraram que as gotas médias, inicialmente, se apresentaram mais concentradas nos níveis mais altos, 550 e 500mb . Com seu crescimento, as concentrações na porção inferior da nuvem começam a aumentar, sendo que as gotas com diâmetros próximos à 1mm apresentaram maior concentração em níveis mais baixos, de 700 e 750mb , retratando que havia precipitação e coleta. Com a OAP-2DP foi possível confirmar a presença de precipitação através da predominância das gotas nos níveis baixos, tal como foi identificado através da Figura 4.1. Além da evidência dada pela precipitação, a DTH da OAP-2DP mostra uma elevação da concentração em diversos níveis

quando as gotas atingem um diâmetro de 4,0 e 4,8mm, causada provavelmente pela quebra de gotas maiores (processo de Break Up) ou também por mais CC. O diâmetro máximo registrado para as gotas precipitáveis foi de 6,8mm. A Figura 4.9 mostra que trajetória realizada pelo avião foi uma espiral descendente, com tomadas de dados contínuas dentro da mesma nuvem.

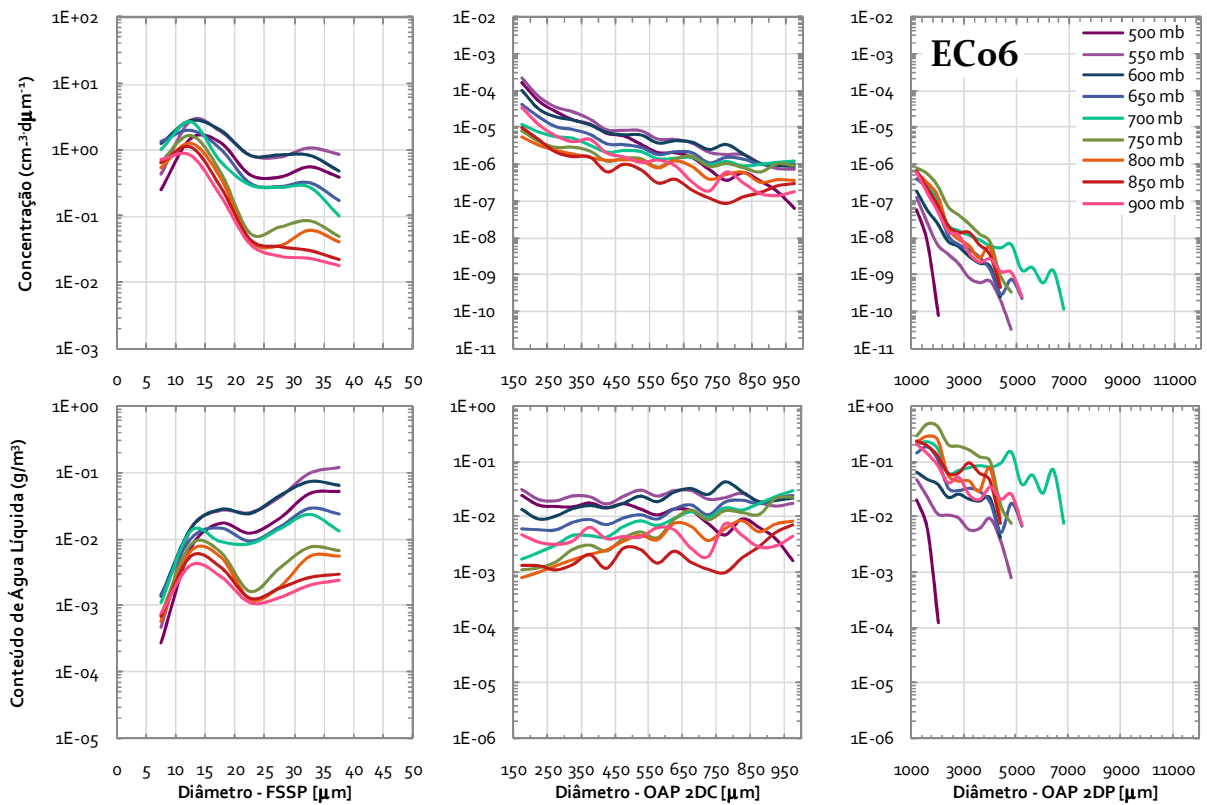


Figura 4.8: Distribuição de tamanho de gotículas e gotas, e distribuição de conteúdo de água líquida por tamanho, obtidas com os sensores FSSP, 2DC e 2DP em os diversos níveis de pressão para o caso da Estação chuvosa, caso ECo6, de 20/02/1999 das 20:00 às 20:14Z.

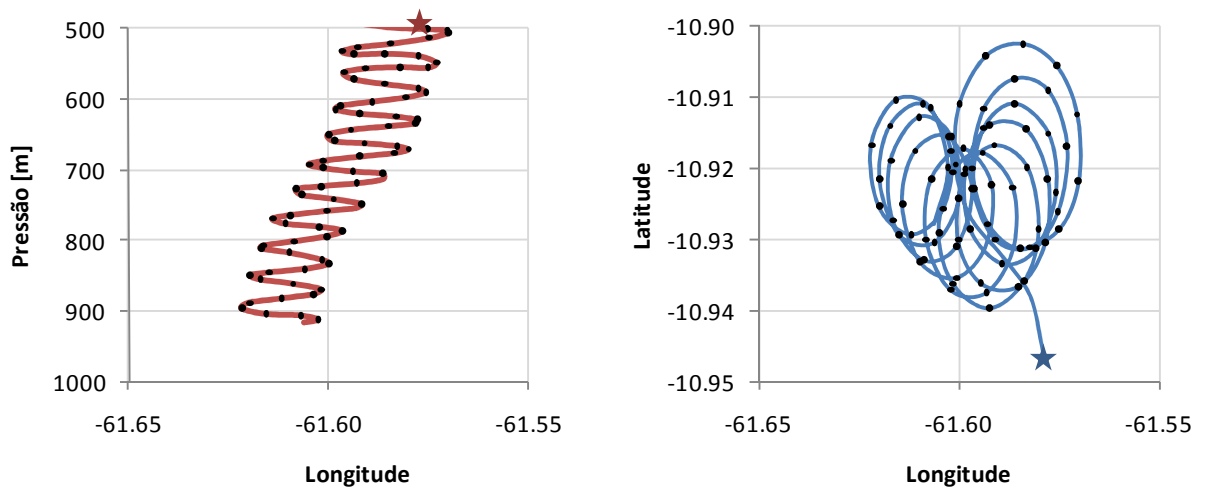


Figura 4.9: Trajetória do voo correspondente ao caso EC06. À esquerda, Altitude versus Longitude e à direita, Latitude versus Longitude. A linha contínua representa o percurso realizado pelo avião e os pontos, as coordenadas onde foram tomadas as medidas utilizadas nas distribuições. A estrela representa o início da trajetória.

As medidas do caso EC03 (Regime de Ventos de Leste), como mostra a Figura 4.1 (curva vermelha), se concentraram entre as camadas de 700 (9,7°C) e 500mb (-2,6°C). O perfil vertical deste caso mostrou uma concentração máxima de gotículas de nuvem no nível mais alto (0,91g/m³), enquanto que o LWC máximo proveniente dos sensores 2DC e 2DP esteve no nível abaixo, ou seja em 550mb (-0,5°C), com 0,40 e 0,64g/m³, respectivamente. No nível de 600mb (2,4°C) a FSSP apresentou um pequeno ponto de máximo, com 0,11g/m³ de água líquida. No nível acima, em 550mb, o processo de CC parecia ativo, pois houve uma redução da quantidade de gotículas de nuvem e grande parte do conteúdo de água veio de tamanhos maiores, observado pelo 2DC e 2DP.

A Figura 4.10 ilustra que os níveis de 600 e 500mb apresentaram concentração e conteúdo de água bem maior que o nível intermediário, entretanto o perfil da distribuição deste nível esteve bem semelhante aos demais. Apesar das diferenças observadas nas concentrações ao longo dos níveis, o processo de crescimento por CC estava ativo em todos eles. Nas distribuições das OAP, foi no nível de 550mb onde estiveram presentes a maior

parte dos hidrometeoros médios, grandes e precipitáveis, com tamanho máximo observado de 7,6mm, correspondendo à hidrometeoros de gelo.

A Figura 4.11 mostra a trajetória realizada pelo avião e os pontos onde foram tomados os dados utilizados nas DTH. Foi observado que o trecho medido inicialmente não correspondeu à mesma região medida em trajetória espiral. Na tentativa de restringir a análise somente a esta segunda região, foi verificado que o número de níveis verticais da DTH seria de apenas dois, o que causaria a exclusão do caso EC03 das análises como estabelecido pelo critério (g) da metodologia. Deste modo, a DTH apresentada na Figura 4.10 contém distribuições de regiões distintas da nuvem, o nível médio de 500mb compreende as medidas tomadas entre -62.2 e -62.1° de longitude e, os níveis médios de 550 e 600mb, correspondem às medidas realizadas em espiral entre -61.9 e -61.8° de longitude.

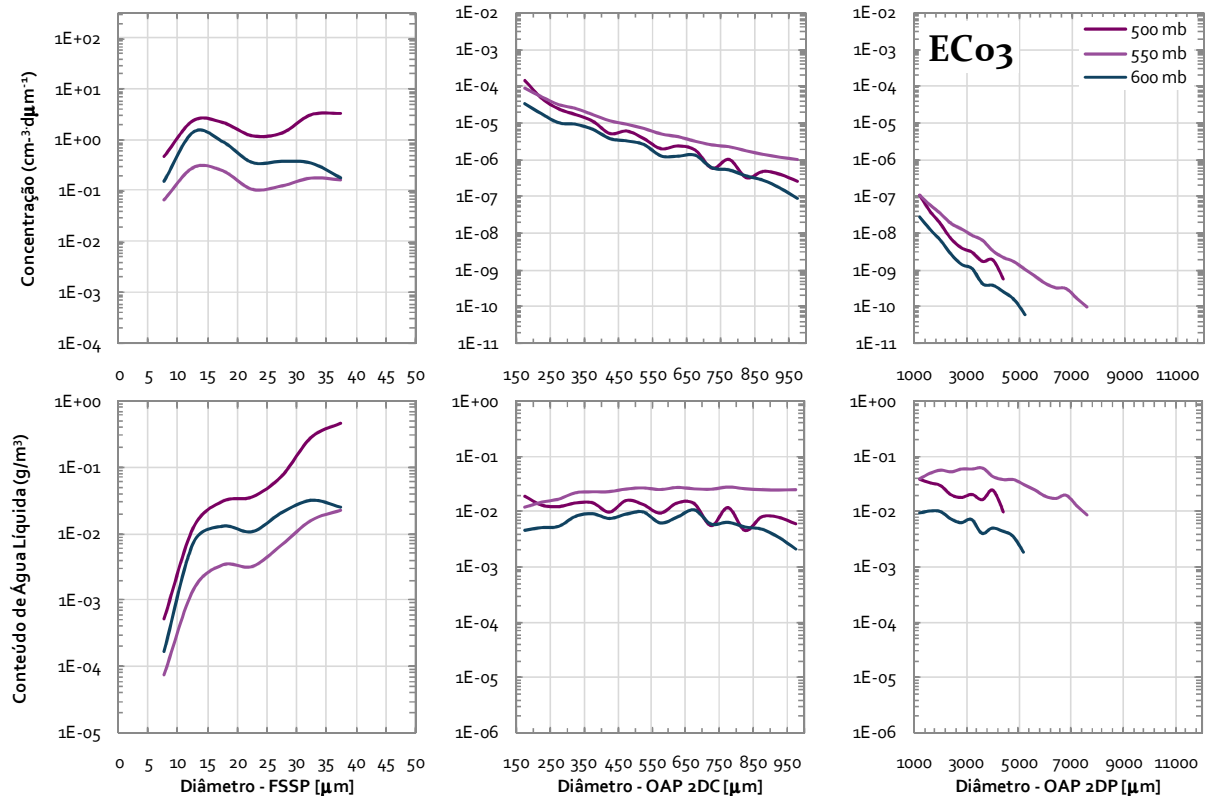


Figura 4.10: Distribuição de tamanho de gotículas e gotas, e distribuição de conteúdo de água líquida por tamanho, obtidas com os sensores FSSP, 2DC e 2DP em os diversos níveis de pressão para o caso da Estação chuvosa, caso EC03, de 26/01/1999 das 20:32 às 22:12Z.

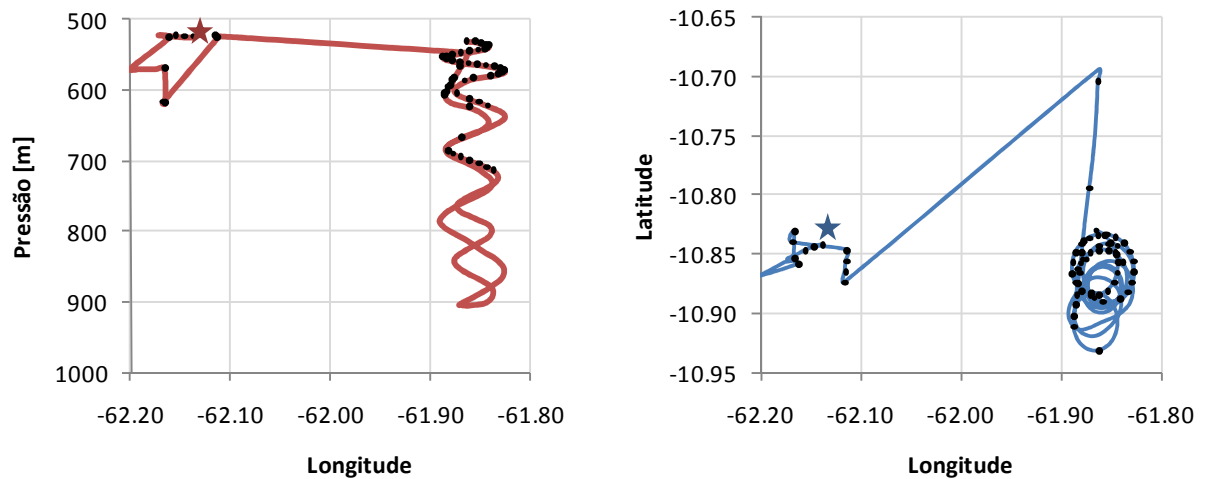


Figura 4.11: Trajetória do vôo correspondente ao caso EC03. À esquerda, Altitude versus Longitude e à direita, Latitude versus Longitude. A linha contínua representa o percurso realizado pelo avião e os pontos, as coordenadas onde foram tomadas as medidas utilizadas nas distribuições. A estrela representa o início da trajetória.

A Figura 4.1 mostra que o caso EC05 (curva laranja), com medidas entre 600 (3,2°C) e 500mb (-2,4°C), apresentou um perfil vertical com concentração e volume de água de gotículas decrescente com a altitude. As medidas deste caso foram tomadas durante o Regime de Ventos de Oeste, sem a presença da ZCAS. Apesar do conteúdo de água líquida ter sido relativamente baixo para os valores da estação, este foi o caso com o segundo maior volume de água proveniente de gotículas, 41%. As gotas médias exibiram o menor volume de água no nível intermediário de 550mb (1,4°C) e as gotas precipitáveis só apareceram em 600 e 500mb, com LWC também decrescendo com a altitude.

A Figura 4.12 mostra que o nível intermediário (550mb) se destacou por apresentar mais gotículas entre 22,5 e 27,5 μ m que os outros níveis, porém tanto gotículas menores, em crescimento por difusão, quanto maiores, no extremo final do espectro da FSSP, em crescimento por CC, estavam mais concentradas no nível abaixo, em 600mb. O tipo de distribuição do nível de 550mb retrata um estágio anterior do desenvolvimento da CC que o observado nos níveis de 600 e 500mb. As gotas médias apresentaram um comportamento decrescente semelhante nos níveis de 600 e 500mb, enquanto que no nível de 550mb exibiram

um decréscimo mais acentuado com o aumento do diâmetro. O conteúdo de água líquida dos níveis de 600 e 500mb exibiu algumas oscilações ao longo do espectro, mas sua tendência foi praticamente constante. Já no nível de 550mb, o LWC apresentou um decréscimo acentuado com o aumento do tamanho. Os tamanhos precipitáveis estiveram presentes em maior concentração e volume no nível mais baixo, além de terem apresentado evidência de um provável processo de agregação ou acreção entre gotas e gelo ao atingirem 4mm, sendo que o diâmetro máximo observado foi de 5,2mm.

A Figura 4.13 mostra que a trajetória realizada para a tomada dos dados do caso EC05 não seguiu um padrão característico e não manteve a continuidade entre as medidas. Medidas realizadas com este tipo de trajeto dificultam o processo de caracterização da nuvem e identificação dos processos microfísicos.

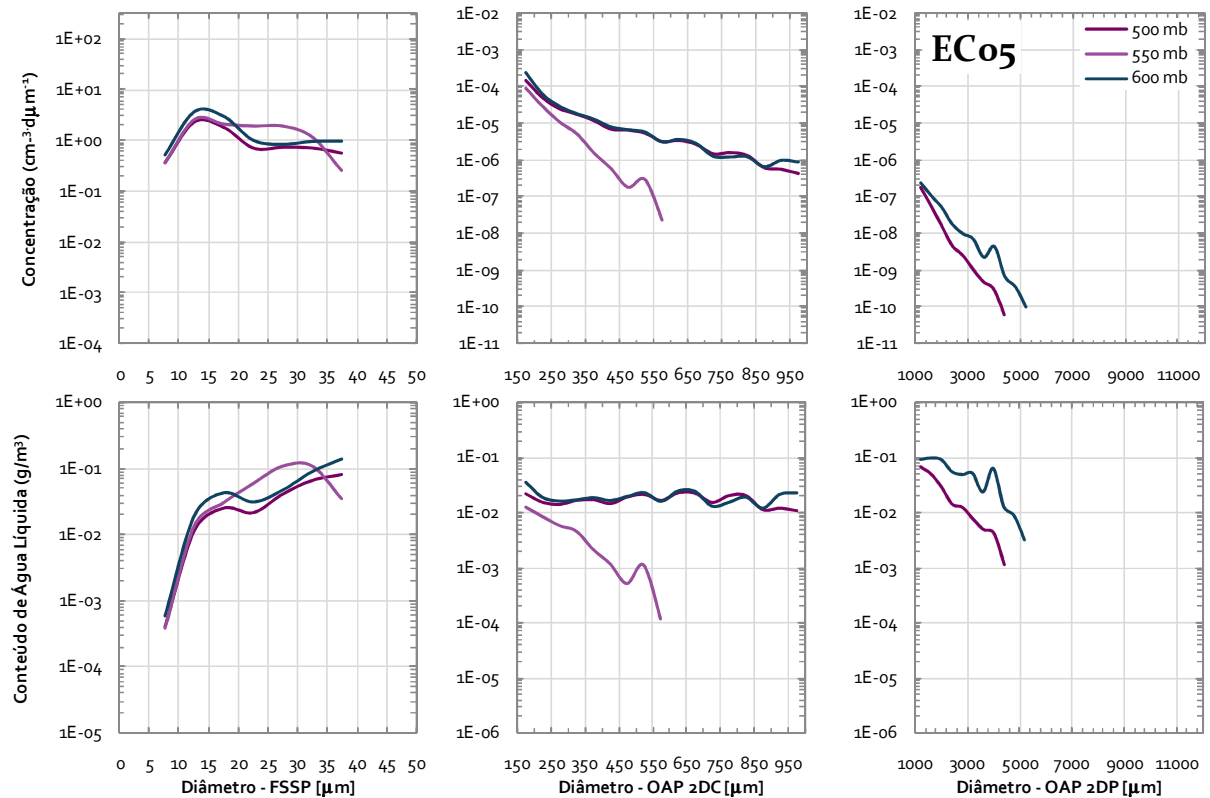


Figura 4.12: Distribuição de tamanho de gotículas e gotas, e distribuição de conteúdo de água líquida por tamanho, obtidas com os sensores FSSP, 2DC e 2DP em os diversos níveis de pressão para o caso da Estação chuvosa, caso EC05, de 01/02/1999 das 18:24 às 19:55Z.

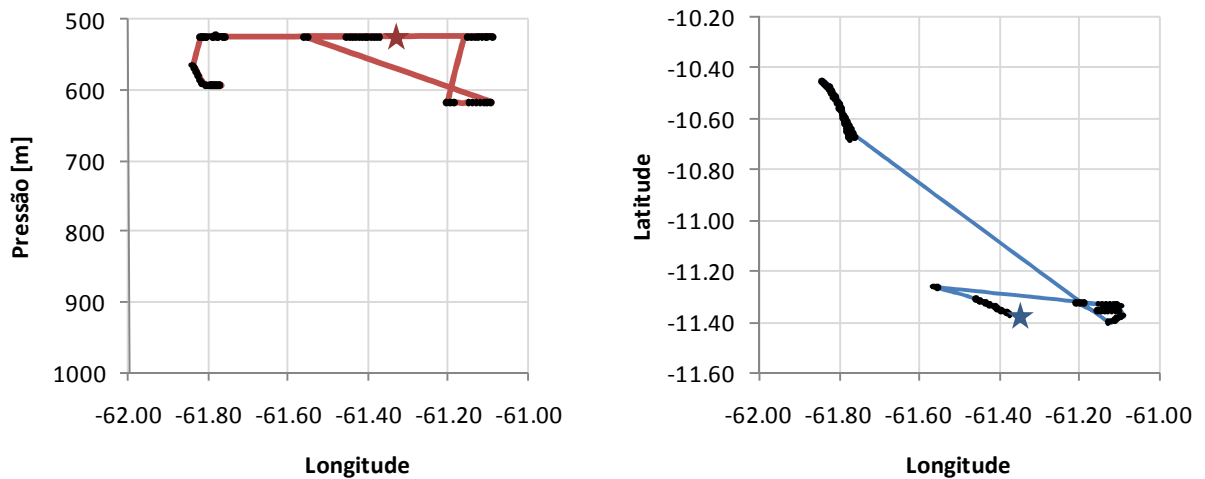


Figura 4.13: Trajetória do vôo correspondente ao caso EC05. À esquerda, Altitude versus Longitude e à direita, Latitude versus Longitude. A linha contínua representa o percurso realizado pelo avião e os pontos, as coordenadas onde foram tomadas as medidas utilizadas nas distribuições. A estrela representa o início da trajetória.

A Figura 4.1 mostra que o caso EC07 (curva marrom), durante o Regime de Ventos de Leste, apresentou medidas tomadas entre os níveis médios de 600 (3,2°C) e 500mb (-5,8°C), e foi o caso que exibiu o maior conteúdo de água líquida proveniente de gotas grandes e precipitáveis dentre todos os casos da Estação Chuvosa, 85%. O perfil vertical da FSSP mostrou que a maior quantidade de gotículas foi observada em 550mb (-3,6°C) contribuindo com apenas 0,12g/m³ do conteúdo de água da nuvem. Já os sensores OAP 2DC e 2DP mediram altos valores de água líquida, 1,7g/m³ em 500mb e 12,5g/m³ em 550mb, respectivamente.

Na Figura 4.14 são apresentadas as DTH, onde se observou uma maior concentração de gotículas pequenas, com diâmetros entre 7,5 e 17,5µm. O LWC sofreu um intenso aumento por conta das gotículas com diâmetros acima de 22,5µm, mais acentuado nos níveis de 500 e 550mb. A diferença da concentração e LWC entre os níveis de 600 e 550/500mb se manteve ao longo do espectro das OAP, que mostram que as gotas médias e grandes mantiveram maior concentração e volume nos níveis mais elevados. As gotas precipitáveis apresentaram a maior coeficiente angular no nível mais alto, enquanto que na base da nuvem, houve um discreto

aumento da quantidade e volume dos hidrometeoros com diâmetro em torno de 7mm, indicando a ocorrência de precipitação. O diâmetro máximo registrado para os hidrometeoros precipitáveis foi o maior de todas as estações, 12mm. A Figura 4.15 mostra a trajetória do vôo, aparentemente com medidas tomadas em regiões ligeiramente distintas da nuvem.

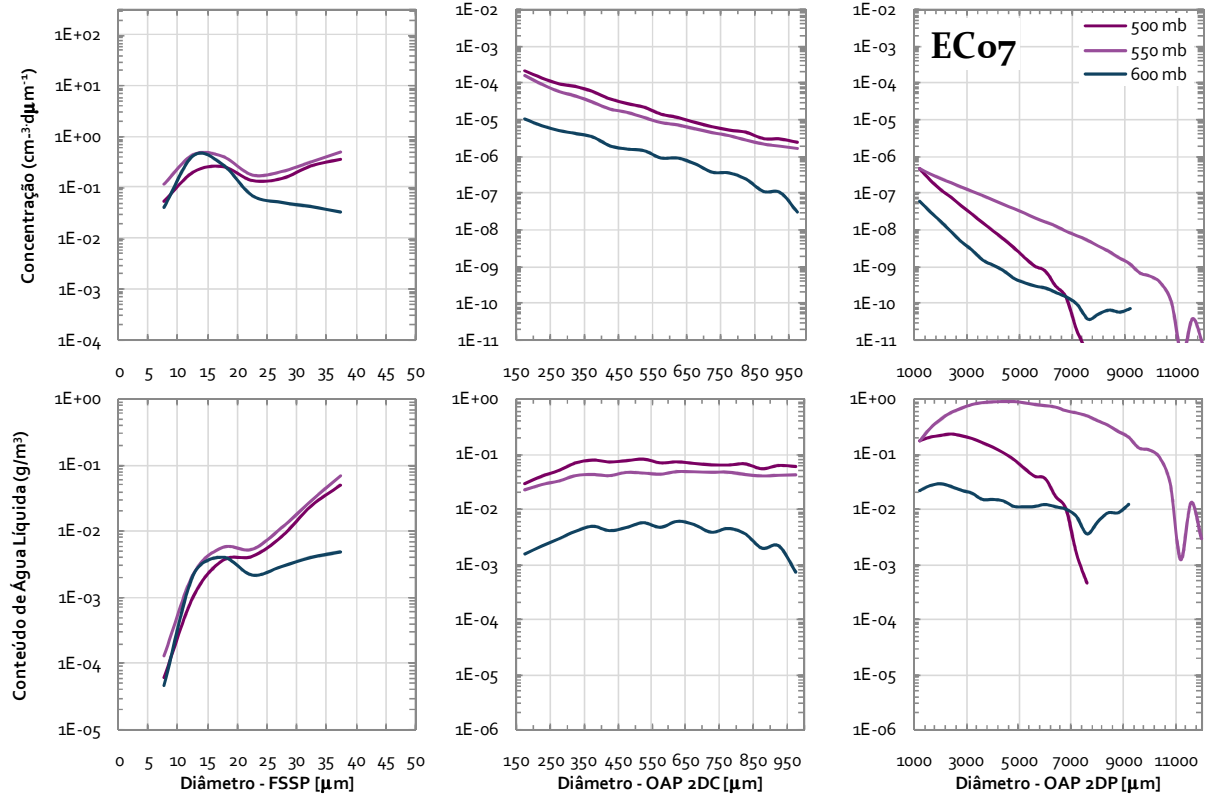


Figura 4.14: Distribuição de tamanho de gotículas e gotas, e distribuição de conteúdo de água líquida por tamanho, obtidas com os sensores FSSP, 2DC e 2DP em os diversos níveis de pressão para o caso da Estação chuvosa, caso ECo7, de 21/02/1999 das 19:45 às 20:49Z.

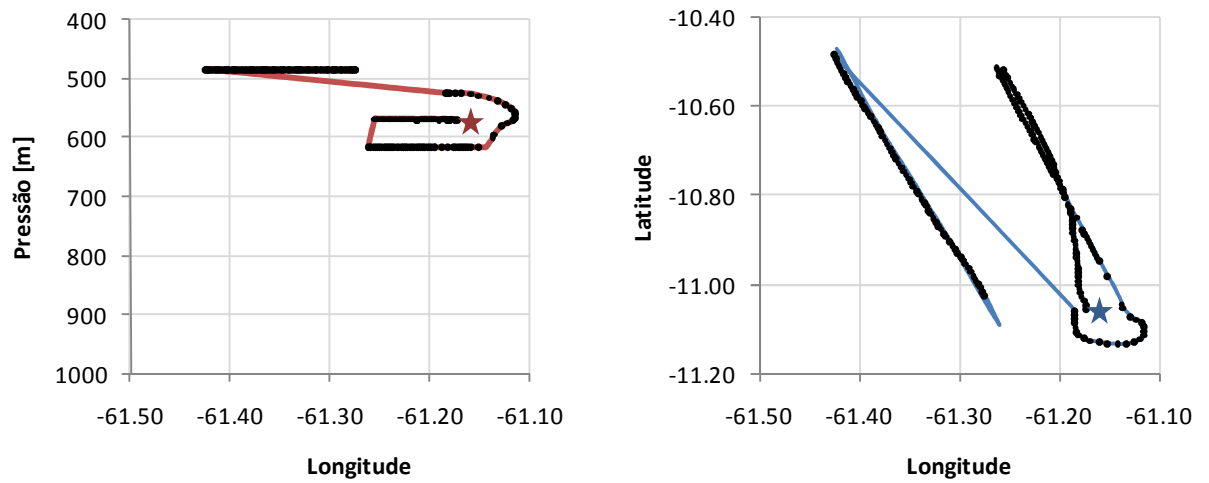


Figura 4.15: Trajetória do voo correspondente ao caso EC07. À esquerda, Altitude versus Longitude e à direita, Latitude versus Longitude. A linha contínua representa o percurso realizado pelo avião e os pontos, as coordenadas onde foram tomadas as medidas utilizadas nas distribuições. A estrela representa o início da trajetória.

4.2 Estação Seca

- Pouco Poluído sobre Região de Floresta

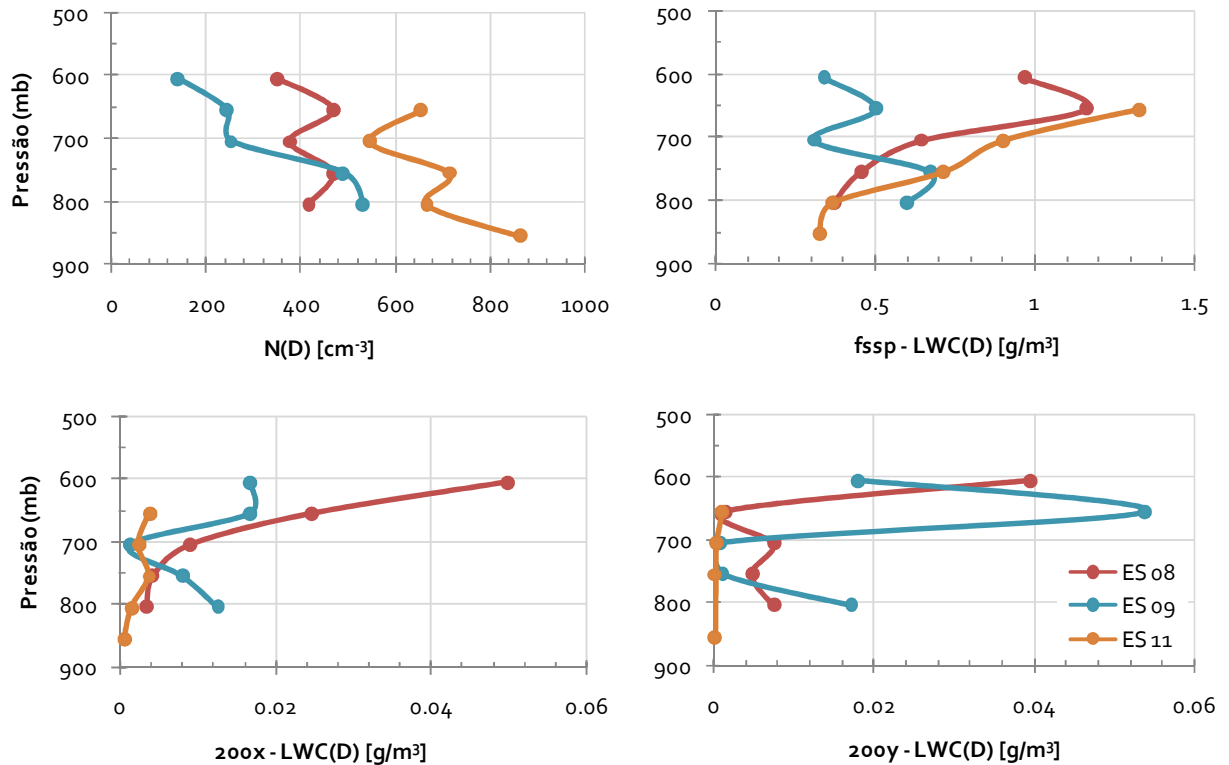


Figura 4.16: Perfis verticais utilizados para caracterizar a Estação Seca: (a) número total de gotículas medido pela FSSP, (b), (c) e (d) conteúdo de água líquida proveniente dos sensores FSSP, 200x e 200y, respectivamente.

Os quatro gráficos da Figura 4.16 apresentam os perfis verticais da concentração total de gotículas e LWC, dos casos classificados como Pouco Poluído sobre Cobertura de Floresta (PPF), durante a Estação Seca. O gráfico (a) apresenta o número total de gotículas medido pela FSSP, já os gráficos (b), (c) e (d) apresentam o conteúdo de água líquida proveniente dos sensores FSSP, OAP-200x e OAP-200y, respectivamente.

Os casos ES08 e ES09 foram os que apresentaram a maior fração do conteúdo de água líquida total proveniente de gotas médias grandes e precipitáveis (4 e 6%, respectivamente) não somente da categoria Pouco Poluído sobre Floresta, mas como de toda a Estação Seca. Estes dois casos também apresentaram os maiores diâmetros de gotas precipitáveis observados durante a Estação Seca, 3,8 e 3,2mm, respectivamente.

A nuvem representada na Figura 4.16 pelo caso ES08 (curva vermelha, Figura 4.16) foi amostrada em situação convectiva sobre área de floresta, sem poluição, entre os níveis de 800 (15,9°C) e 600mb (-0,3°C). Os registros de vôo informaram correntes ascendentes entre 2,5 e 5m/s e precipitação em 3000m (entre 750 e 700mb). A concentração de gotículas apresentou aumento seguido de diminuição em duas camadas ao longo da vertical, entre 800 e 700mb (8,2°C) e entre 700 e 600mb, que podem ser explicados pela presença da precipitação informada nos registros de vôo. O conteúdo de água líquida proveniente de gotículas (96%) aumentou com a altitude até o nível de 650mb (4,0°C), como deveria ocorrer na presença de correntes ascendentes (Como visto na Equação 1.26), chegando a 1,16g/m³, a partir de onde começou a decair. O LWC proveniente das gotas médias aumentou continuamente atingindo o valor máximo da categoria PPF no topo das medições, em 600mb, com ~ 0,05g/m³. Já no caso das gotas grandes e precipitáveis, o valor máximo observado foi de ~ 0,04g/m³, também no topo.

A Figura 4.17 mostrou gotículas com maior concentração nas proximidades da base da nuvem. Observou-se que o crescimento das gotículas com a altura teve uma predominância do processo de condensação. Em níveis mais altos, acima de 650mb, percebeu-se o aparecimento de um segundo máximo, 32,5µm, devido à CC, já que existiam gotículas maiores que 20µm. A distribuição de gotas médias apresentou a segunda moda, de CC, em 170µm, a menos do nível de 600mb. A presença desta segunda moda em todos os níveis exceto em 600mb é um indicativo que, neste nível, o crescimento por CC teve, realmente, início quando as gotículas atingiram 32,5µm de diâmetro. As gotas precipitáveis estiveram mais concentradas no topo e apresentaram evidências de quebra, como sugerem as oscilações de concentração observadas no espectro da OAP-200y. O diâmetro máximo registrado foi de 3,8mm, correspondendo ao maior valor observado durante a Estação Seca. O conteúdo de água proveniente do nível do topo (600mb) exibiu tendência de queda, enquanto que os níveis

abaixo apresentaram tendência de aumento. A Figura 4.18 mostra uma trajetória sem forma definida sendo que as amostragens foram tomadas em um mesmo sistema, como descrito pelo registro de voo, apresentado na Tabela 3.5.

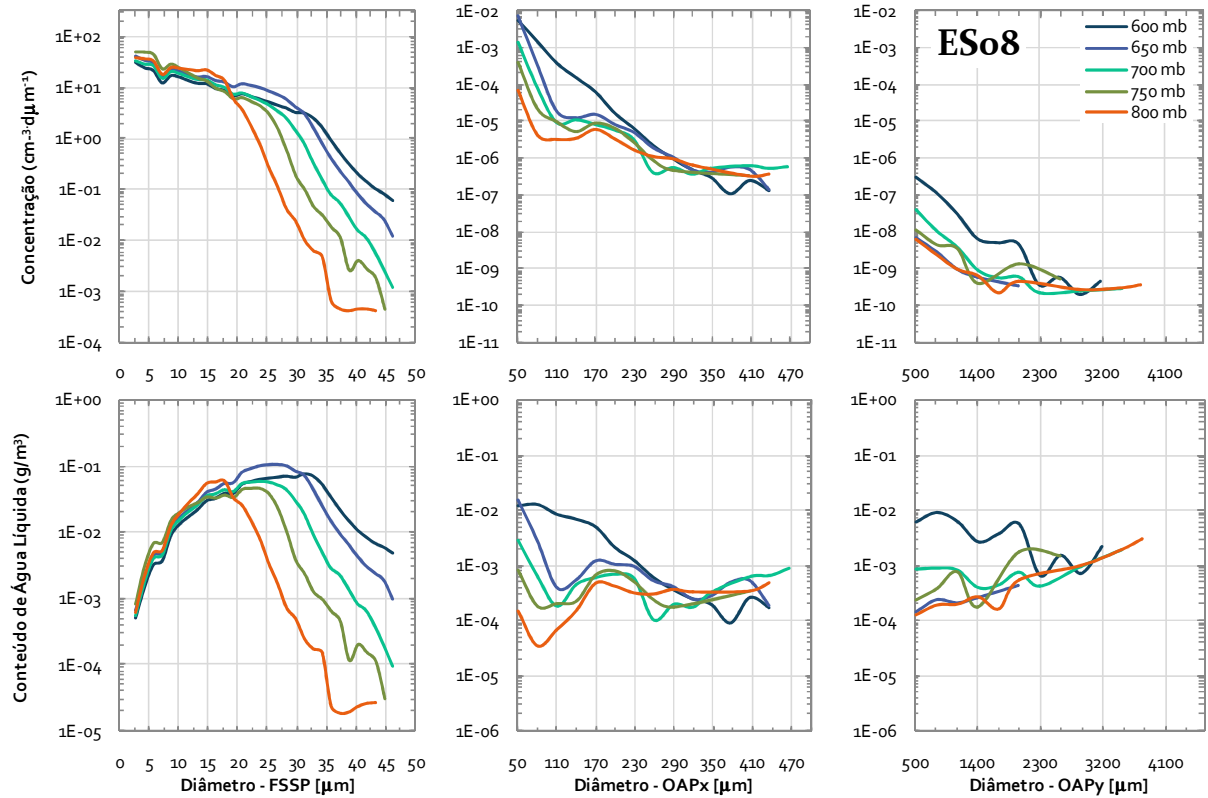


Figura 4.17: Distribuição de tamanho de gotas e gotículas, e distribuição de conteúdo de água líquida por tamanho, obtidas com os sensores FSSP, 200x e 200y em os diversos níveis de pressão para o caso da Estação Seca, caso ES08, de 05/10/2002 das 16:43 às 18:04Z.

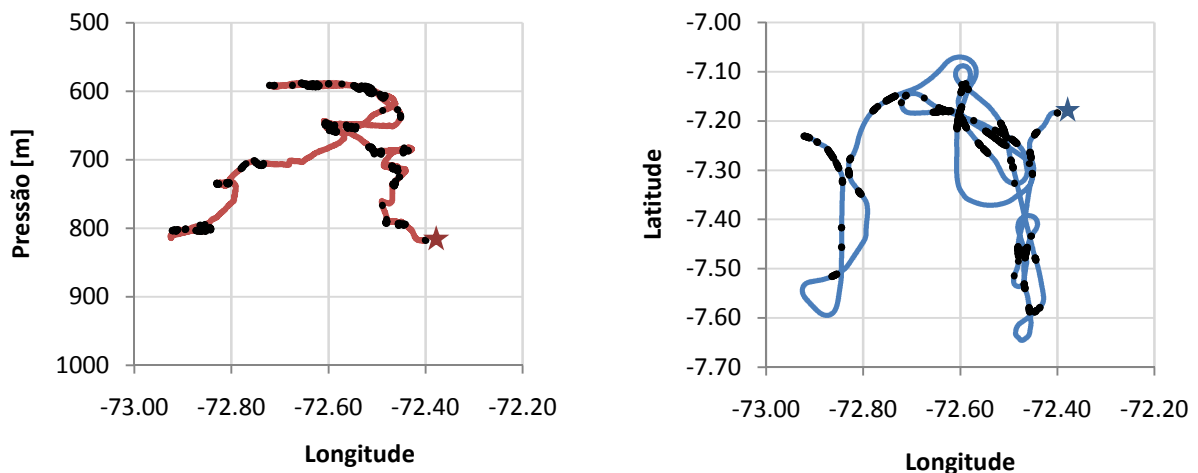


Figura 4.18: Trajetória do voo correspondente ao caso ES08. À esquerda, Altitude versus Longitude e à direita, Latitude versus Longitude. A linha contínua representa o percurso realizado pelo avião e os pontos, as coordenadas onde foram tomadas as medidas utilizadas nas distribuições. A estrela representa o início da trajetória.

O caso ES09 (curva azul, Figura 4.16) apresentou medidas tomadas na mesma região do caso ES08, também com presença de precipitação em 3000m (entre 750 e 700mb). As medidas foram tomadas entre os níveis de 800 (16,1°C) e 600mb (0,2°C), sendo que seu perfil mostrou uma nuvem com uma diminuição da concentração com a altitude, algumas gotas médias e também gotas de chuva na base e topo da amostragem. Tal distribuição vertical de gotas e gotículas sugere que o processo de crescimento por CC estava ativo na porção superior da nuvem, onde foi observado o maior conteúdo de água proveniente de gotas de chuva. Os três sensores, entre os níveis de 750 (13,8°C) a 650mb (3,9°C), exibiram valores baixos de conteúdo de água líquida, o que poderia ser justificado com os relatos de precipitação nesta altitude. A precipitação de algumas das gotas de chuva observadas na base da nuvem, após atingirem tamanho suficiente foram, possivelmente, responsáveis pela coleta das gotículas na camada intermediária de 700mb (9,7°C). O máximo conteúdo de água foi obtido pela FSSP em 750mb, $0,67\text{g/m}^3$, como consequência da predominância do processo de difusão de vapor, uma vez que se nota algumas evidências da CC entre ~ 30 a $45\mu\text{m}$ para os níveis acima de 750mb. O volume de água registrado pela OAP-200y na porção superior da

nuvem foi o maior do espectro dentre os três casos, com $\sim 0,05\text{g/m}^3$, entretanto, muito baixo se comparado com os valores obtidos durante a Estação Chuvosa, com máximo de $2,0\text{g/m}^3$ no EC06 e $12,5\text{g/m}^3$ no caso EC07.

Nota-se que a concentração de gotículas, Figura 4.19, sofreu um decaimento com o aumento de tamanho, as gotículas maiores que $22,75\mu\text{m}$ apresentaram um decréscimo de concentração mais acentuado nos níveis médios de 800 a 700mb. As gotículas com diâmetro de $22,75$ apresentaram o maior conteúdo de água líquida observada em 750mb. As distribuições em 800 e 750mb exibiram um comportamento diferente das distribuições entre 650 e 600mb, pois as gotículas maiores exibiram uma maior concentração. O nível de 700mb se mostrou intermediário entre as camadas de 800/750 e 650/600mb, pois sua concentração de gotículas pequenas já teria sido reduzida, como no nível inferior, mas as gotículas grandes ($> 27,5\mu\text{m}$) não haviam crescido como no nível superior. Este efeito indica que o processo principal de crescimento é a condensação, porém tendo a CC em diâmetros maiores, pois houve uma redução do número de gotículas.

As gotas de tamanho médio, acima de $170\mu\text{m}$, aparentaram estar relativamente precipitando, pois a partir deste diâmetro, elas migraram para o nível mais baixo, de 800mb, sendo que os tamanhos menores estiveram presentes em maior concentração nos níveis mais altos. As gotas que efetivamente deveriam estar precipitando, acima de 1mm, foram observadas, em grande maioria, nos níveis altos, sofrendo, aparentemente, os processos de quebra ou CC. A distribuição de gotas médias, em especial as diversas modas observadas acima de $170\mu\text{m}$, indicam que este hidrometeoro estava coletando as gotículas de nuvem menores, daí a redução da sua concentração e aumento das gotas médias e grandes. O maior diâmetro observado na classe de gotas precipitáveis foi de 3,2mm.

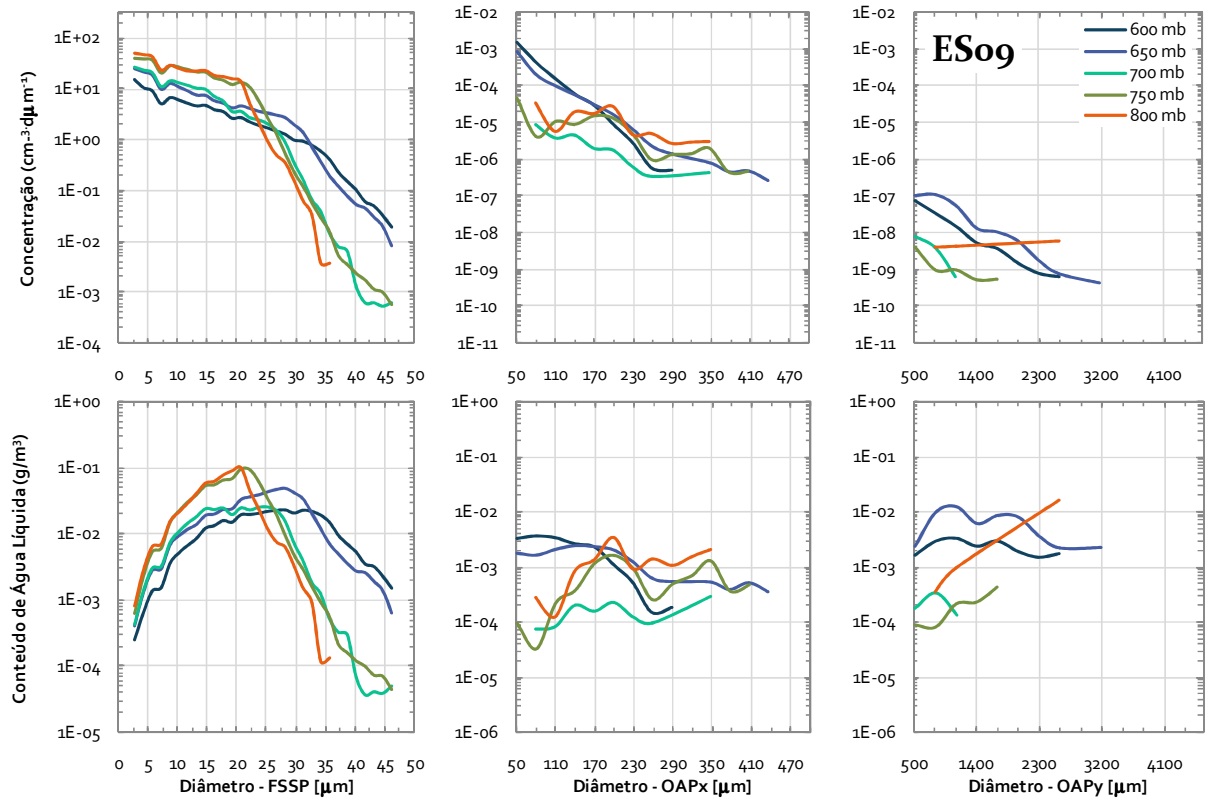


Figura 4.19: Distribuição de tamanho de gotas e gotículas, e distribuição de conteúdo de água líquida por tamanho, obtidas com os sensores FSSP, 200x e 200y em os diversos níveis de pressão para o caso da Estação Seca, caso ES09, de 05/10/2002 das 19:57 às 20:31Z.

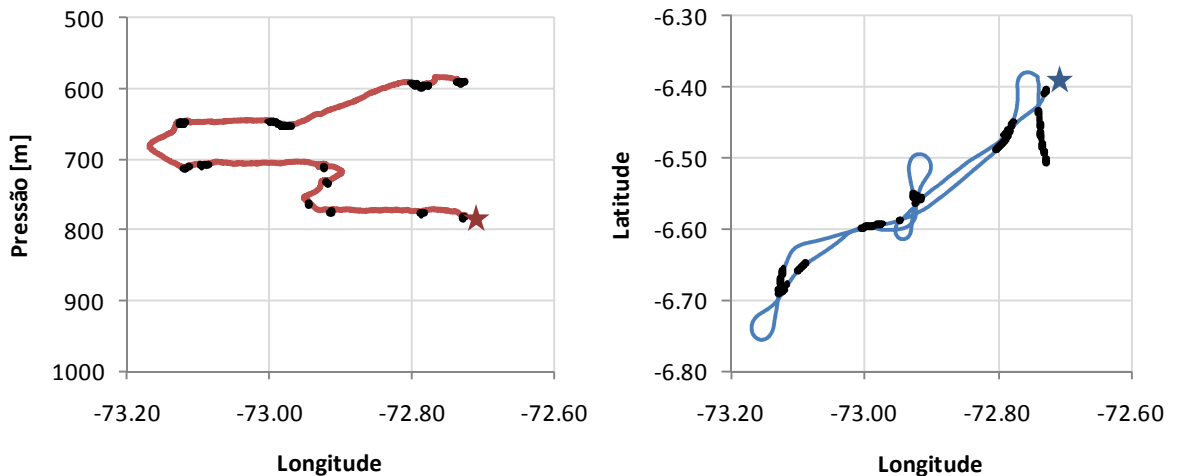


Figura 4.20: Trajetória do voo correspondente ao caso ES09. À esquerda, Altitude versus Longitude e à direita, Latitude versus Longitude. A linha contínua representa o percurso realizado pelo avião e os pontos, as coordenadas onde foram tomadas as medidas utilizadas nas distribuições. A estrela representa o início da trajetória.

O caso ES11 (curva amarela, Figura 4.16) apresentou medidas entre 850 (19,3°C) e 650mb (5,2°C). A concentração total de gotículas foi consideravelmente alto, mais de 864cm^{-3} na região da base da nuvem, apresentando algumas oscilações com a altura, sendo o valor mínimo de 546cm^{-3} em 700mb (15,8°C). O perfil vertical deste caso se diferenciou dos demais, pois esta nuvem apresentou uma grande quantidade de gotículas de nuvem e conteúdo de água desprezível para diâmetros acima de $50\mu\text{m}$. Deste modo, praticamente toda água de nuvem esteve distribuída em gotículas que cresciam basicamente por difusão de vapor, indicando talvez o início do desenvolvimento da nuvem, uma vez que a concentração de gotas médias, $170\mu\text{m}$, encontrava-se baixa, o que indicaria o início da CC para um ambiente com muito CCN. O perfil vertical do conteúdo de água da FSSP mostra que essas gotículas cresciam continuamente com a altura, até o topo da nuvem, indicando que o processo de CC não se tornou predominante como nos casos anteriores.

A Figura 4.21 mostra as maiores concentrações de gotículas pequenas da categoria PPF. O desenvolvimento por difusão também foi bem marcado e a moda de CC aparentemente ocorreu entre gotas de $37,25\mu\text{m}$ de diâmetro nos níveis de 850 a 750mb, e em $170\mu\text{m}$, como mostra a OAP 200x. O conteúdo de água líquida de gotas médias, grandes e precipitáveis foi o menor observado na categoria, sendo que as gotas precipitáveis exibiram uma tendência de aumento do conteúdo de água líquida. A Figura 4.22 exibe a trajetória realizada durante a tomada dos dados. As amostragens foram realizadas em regiões ligeiramente distintas, porém muito próximas uma da outra.

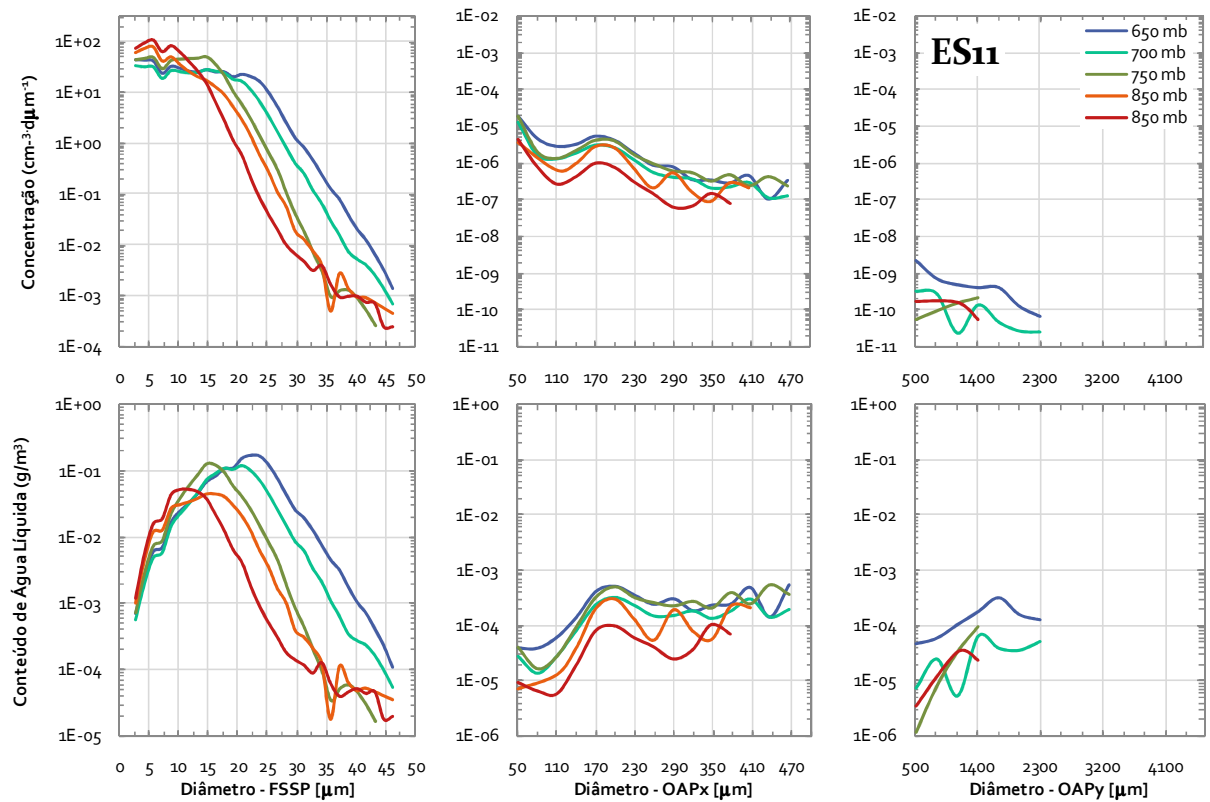


Figura 4.21: Distribuição de tamanho de gotas e gotículas, e distribuição de conteúdo de água líquida por tamanho, obtidas com os sensores FSSP, 200x e 200y em os diversos níveis de pressão para o caso da Estação Seca, caso ES11, de 08/10/2002 das 19:20 às 20:10Z.

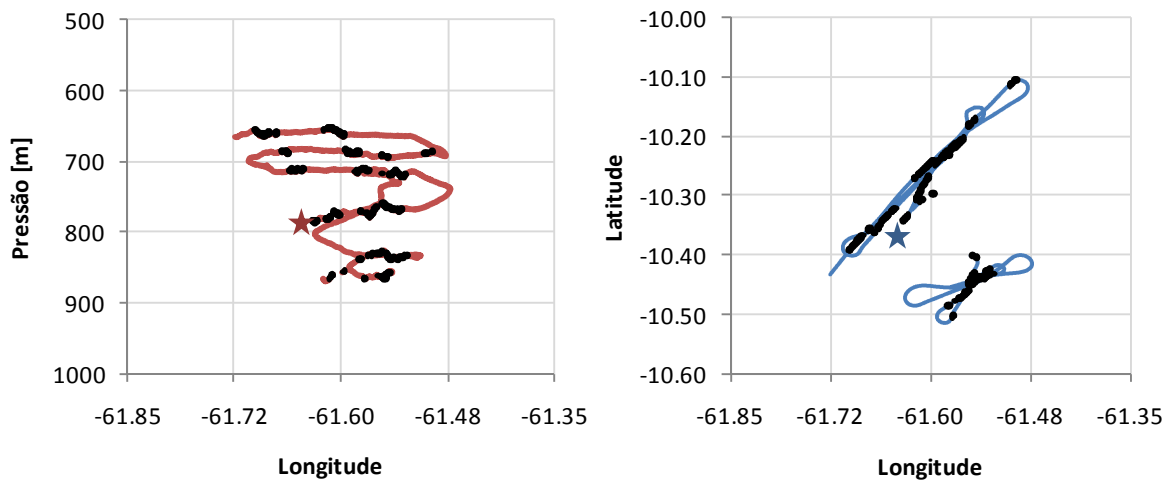


Figura 4.22: Trajetória do vôo correspondente ao caso ES11. À esquerda, Altitude versus Longitude e à direita, Latitude versus Longitude. A linha contínua representa o percurso realizado pelo avião e os pontos, as coordenadas onde foram tomadas as medidas utilizadas nas distribuições. A estrela representa o início da trajetória.

- **Moderadamente Poluído**

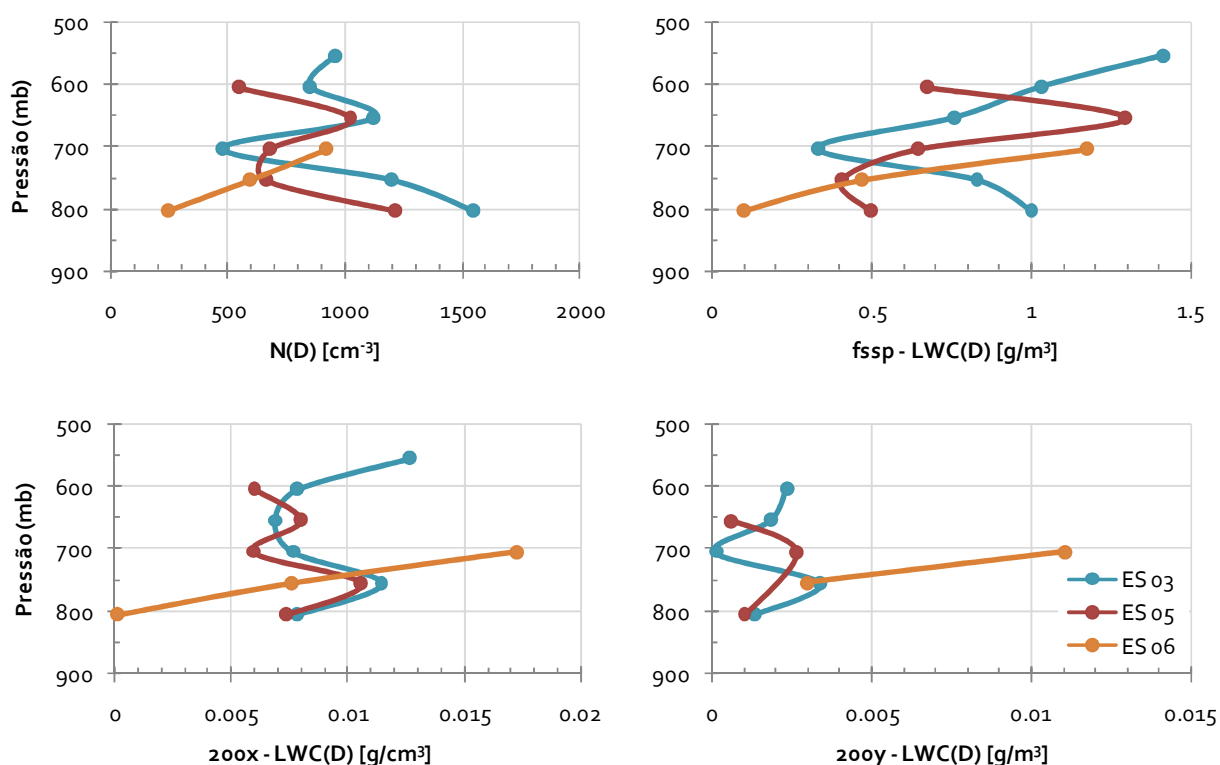


Figura 4.23: Perfis verticais utilizados para caracterizar a Estação Seca: (a) número total de gotículas medido pela FSSP, (b), (c) e (d) conteúdo de água líquida proveniente dos sensores FSSP, 200x e 200y, respectivamente.

Os painéis da Figura 4.23 apresentam o perfil vertical da concentração de gotículas e o LWC dos 3 sensores, para os três casos identificados como Moderadamente Poluídos durante a Estação Seca. Dentre os casos, dois deles, ES03 e ES05, exibiram um perfil bastante semelhante ao longo da vertical.

O caso ES03 (curva azul, Figura 4.23) foi amostrado em situação de formação convectiva sobre área desmatada, em condições de poluição moderada. Durante a tomada dos dados observou-se ausência de chuva quente, fortes correntes ascendentes, granizo e intensa atividade elétrica. As medições foram realizadas entre os níveis de 800 (14,2°C) e 550mb (-1,3°C). O perfil vertical apontou um decréscimo da concentração em dois trechos, entre 800 e 700mb (8,8°C), também observado no LWC, e entre 650 (3,3°C) e 600mb (-0,1°C), observado somente na concentração. Na primeira camada com decréscimo da concentração da

FSSP, entre 800 e 700mb, o conteúdo de água das gotas médias, grandes e precipitantes aumentou relativamente, atingindo um ponto de máximo em 750mb (~ 0,011 e ~ 0,0034g/m³ para as OAP200x e 200y, respectivamente), e diminuiu, sendo que o menor volume de água proveniente das gotas precipitáveis foi observado em 700mb. Entre 700 e 650mb o número de gotículas aumentou, as gotas médias diminuíram atingindo seu menor conteúdo de água líquida e o volume de água das gotas precipitáveis voltou a aumentar. Acima de 650mb o número de gotículas teve uma segunda diminuição, com o mínimo em 600mb, porém seu conteúdo de água continuou a aumentar, assim como o das gotas medias, grandes e precipitáveis.

A Figura 4.24 mostra duas camadas distintas de gotículas, como no caso ES09, onde a porção inferior da nuvem, 800/750mb, apresentou alta concentração de gotículas pequenas e a porção superior, 650/500mb, maiores concentrações de gotículas com diâmetros a partir de 17,5µm, sendo que o nível de 700mb mostrou baixos valores de concentração ao longo de todo espectro. A moda de CC mais evidente de todos os níveis de pressão foi observada em 170µm, sendo que as gotas maiores que este diâmetro exibiram tendência de aumento no conteúdo de água líquida, inclusive nos tamanhos precipitáveis, exceto pelo nível de 500mb, que não exibiu gotas com este tamanho. Nota-se que no nível de 700mb houve um pequeno aumento do número de gotículas maiores que 400µm, até 3200µm. O que poderia explicar parte da diminuição das gotículas, já que poderiam estar sendo coletadas. Além do caso ES08 da categoria Pouco Poluído sobre Floresta, o caso ES03 também apresentou o maior diâmetro de gota precipitável da Estação Seca, 3,8mm. A Figura 4.25 exhibe a trajetória realizada pelo avião durante a tomada dos dados.

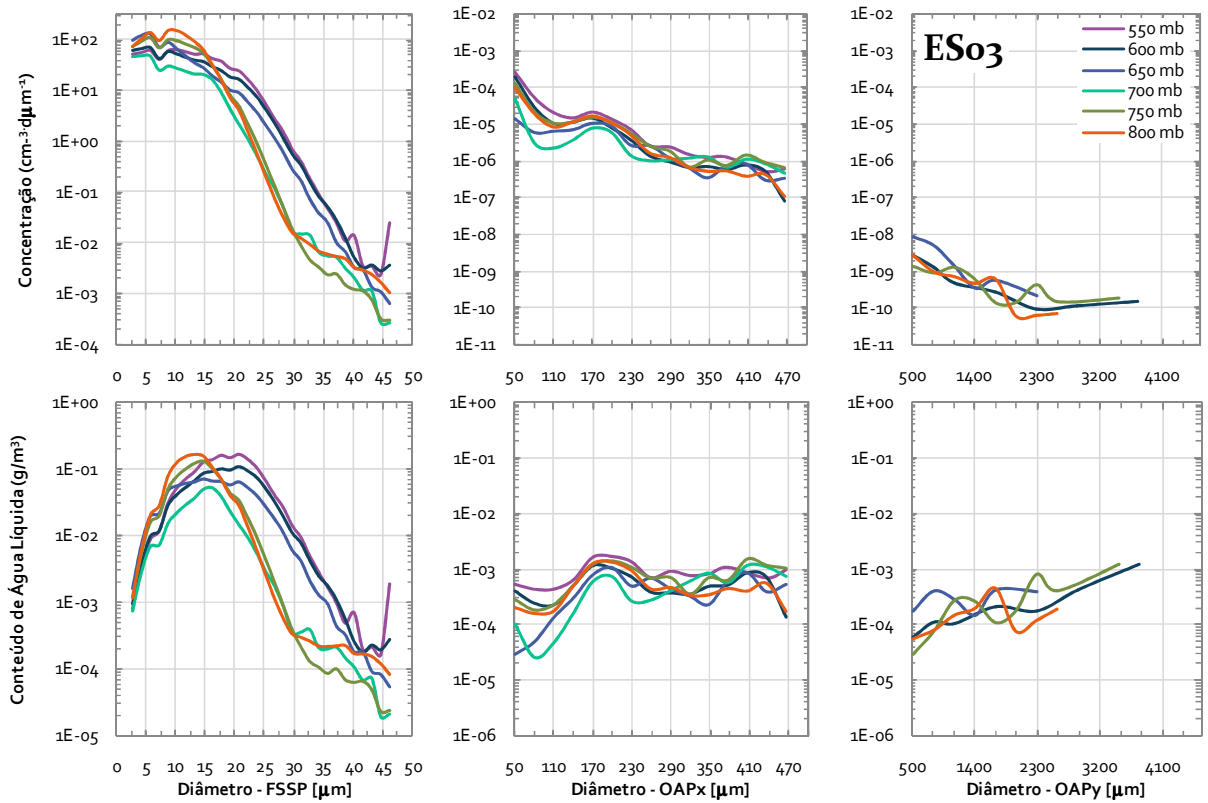


Figura 4.24: Distribuição de tamanho de gotas e gotículas, e distribuição de conteúdo de água líquida por tamanho, obtidas com os sensores FSSP, 200x e 200y em os diversos níveis de pressão para o caso da Estação Seca, caso ES03, de 28/09/2002 das 17:53 às 19:11Z.

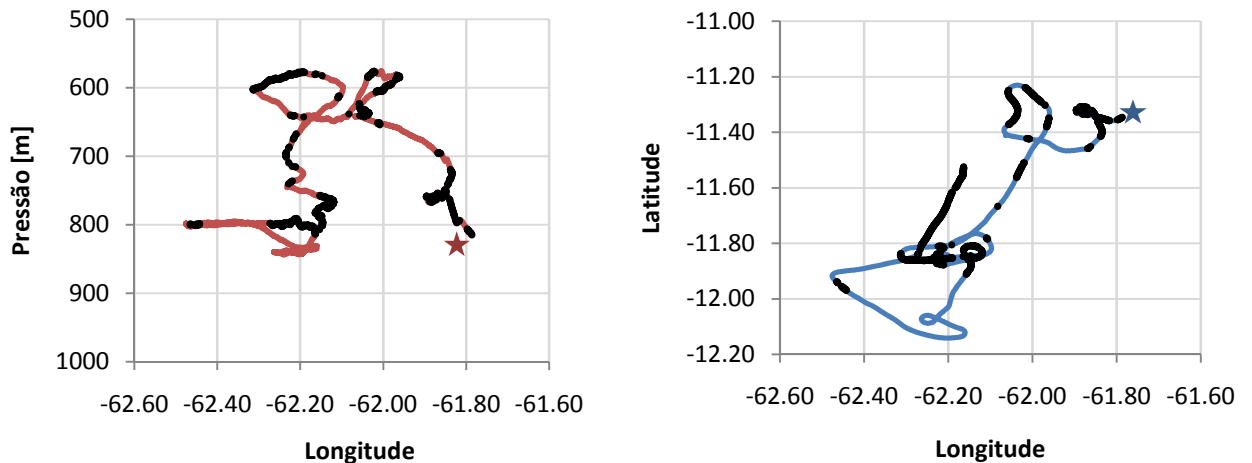


Figura 4.25: Trajetória do vôo correspondente ao caso ES03. À esquerda, Altitude versus Longitude e à direita, Latitude versus Longitude. A linha contínua representa o percurso realizado pelo avião e os pontos, as coordenadas onde foram tomadas as medidas utilizadas nas distribuições. A estrela representa o início da trajetória.

O caso ES05 (curva vermelha, Figura 4.23) apresentou medidas entre 800 (16,8°C) e 600mb (-0,04°C) realizadas numa nuvem sem precipitação. As gotículas sofreram decréscimo de concentração entre 800 e 750mb (12,4°C) e começaram a aumentar, em quantidade e volume, a partir deste nível. Nesta mesma camada, as gotas médias sofreram o processo inverso, seu conteúdo de água aumentou, chegando a 0,0105g/m³, e o conteúdo de água das gotas de chuva cresceu continuamente com a altitude. O nível de 700mb apresentou o volume mínimo de água proveniente das gotas médias e o máximo das gotas de chuva (0,0026g/m³), enquanto que as gotículas ainda apresentavam tendência de crescimento neste nível, chegando ao valor máximo em 650mb (4,6°C) com 1,3g/m³.

A Figura 4.26 mostra que na base da nuvem as gotículas recém formadas apareceram com concentração bem maior que a dos outros níveis, 140 e 60cm⁻³µm⁻¹, com diâmetro médio de 5,75µm, em 800 e 750mb, respectivamente. No entanto, o crescimento destas gotículas não ocorreu neste nível, uma vez que a concentração dos diâmetros acima de 12,5µm diminuiu consideravelmente. As gotículas cresceram por difusão de vapor conforme sua ascensão vertical e o processo de CC é aparente em 140µm no nível de 600mb, e em 170µm nos níveis mais baixos. Somente foram registradas gotas de chuva nos níveis de 800, 700 e 650mb, tal que seu conteúdo de água líquida apresentou tendência de aumento nos níveis de 800 e 700mb. A Figura 4.27 mostra que somente no início da trajetória foram realizadas medidas na mesma região da nuvem. No restante, os dados foram tomados numa rota linear.

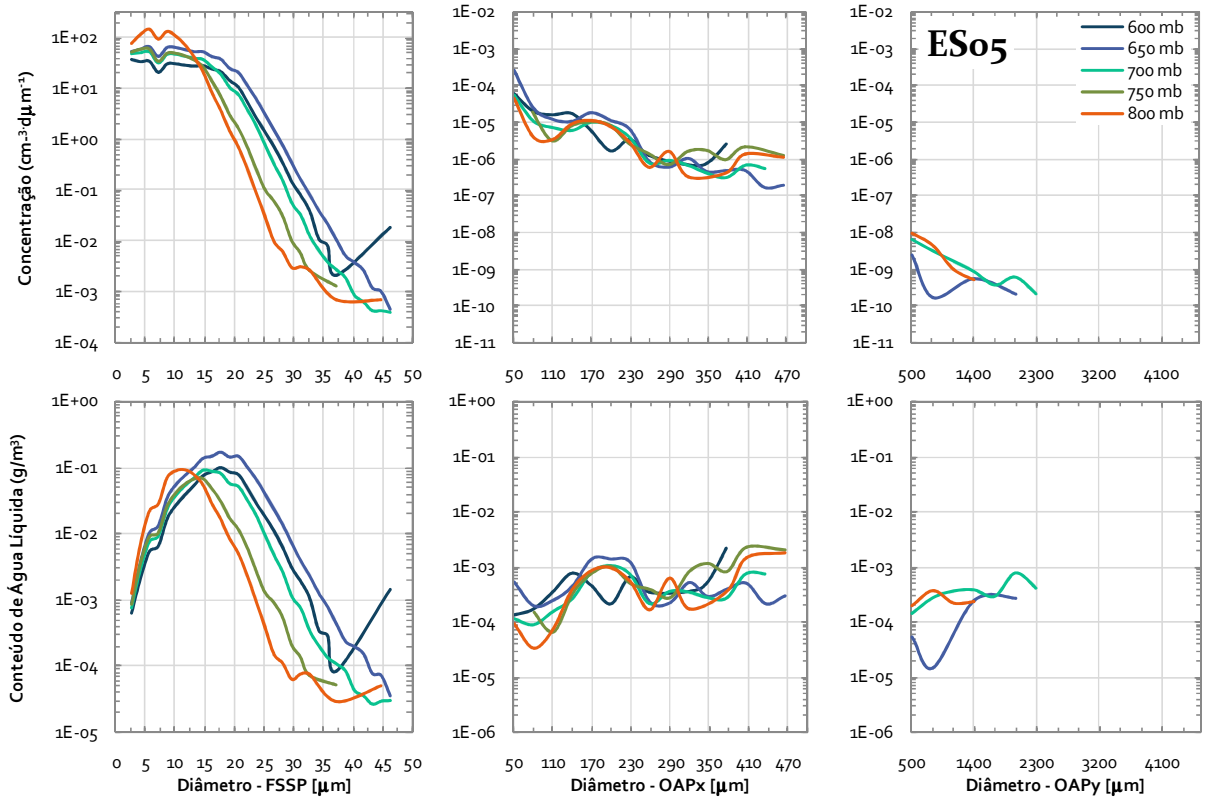


Figura 4.26: Distribuição de tamanho de gotas e gotículas, e distribuição de conteúdo de água líquida por tamanho, obtidas com os sensores FSSP, 200x e 200y em os diversos níveis de pressão para o caso da Estação Seca, caso ES05, de 04/10/2002 das 15:17 às 16:10Z.

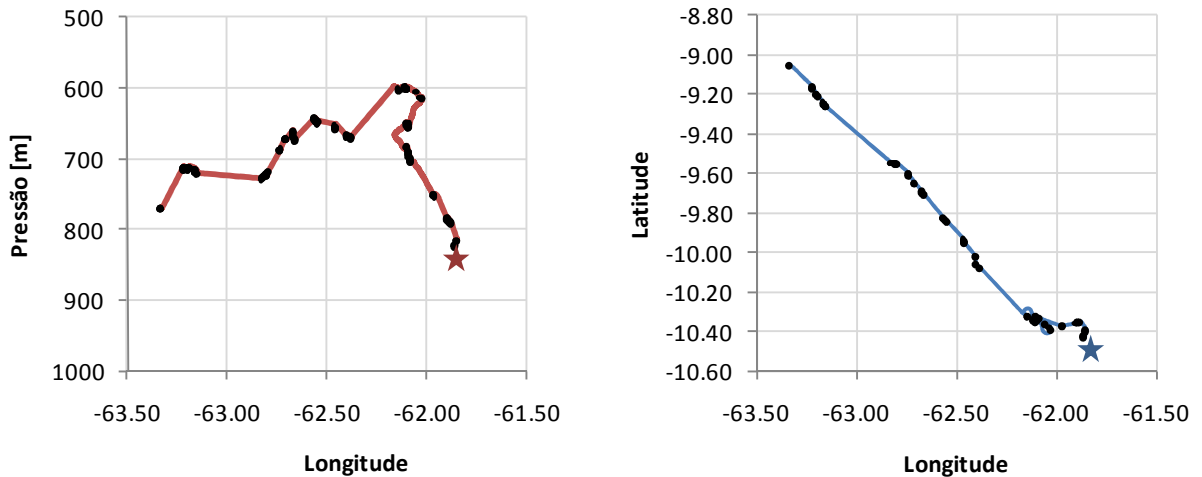


Figura 4.27: Trajetória do vôo correspondente ao caso ES05. À esquerda, Altitude versus Longitude e à direita, Latitude versus Longitude. A linha contínua representa o percurso realizado pelo avião e os pontos, as coordenadas onde foram tomadas as medidas utilizadas nas distribuições. A estrela representa o início da trajetória.

O caso ES06 não contou com imagens de satélite para identificação da situação atmosférica da região. As medidas foram realizadas sobre área desmatada com poluição leve à moderada, entre os níveis de 800 (15,4°C) e 700mb (11,5°C). O caso é representado pela curva amarela (Figura 4.23) que indicou um perfil um pouco diferente dos casos ES03 e ES05, pois em todos os sensores, FSSP, OAP200x e OAP200y, houve um aumento constante do conteúdo de água com a altitude.

Apesar da pouca amostragem, observa-se o mesmo comportamento dos demais vãos desta categoria, ou seja, processo de crescimento por condensação ativo para gotículas pequenas e a CC em torno de 170 μm .

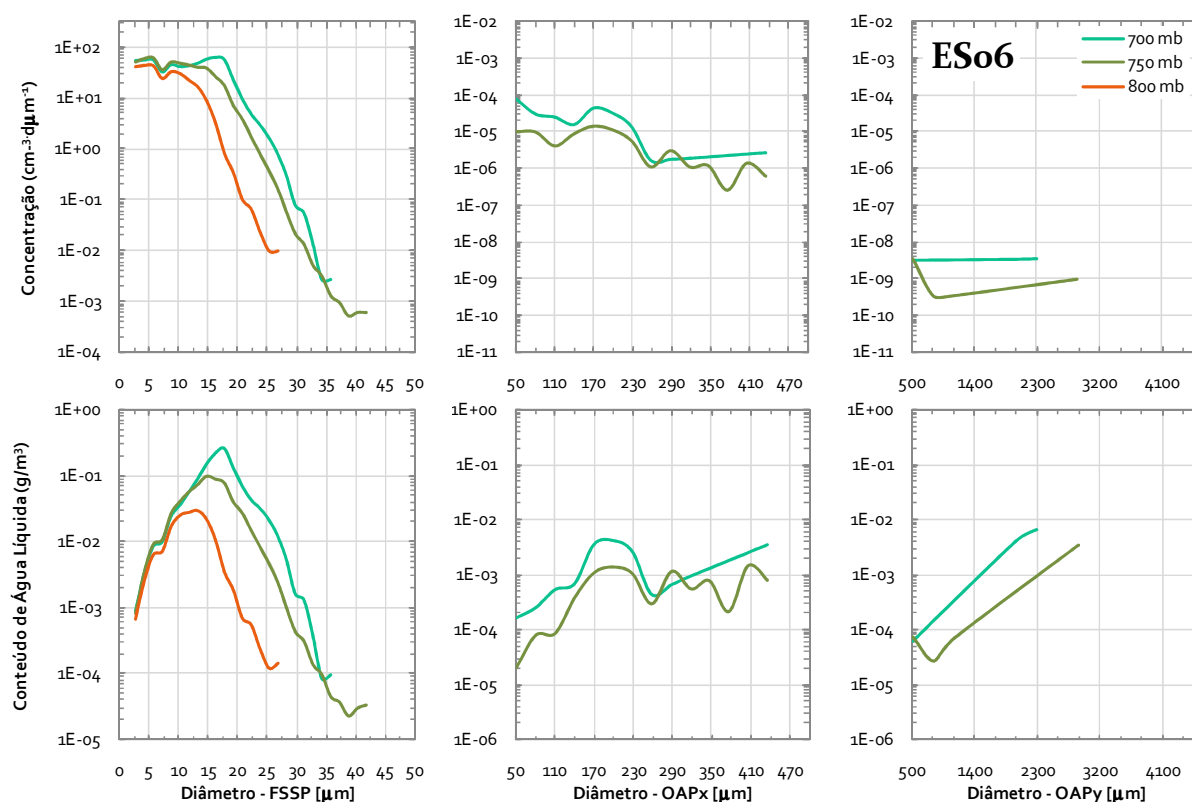


Figura 4.28: Distribuição de tamanho de gotas e gotículas, e distribuição de conteúdo de água líquida por tamanho, obtidas com os sensores FSSP, 200x e 200y em os diversos níveis de pressão para o caso da Estação Seca, caso ES06, de 04/10/2002 das 18:18 às 18:28Z.

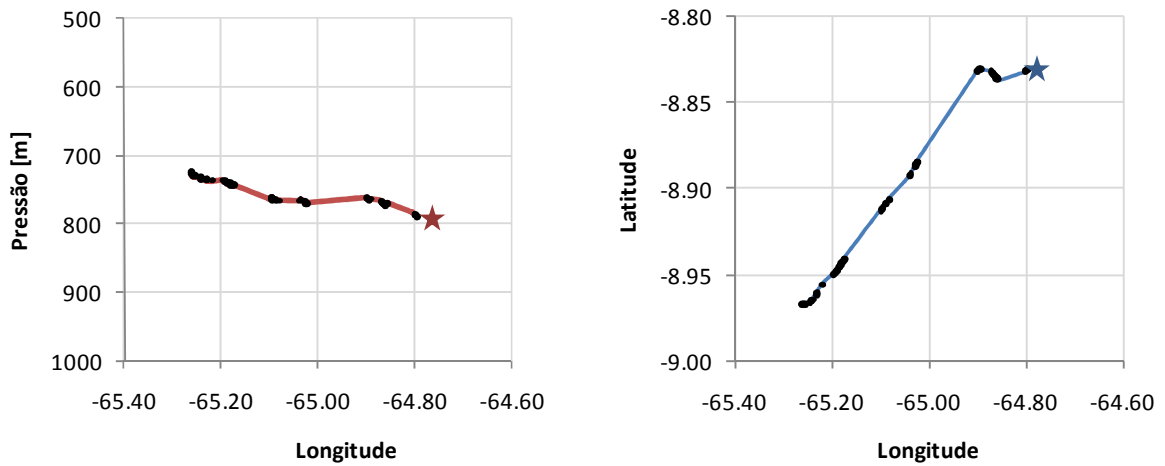


Figura 4.29: : Trajetória do vôo correspondente ao caso ES06. À esquerda, Altitude versus Longitude e à direita, Latitude versus Longitude. A linha contínua representa o percurso realizado pelo avião e os pontos, as coordenadas onde foram tomadas as medidas utilizadas nas distribuições. A estrela representa o início da trajetória.

- **Intensamente Poluído**

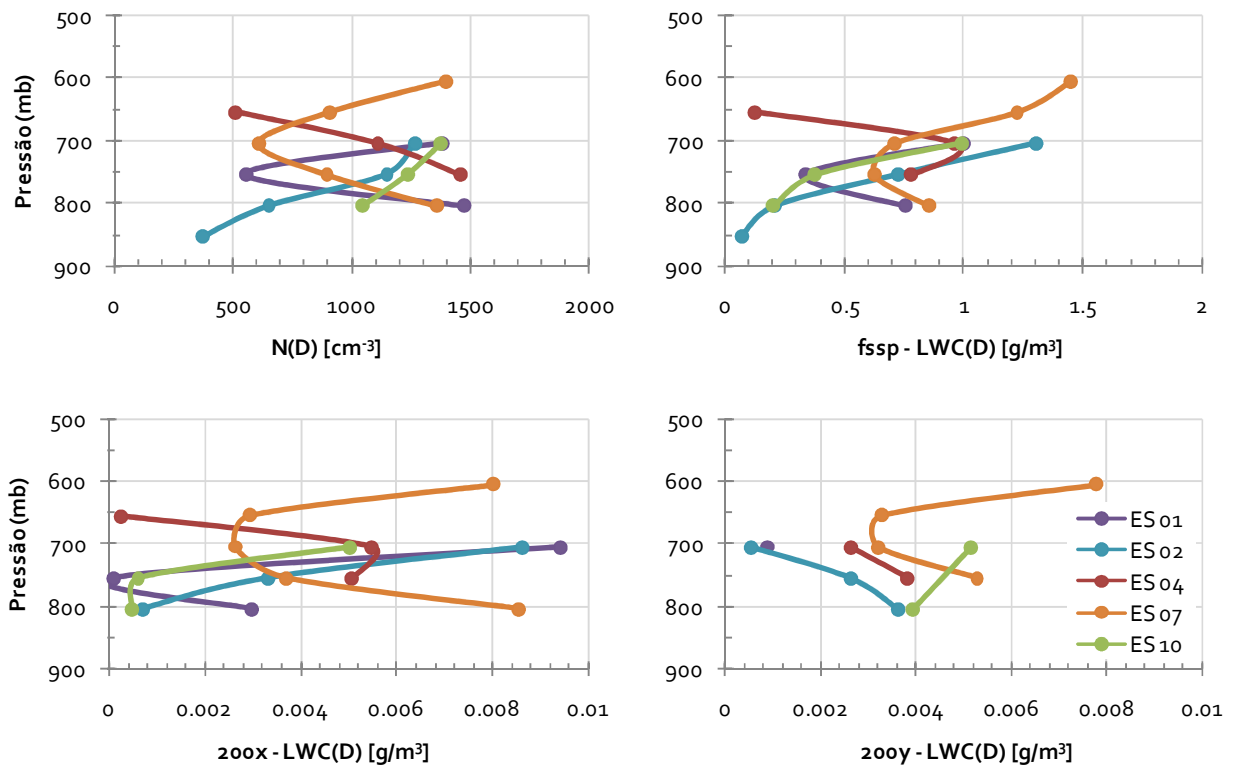


Figura 4.30: Perfis verticais utilizados para caracterizar a Estação Seca: (a) número total de gotículas medido pela FSSP, (b), (c) e (d) conteúdo de água líquida proveniente dos sensores FSSP, 200x e 200y, respectivamente.

A Figura 4.30 apresenta o perfil vertical dos hidrometeoros, como na Figura 4.16, para os cinco casos identificados como Intensamente Poluídos, que foram observados durante a Estação Seca. A complexidade da situação atmosférica desta categoria fica bastante evidente. Os perfis verticais que mais se assemelham, tanto para FSSP quanto para OAP-200x, são dos casos ES01 (curva roxa) e ES07 (curva amarela), e os casos ES02 (curva azul) e ES10 (curva verde). No caso da OAP-200y não foi possível identificar nenhuma semelhança entre quaisquer dos casos.

O caso ES01 (curva roxa, Figura 4.30) apresentou medidas entre 800 (16,7°C) e 700mb (9,1°C) com relatos de fumaça alimentando nuvens convectivas. Este caso apresentou grande quantidade de gotículas na base da nuvem ($1477,7 \text{ cm}^{-3}$) e conforme o aumento da altitude sofreu uma acentuada diminuição dessa concentração ($556,0 \text{ cm}^{-3}$), chegando ao mínimo em 750mb (10,3°C), sendo que depois deste ponto voltou a aumentar ($1382,5 \text{ cm}^{-3}$). O conteúdo de água líquida da FSSP seguiu este mesmo comportamento, com $0,75 \text{ g/m}^3$ na base e $1,0 \text{ g/m}^3$ no topo. O LWC registrado pela OAP-200x também exibiu uma diminuição seguida de aumento com $0,0029 \text{ g/m}^3$ na base e $0,0094 \text{ g/m}^3$ no topo.

A Figura 4.31 mostra uma DTH com alta concentração de gotículas pequenas ($180 \text{ cm}^{-3} \mu\text{m}^{-1}$ em $8,75 \mu\text{m}$) sendo que as gotículas com diâmetro acima de $17,75 \mu\text{m}$ estiveram mais concentradas em níveis mais altos. Os processos de CC puderam ser identificados a partir $29,75 \mu\text{m}$ e novamente em $170 \mu\text{m}$. Entre as gotas médias houve uma tendência de aumento do LWC, e nada pôde ser constatado para as gotas grandes e precipitáveis. A Figura 4.32 mostra que a caracterização foi feita em uma única região da nuvem, em ascensão vertical.

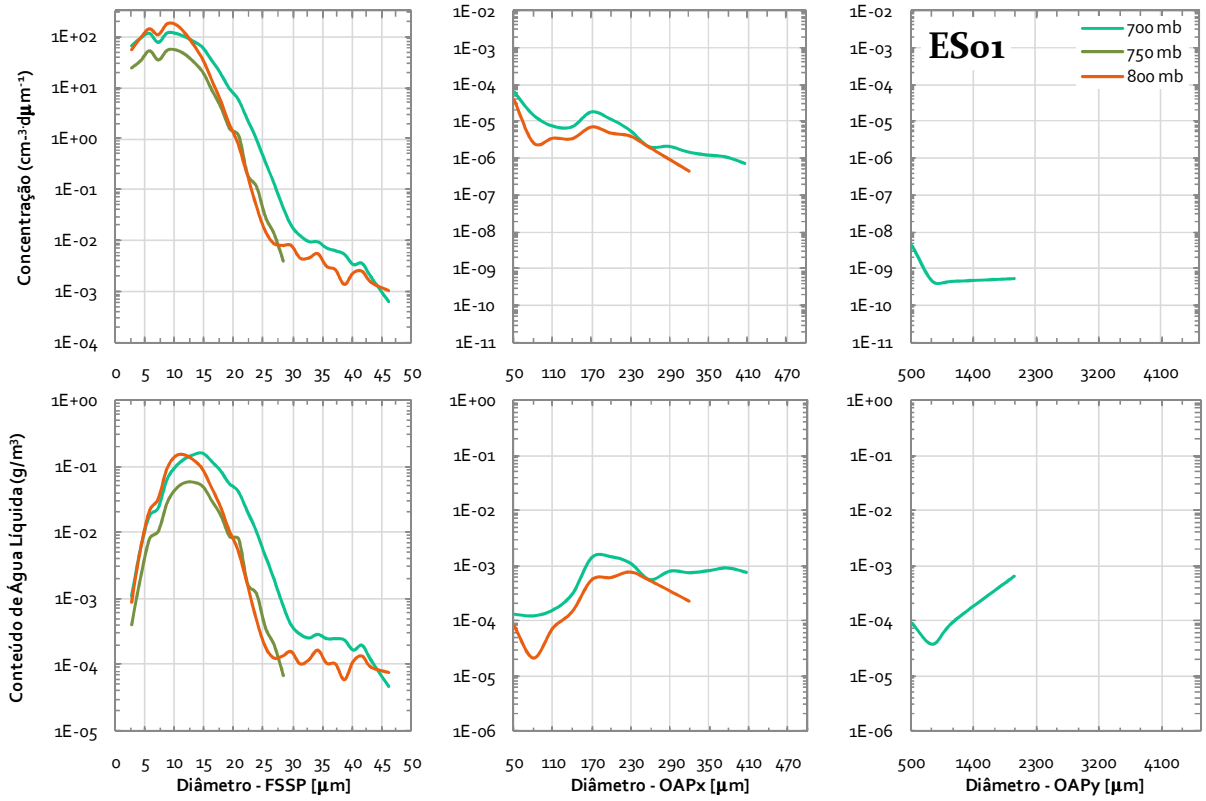


Figura 4.31: Distribuição de tamanho de gotas e gotículas, e distribuição de conteúdo de água líquida por tamanho, obtidas com os sensores FSSP, 200x e 200y em os diversos níveis de pressão para o caso da Estação Seca, caso ES01, de 23/09/2002 das 19:07 às 19:18Z.

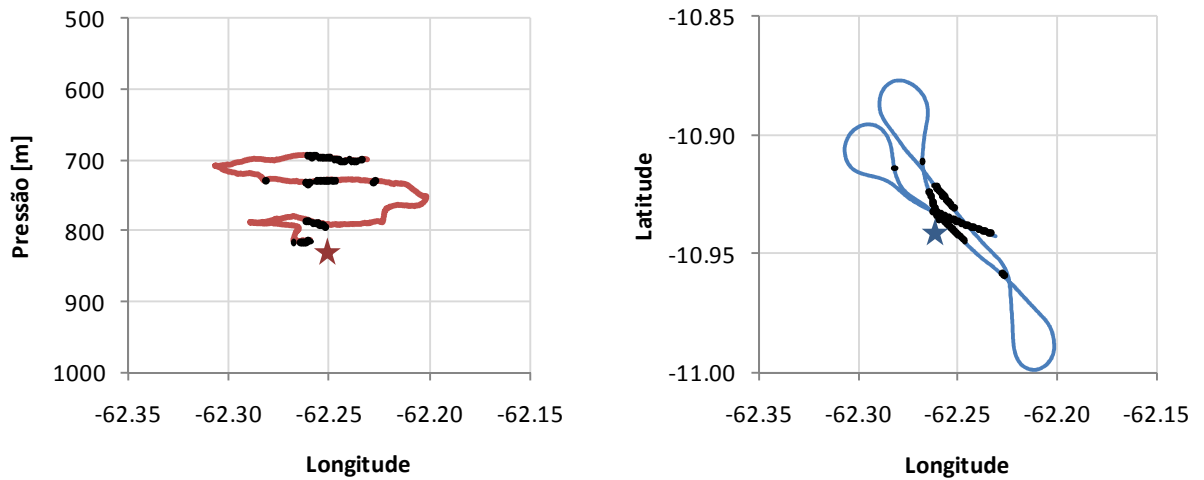


Figura 4.32: Trajetória do vôo correspondente ao caso ES01. À esquerda, Altitude versus Longitude e à direita, Latitude versus Longitude. A linha contínua representa o percurso realizado pelo avião e os pontos, as coordenadas onde foram tomadas as medidas utilizadas nas distribuições. A estrela representa o início da trajetória.

O caso ES02 (curva azul, Figura 4.30) constituiu uma nuvem com forte eco no radar, intenso desenvolvimento vertical e fortes correntes ascendentes, entre 5 e 10m/s, e descendentes, 8,5m/s, conforme registrado no livro do vôo. As medidas foram tomadas entre 850 (18,5°C) e 700mb (8,9°C) e o perfil vertical das gotículas apresentou um contínuo aumento com a altitude, assim como o LWC correspondente. O valor de máxima concentração de gotículas foi observado em 700mb, $1265,7\text{cm}^{-3}$, e o conteúdo de água líquida destas gotículas foi de $1,3\text{g/m}^3$. O LWC das gotas médias também foi crescente com a altitude, com máximo de $0,0086\text{g/m}^3$. Somente as gotas grandes e precipitáveis apresentaram sua maior concentração na base da nuvem, com $0,0036\text{g/m}^3$.

A Figura 4.33 mostra que a concentração inicial de gotículas foi alta, entretanto, não foi na base da nuvem onde se observou o maior valor. Este, ocorreu em 750mb, com 100cm^{-3} em $4,25\mu\text{m}$. As gotículas com diâmetro de $8,75\mu\text{m}$ ou mais mantiveram a maior concentração sempre no topo da nuvem, em 700mb, assim com as gotas médias no espectro da OAP-200x. A moda de CC teve início nos níveis mais baixos, com $25,25\mu\text{m}$ na base e $35,75\mu\text{m}$ no topo. Uma outra moda também foi observada no espectro da OAP-200x em $170\mu\text{m}$. Em situações onde há intensas correntes ascendentes, ocorre também um aumento da supersaturação e portanto, os aerossóis menores podem ser ativados, tal como é visível nos gráficos. As gotas grandes e precipitáveis apresentaram tendência de aumento do LWC com aumento do tamanho, chegando a $3,2\text{mm}$ de tamanho em 800mb. A Figura 4.34 exibe uma trajetória descendente com uma rota bastante complexa.

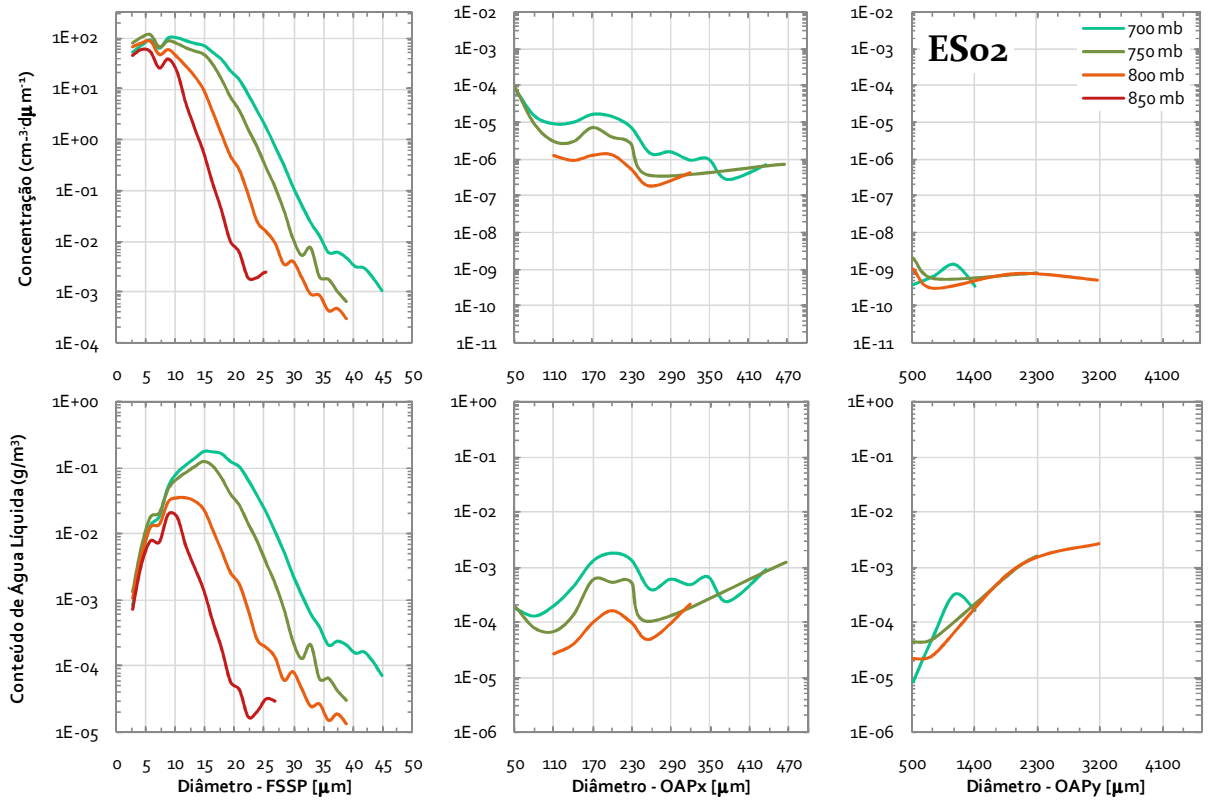


Figura 4.33: Distribuição de tamanho de gotas e gotículas, e distribuição de conteúdo de água líquida por tamanho, obtidas com os sensores FSSP, 200x e 200y em os diversos níveis de pressão para o caso da Estação Seca, caso ES02, de 24/09/2002 das 19:55 às 20:33Z.

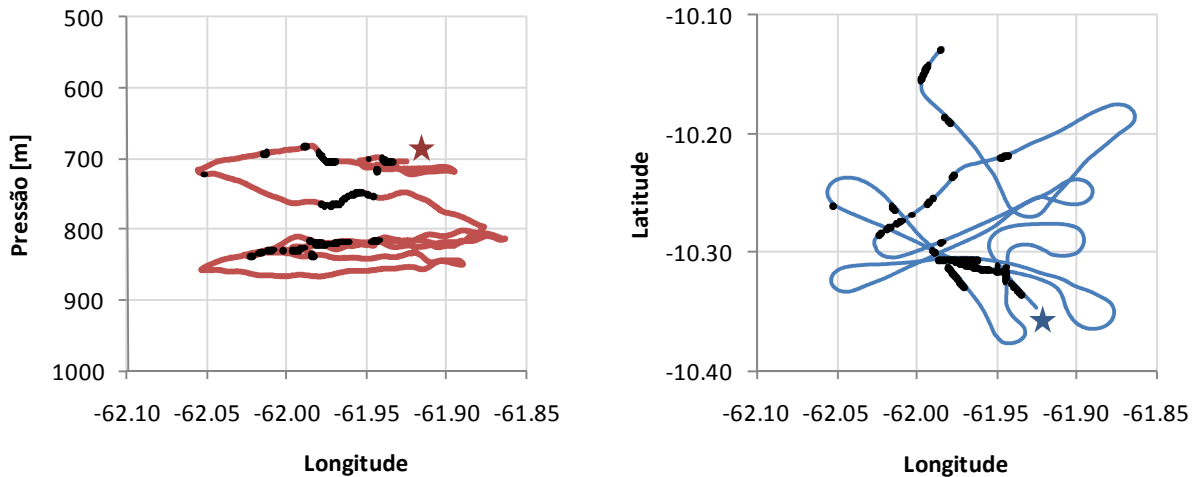


Figura 4.34: Trajetória do vôo correspondente ao caso ES02. À esquerda, Altitude versus Longitude e à direita, Latitude versus Longitude. A linha contínua representa o percurso realizado pelo avião e os pontos, as coordenadas onde foram tomadas as medidas utilizadas nas distribuições. A estrela representa o início da trajetória.

O caso ES04 (curva vermelha, Figura 4.30) exibiu a medidas de um pequeno Piro Cumulus, tomadas entre os níveis de 750 (13,0°C) a 650mb (3,6°C). A concentração de gotículas decresceu com a altitude enquanto que o conteúdo de água líquida exibiu um máximo em 700mb (10,4°C) de 0,96g/m³. O LWC de gotas médias também apresentou seu valor máximo neste mesmo nível, 0,0055g/m³ e as gotas grandes e precipitáveis somente foram registradas nos níveis de 750 e 700mb, constituindo um perfil decrescente com a altura.

A Figura 4.35 mostra que as menores gotículas (até 11,75µm) apresentaram maior concentração na base da nuvem, sendo o valor máximo de 160cm⁻³µm⁻¹ de gotículas com diâmetro médio de 8,75 e 10,25µm. As gotículas maiores apresentaram maior concentração no nível acima, de 700mb, sendo que o topo (650mb) foi o nível com as menores concentrações ao longo do espectro. Os processos de CC começaram a ocorrer com gotículas de 34,25µm na base da nuvem, mas também estiveram presentes no canal de 170µm no espectro da OAP-200x. As gotas médias exibiram tendência de aumento no conteúdo de água líquida, assim como as gotas grandes e precipitáveis, cujo tamanho máximo identificado foi de 1,9mm.

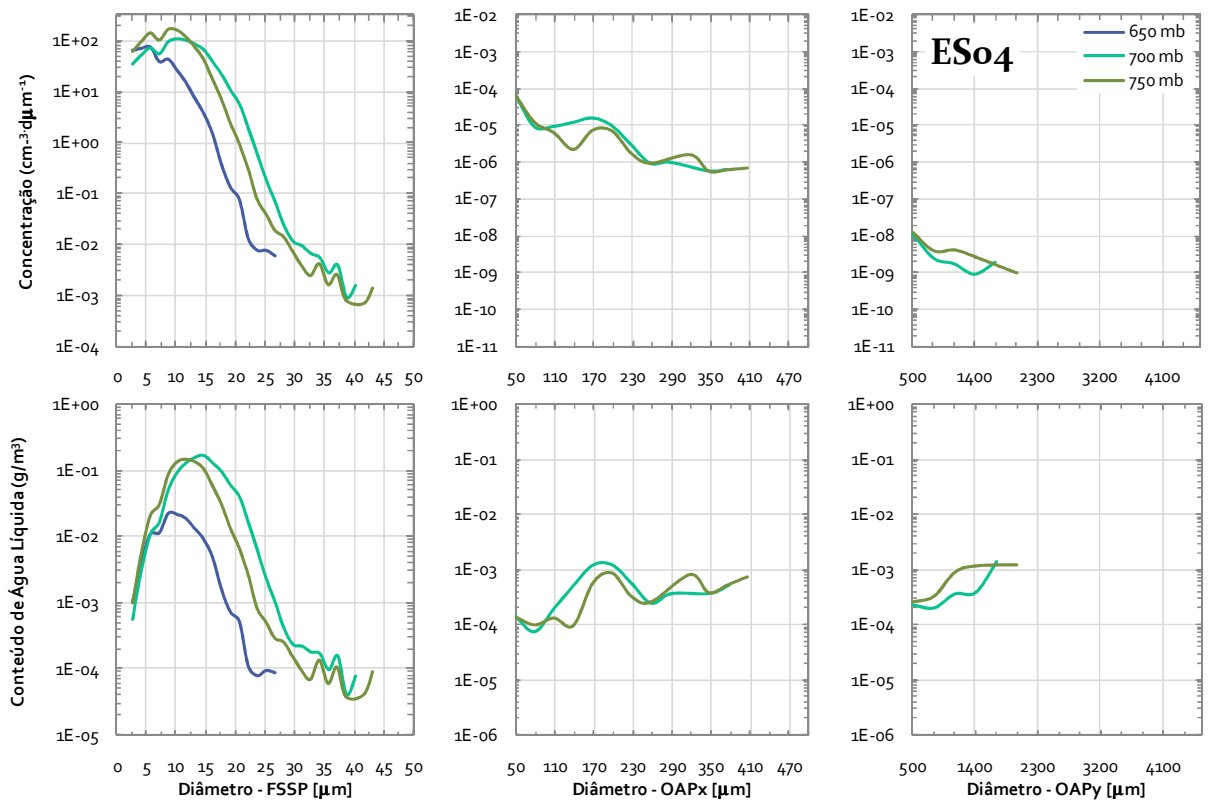


Figura 4.35 : Distribuição de tamanho de gotas e gotículas, e distribuição de conteúdo de água líquida por tamanho, obtidas com os sensores FSSP, 200x e 200y em os diversos níveis de pressão para o caso da Estação Seca, caso ES04, de 30/09/2002 das 18:25 às 18:44Z.

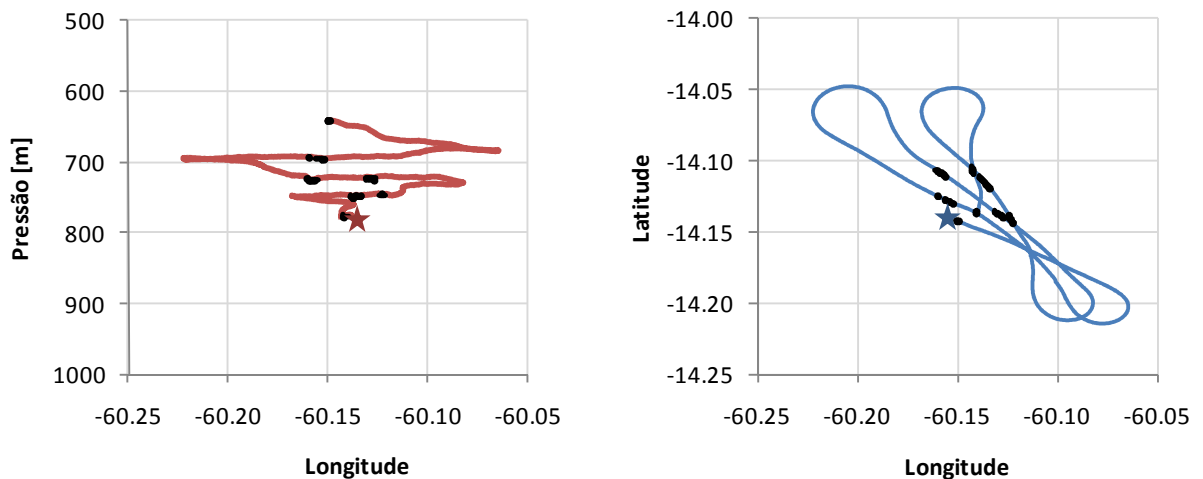


Figura 4.36: Trajetória do vôo correspondente ao caso ES04. À esquerda, Altitude versus Longitude e à direita, Latitude versus Longitude. A linha contínua representa o percurso realizado pelo avião e os pontos, as coordenadas onde foram tomadas as medidas utilizadas nas distribuições. A estrela representa o início da trajetória.

A nuvem correspondente ao caso ES07 (curva amarela, Figura 4.30) constituiu o mais intenso Piro-Cumulus observado na Estação Seca. Suas medidas foram tomadas entre os níveis de 800 (14,3°C) e 600mb (-0,8°C). O perfil vertical proveniente da FSSP exibiu grande quantidade de gotículas na base da nuvem (1358,1cm⁻³) e conforme o aumento da altitude houve uma acentuada diminuição dessa concentração, para 611,3cm⁻³ em 700mb (9,6°C). Entretanto, como no caso ES01, a concentração voltou a aumentar para 1400,0 cm⁻³ em 600mb. O conteúdo de água líquida da FSSP seguiu este mesmo comportamento, com 0,85g/m³ na base e 1,45g/m³ no topo. O LWC registrado pelas OAP-200x e 200y também exibiu uma diminuição seguida de aumento sendo que na base, estes valores foram de ~ 0,009 e 0.005g/m³, e no topo, ~ 0,008 e 0,008g/m³, respectivamente.

A Figura 4.37 exhibe uma distribuição muito semelhante ao caso ES01, com as maiores concentrações de gotículas pequenas na base, e as gotículas maiores, acima de 17,75µm, começam a aparecer com maior concentração nos níveis mais frios. O crescimento por CC pôde ser identificado em 37,25µm e novamente em 110µm. As gotas médias estiveram mais concentradas na base da nuvem e as gotas grandes e precipitáveis foram vistas em níveis mais elevados. Em ambos os casos a tendência das gotas médias, grandes e precipitáveis foi de aumento. A Figura 4.38 representa a trajetória realizada pelo avião durante a tomada dos dados. Nota-se que não foi realizada uma amostragem regular de uma mesma região, o que poderia justificar a considerável diminuição de concentração e LWC das gotículas entre 7,25 e 17,75µm, no nível de 700mb.

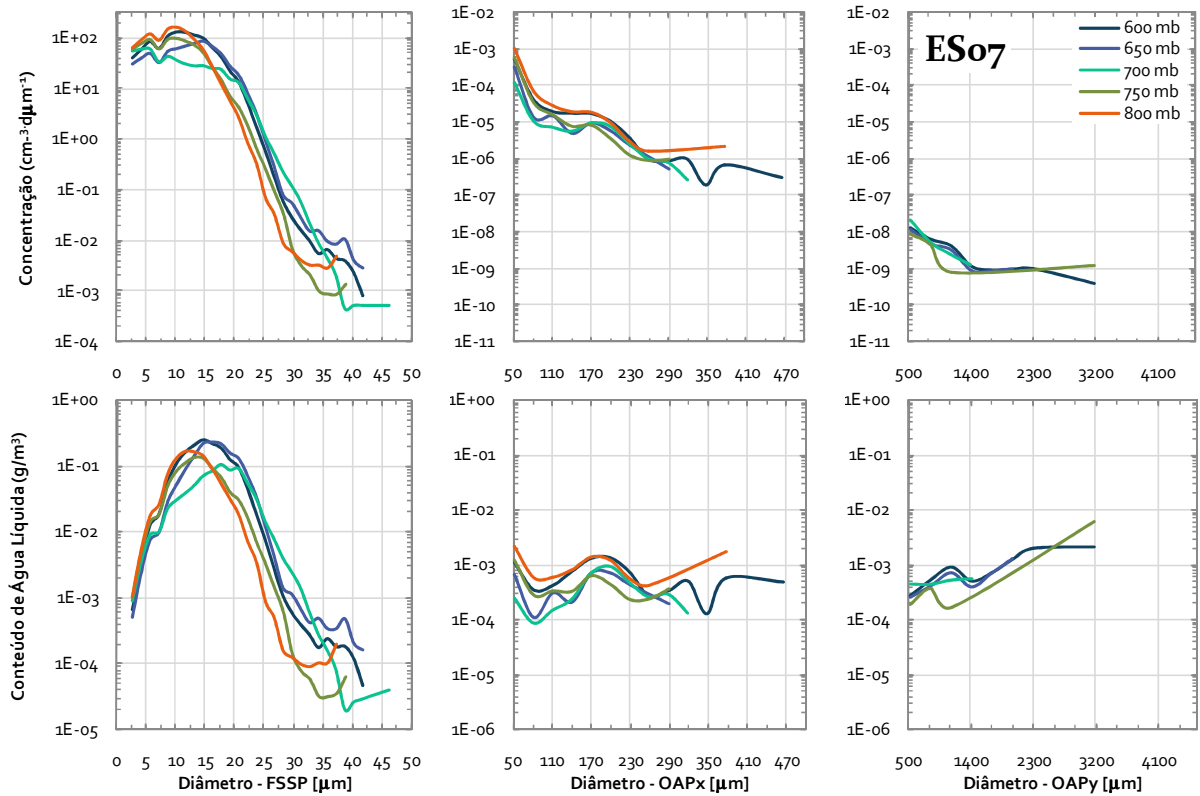


Figura 4.37: Distribuição de tamanho de gotas e gotículas, e distribuição de conteúdo de água líquida por tamanho, obtidas com os sensores FSSP, 200x e 200y em os diversos níveis de pressão para o caso da Estação Seca, caso ES07, de 04/10/2002 das 18:56 às 19:31Z.

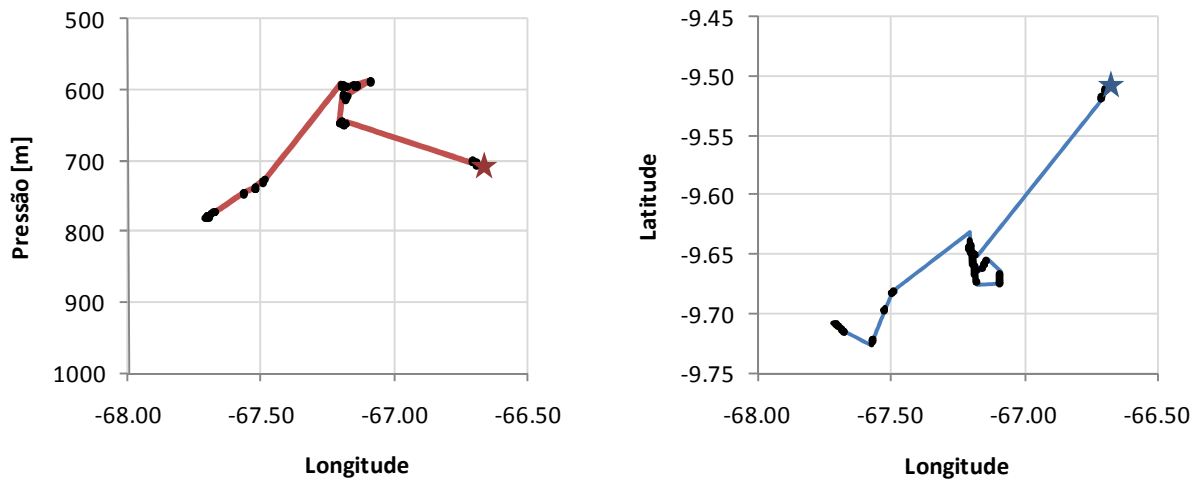


Figura 4.38: Trajetória do vôo correspondente ao caso ES07. À esquerda, Altitude versus Longitude e à direita, Latitude versus Longitude. A linha contínua representa o percurso realizado pelo avião e os pontos, as coordenadas onde foram tomadas as medidas utilizadas nas distribuições. A estrela representa o início da trajetória.

O caso ES10 (curva verde, Figura 4.30) apresentou um perfil semelhante ao caso ES02, no entanto não houve descrição do vôo para que a situação de ambas as amostragem pudessem ser comparadas com mais detalhes. As medidas foram realizadas entre os níveis de 800 (15,6°C) e 700mb (10,4°C). A concentração de gotículas e seu conteúdo de água líquida cresceram com a altitude, atingindo o valor máximo no topo, de $1375,5\text{cm}^{-3}$ e $1,0\text{g/m}^3$, respectivamente. O mesmo comportamento também foi observado pelos sensores OAP-200x e 200y, cujos valores no topo da nuvem reportaram $0,0051\text{g/m}^3$ em ambos.

A Figura 4.39 mostra a maior concentração ($160\text{cm}^{-3}\mu\text{m}^{-1}$) de gotículas pequenas (até $7,25\mu\text{m}$) na base da nuvem. Com seu crescimento, a concentração passa a ser maior no topo, provavelmente pela ação de fortes correntes ascendentes. Somente quando as gotas são grandes, acima de $500\mu\text{m}$, é que a maior concentração volta a ser vista na base da nuvem. A moda de CC é vista inicialmente entre gotículas de $23,75\mu\text{m}$ em 800mb, de forma que o diâmetro da moda aumentou com a altitude, passando para $28,25\mu\text{m}$ em 750mb e $34,25\mu\text{m}$ em 700mb. Neste mesmo nível, houve também uma moda de CC bem marcada em $170\mu\text{m}$. O conteúdo de água líquida de gotas médias, grandes e precipitáveis tendeu a aumentar com o crescimento das gotas, e o máximo diâmetro registrado pela OAP-200y foi de $2,9\text{mm}$.

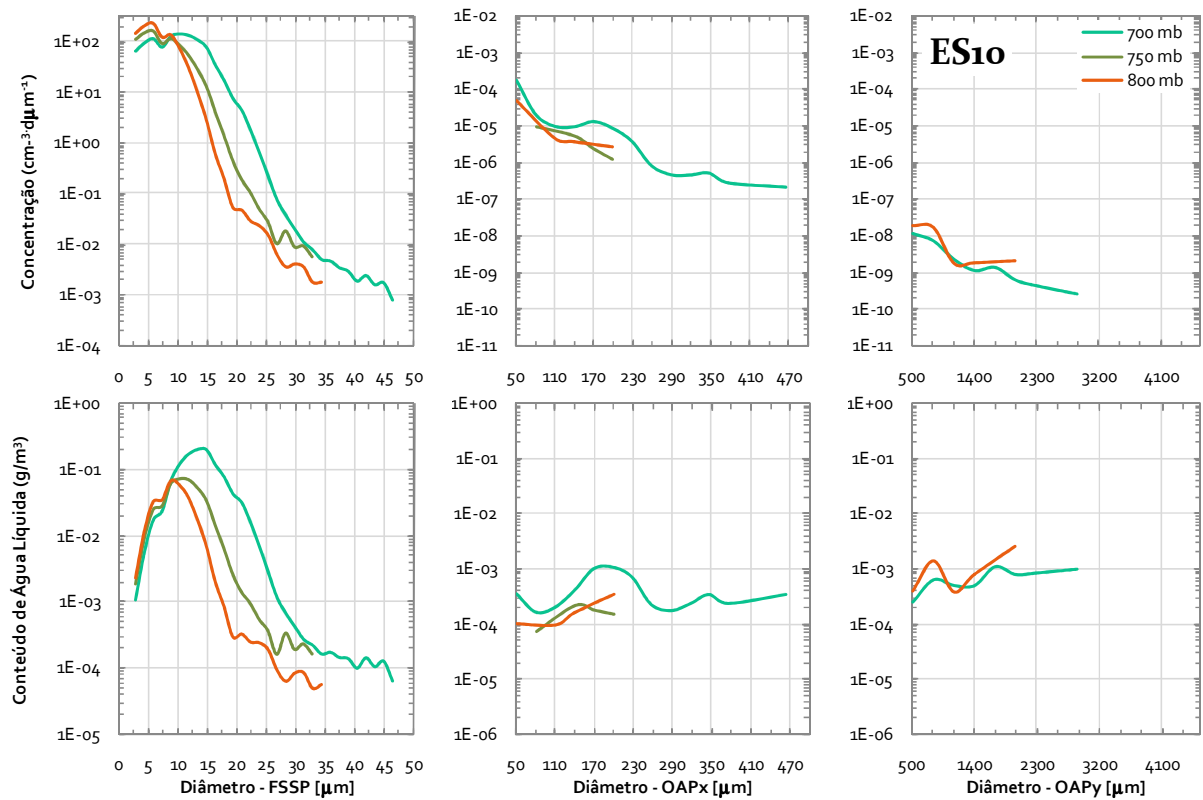


Figura 4.39 : Distribuição de tamanho de gotas e gotículas, e distribuição de conteúdo de água líquida por tamanho, obtidas com os sensores FSSP, 200x e 200y em os diversos níveis de pressão para o caso da Estação Seca, caso ES10, de 06/10/2002 das 19:38 às 20:35Z.

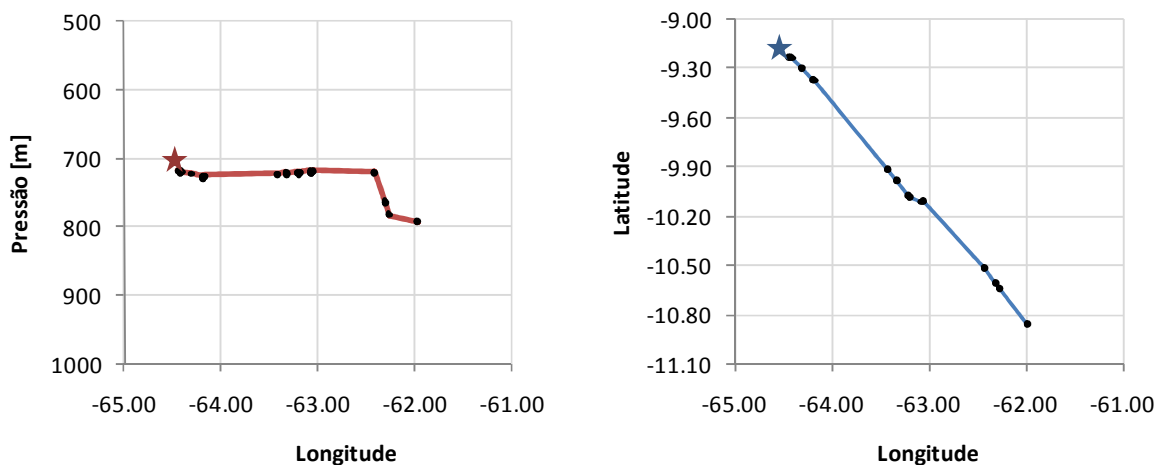


Figura 4.40: Trajetória do voo correspondente ao caso ES10. À esquerda, Altitude versus Longitude e à direita, Latitude versus Longitude. A linha contínua representa o percurso realizado pelo avião e os pontos, as coordenadas onde foram tomadas as medidas utilizadas nas distribuições. A estrela representa o início da trajetória.

4.3 Estação de Transição

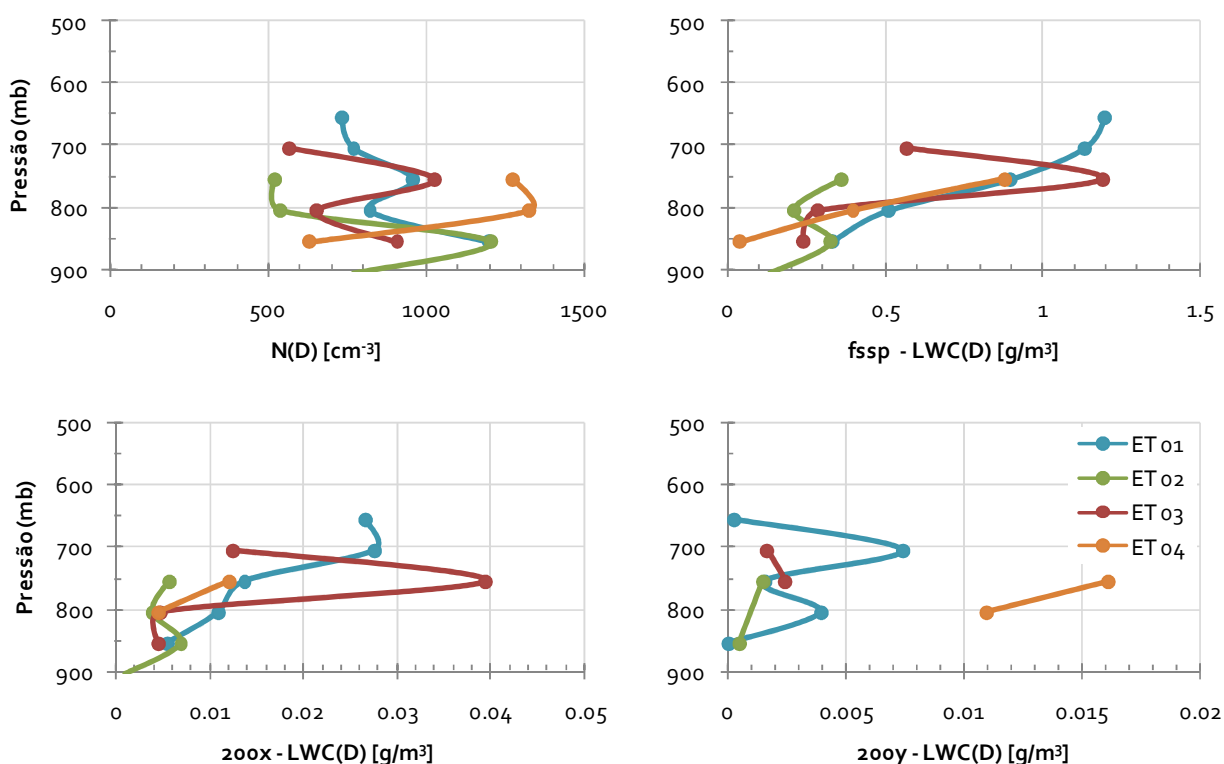


Figura 4.41: Perfis verticais utilizados para caracterizar a Estação de Transição: (a) número total de gotículas medido pela FSSP, (b), (c) e (d) conteúdo de água líquida proveniente dos sensores FSSP, 200x e 200y, respectivamente.

A Figura 4.41 apresenta a distribuição vertical dos contadores de hidrometeoros, como na Figura 4.16, para os quatro casos observados durante a Estação de Transição. Os perfis verticais obtidos com a FSSP e OAP-200x estiveram razoavelmente semelhantes, entretanto, o perfil de gotas grandes e precipitáveis não possibilita qualquer afirmação sobre semelhança.

O caso ET01 (curva azul, Figura 4.41) contou com medidas tomadas em nuvem com convecção ativa, precipitação e fortes correntes ascendentes (7,5m/s), segundo o registro do voo. Essas medidas foram realizadas entre os níveis de 850 (18,2°C) e 650mb (4,4°C). O perfil de gotículas exibiu um decréscimo da concentração entre 850mb e 800mb (16,2°C), onde o valor máximo (1201cm^{-3}) foi observado,. O nível imediatamente acima, entre 800 e 750mb (12,6°C) apresentou um trecho com aumento da concentração, atingindo 960cm^{-3} e

logo acima de 750mb houve uma diminuição contínua. Apesar do comportamento oscilatório da concentração de gotículas, o LWC correspondente apresentou um aumento contínuo com a altura, chegando ao máximo no topo da nuvem com $1,20\text{g/m}^3$, o que indica que houve ativação da CC. No caso do LWC fornecido por gotas médias, também houve aumento com a altitude, de forma que o valor máximo foi observado uma camada antes do topo, em 700mb, com $0,027\text{g/m}^3$. O conteúdo de água das gotas grandes e precipitáveis sofreu oscilações ao longo da vertical, apresentando dois trechos com pontos de máximo, em 800mb com $0,0039\text{g/m}^3$, e em 700mb com $0,0074\text{g/m}^3$.

A Figura 4.42 mostrou grande concentração de gotículas pequenas na base da nuvem, com máximo em $5,75\mu\text{m}$, de $170\text{cm}^{-3}\mu\text{m}^{-1}$. Conforme o crescimento das gotículas, as maiores concentrações começaram a aparecer em níveis mais altos, como seria esperado para gotículas que se desenvolvem na corrente ascendente. Uma moda de CC muito sutil pode ser vista na base da nuvem (850mb) em $31,25\mu\text{m}$ e também em $38,75\mu\text{m}$ no nível de 750mb. A presença desta moda poderia explicar a diminuição da concentração de gotículas (Figura 4.41) e aumento do LWC. As gotas médias exibiram uma moda de crescimento por CC em $199\mu\text{m}$ sendo que o LWC proveniente das mesmas indicou uma leve tendência de aumento. Esta tendência ficou mais acentuada dentre as gotas grandes e precipitáveis, que estiveram presentes nos níveis de 800 à 700mb, com diâmetro máximo observado de $3,8\text{mm}$.

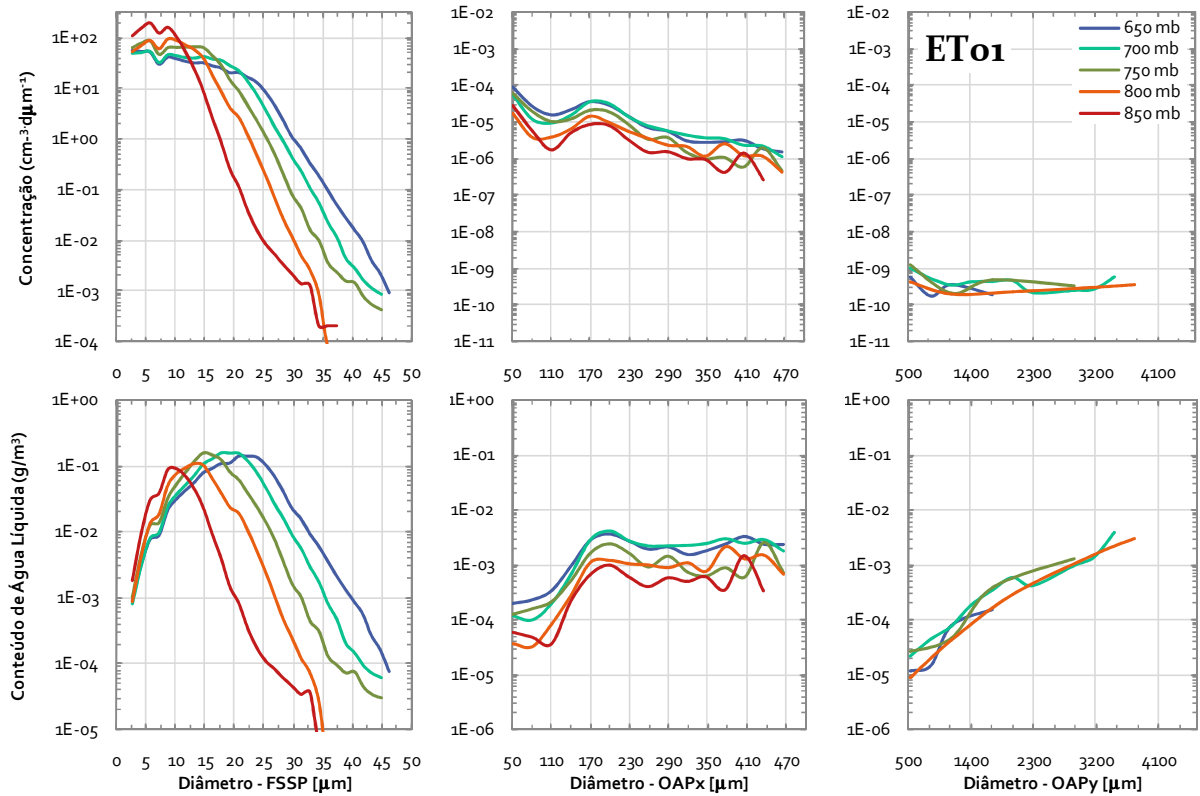


Figura 4.42: Distribuição de tamanho de gotas e gotículas, e distribuição de conteúdo de água líquida por tamanho, obtidas com os sensores FSSP, 200x e 200y em os diversos níveis de pressão para o caso da Estação Seca, caso ET01, de 09/10/2002 das 18:17 às 19:12Z.

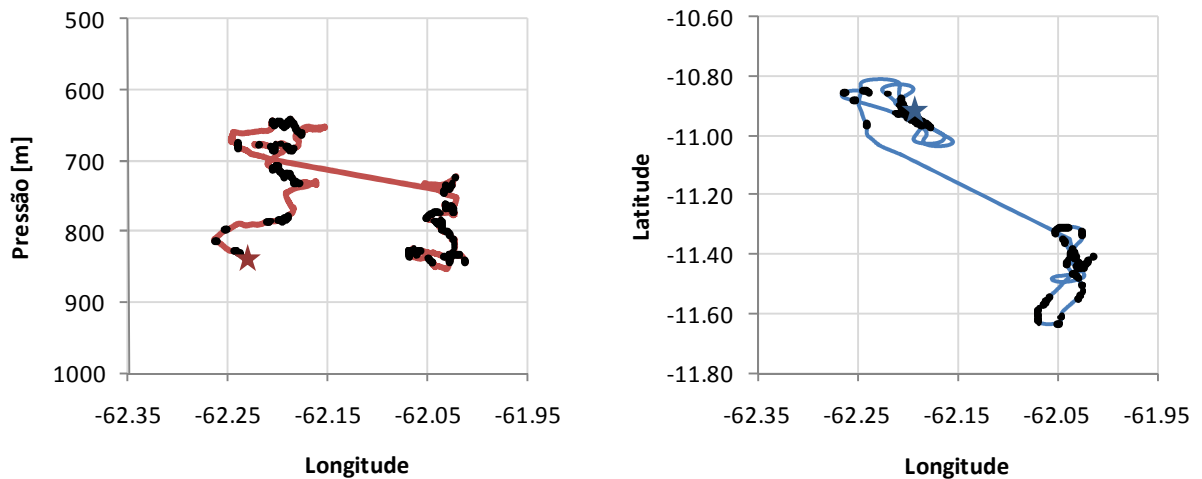


Figura 4.43: Trajetória do voo correspondente ao caso ET01. À esquerda, Altitude versus Longitude e à direita, Latitude versus Longitude. A linha contínua representa o percurso realizado pelo avião e os pontos, as coordenadas onde foram tomadas as medidas utilizadas nas distribuições. A estrela representa o início da trajetória.

O caso ET02 (curva verde, Figura 4.41) apresentou medidas entre os níveis de 900 (21,8°C) e 750mb (13,1°C). O perfil vertical de gotículas inicialmente aumentou, entre os níveis de 900 e 850mb (18,4°C), chegando ao máximo de 1204cm^{-3} , e em seguida diminuiu continuamente com a altura. O LWC fornecido pelas gotículas sofreu oscilações com a altitude, tal que apresentou dois trechos com aumento dos valores, entre 900 e 850mb e entre 800 (16,7°C) e 750mb, sendo o máximo observado neste último nível, de $0,36\text{g/m}^3$. A fase entre o aumento e diminuição da concentração e do LWC de gotículas indica que não houve uma ativação da CC. As gotas médias sofreram o mesmo padrão de oscilação vertical, nos mesmos níveis, sendo que o máximo LWC ocorreu em 850mb, valendo $\sim 0,007\text{g/m}^3$. As gotas precipitáveis apresentaram registro apenas nos níveis de 850 e 750mb, com máximo de $\sim 0,002\text{g/m}^3$ no nível mais alto.

A Figura 4.44 apresenta uma alta concentração de gotículas nos níveis de 900 e 850mb, com valor máximo de $160\text{cm}^{-3}\mu\text{m}^{-1}$ em $5,75\mu\text{m}$ (850mb). As gotículas maiores que $11,75\mu\text{m}$, entretanto já apareceram mais concentradas no topo, e mantiveram essa configuração por praticamente todo o espectro de gotas médias, grandes e precipitáveis. O crescimento por CC foi identificado na base, entre gotículas de $25,25\mu\text{m}$, e nos níveis mais elevados, entre gotículas de $29,75\mu\text{m}$, e também em $170\mu\text{m}$ nos diversos níveis de pressão, exceto no da base da nuvem. O LWC de gotas médias, grandes e precipitáveis apresentou tendências de aumento, sendo que o diâmetro máximo observado das gotas precipitáveis foi de $1,7\text{mm}$. A Figura 4.45 mostra a trajetória da amostragem, onde as medições foram tomadas em duas regiões distintas da nuvem.

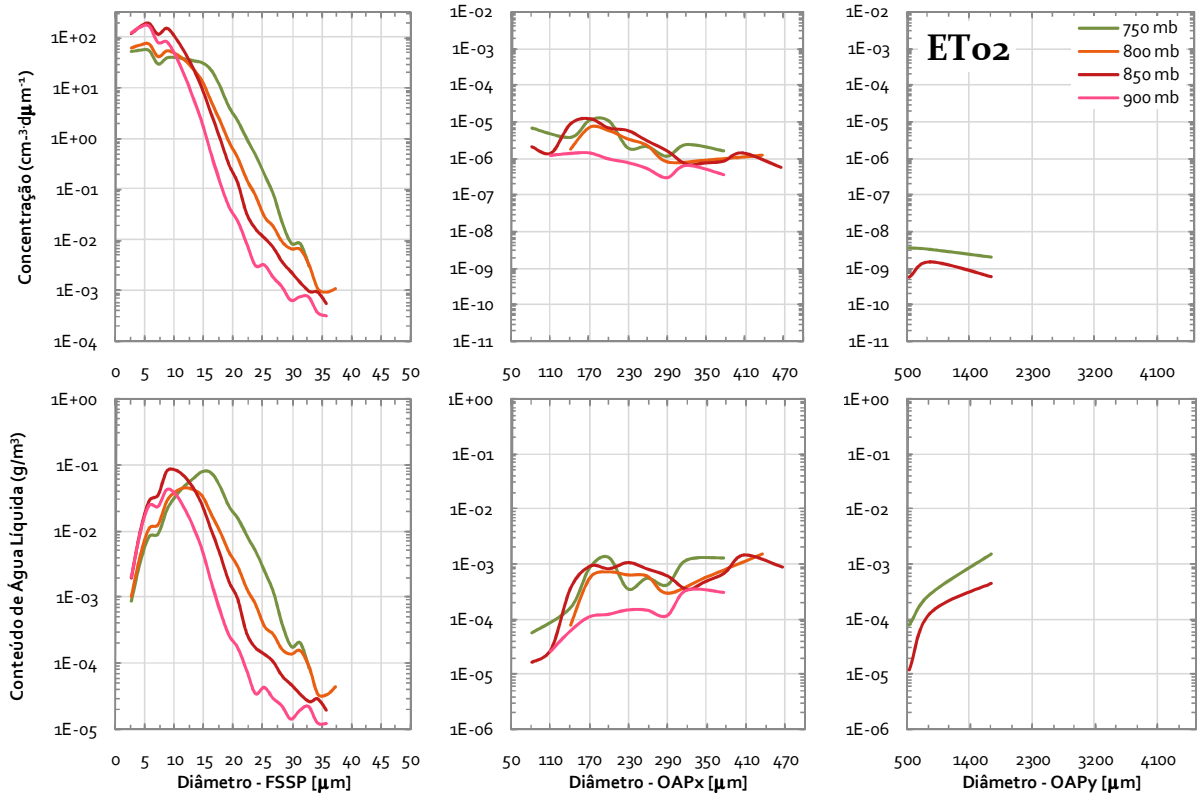


Figura 4.44: Distribuição de tamanho de gotas e gotículas, e distribuição de conteúdo de água líquida por tamanho, obtidas com os sensores FSSP, 200x e 200y em os diversos níveis de pressão para o caso da Estação Seca, caso ET02, de 11/10/2002 das 14:55 às 15:23Z.

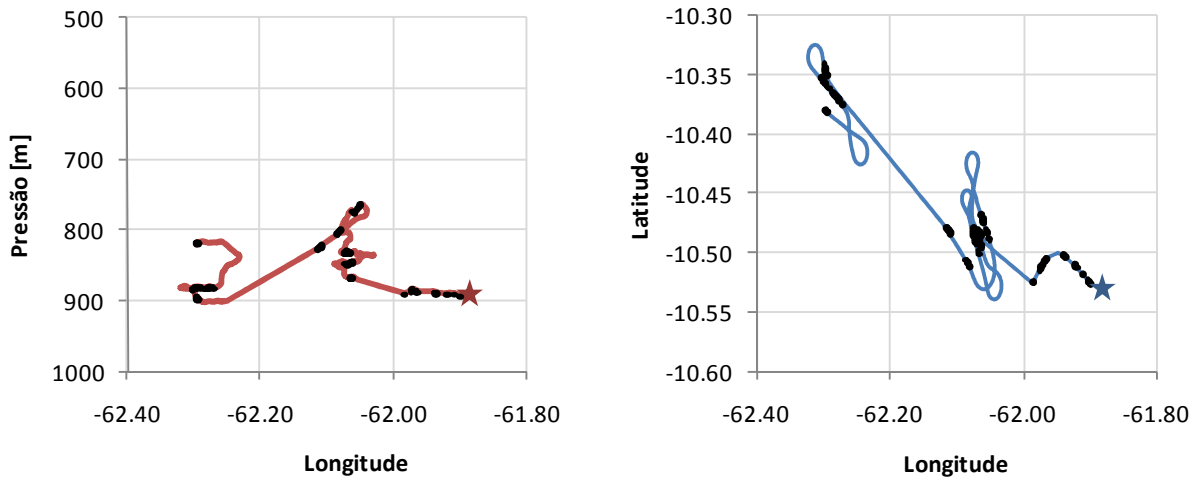


Figura 4.45: Trajetória do voo correspondente ao caso ET02. À esquerda, Altitude versus Longitude e à direita, Latitude versus Longitude. A linha contínua representa o percurso realizado pelo avião e os pontos, as coordenadas onde foram tomadas as medidas utilizadas nas distribuições. A estrela representa o início da trajetória.

O caso ET03 (curva vermelha, Figura 4.41) apresentou medidas desde o nível de 850 (20,4°C) até 700mb (9,0°C). O perfil da concentração de gotículas seguiu o mesmo padrão de comportamento observado no caso ET01, com diminuição da concentração, seguida de aumento e novamente diminuição, no sentido da base em direção ao topo, nos mesmos níveis do caso ET01. A máxima concentração de gotículas foi identificada em 750mb (12,6°C) com $1027,8\text{cm}^{-3}$ e o LWC destas gotículas cresceu atingindo o valor máximo em 750mb, de $1,19\text{g/m}^3$, e então diminuiu. Exatamente o mesmo comportamento foi identificado para as gotas médias, sendo o máximo LWC, observado também em 750mb, de $\sim 0,04\text{g/m}^3$. As gotas grandes e precipitáveis foram registradas nos níveis de 750 e 700mb, decrescendo com a altitude, com LWC máximo de $\sim 0,002\text{g/m}^3$.

A Figura 4.46 mostra alta concentração de gotículas no início de seu crescimento, predominantemente na base da nuvem, com 130cm^{-3} em $5,75\mu\text{m}$. No nível de 750mb, as gotículas maiores que $10,25\mu\text{m}$ apresentaram uma concentração mais alta, que poderia ter sido provocada pelo surgimento de gotículas novas, uma vez que não houve aumento do LWC durante a ascensão entre 800 e 750mb. A distribuição mostrou que a condensação foi bem mais eficiente nos níveis mais frios e os processos de CC exibiram sinais de início em $26,75\mu\text{m}$ na base, e em $41,75\mu\text{m}$ no topo da nuvem. A distribuição de gotas médias apresentou sua moda de CC entre 170 e $199\mu\text{m}$, sendo as maiores concentrações ainda observadas no topo da nuvem e o LWC exibiu tendência de aumento com o aumento do diâmetro. Gotas grandes e precipitáveis foram vistas somente nos dois níveis superiores (750 e 700mb), tendendo a aumentar com o tamanho, sendo que o valor máximo registrado chegou a $2,0\text{mm}$. A Figura 4.47 exibiu a trajetória do avião, caracterizando a mesma região da nuvem em ascensão vertical.

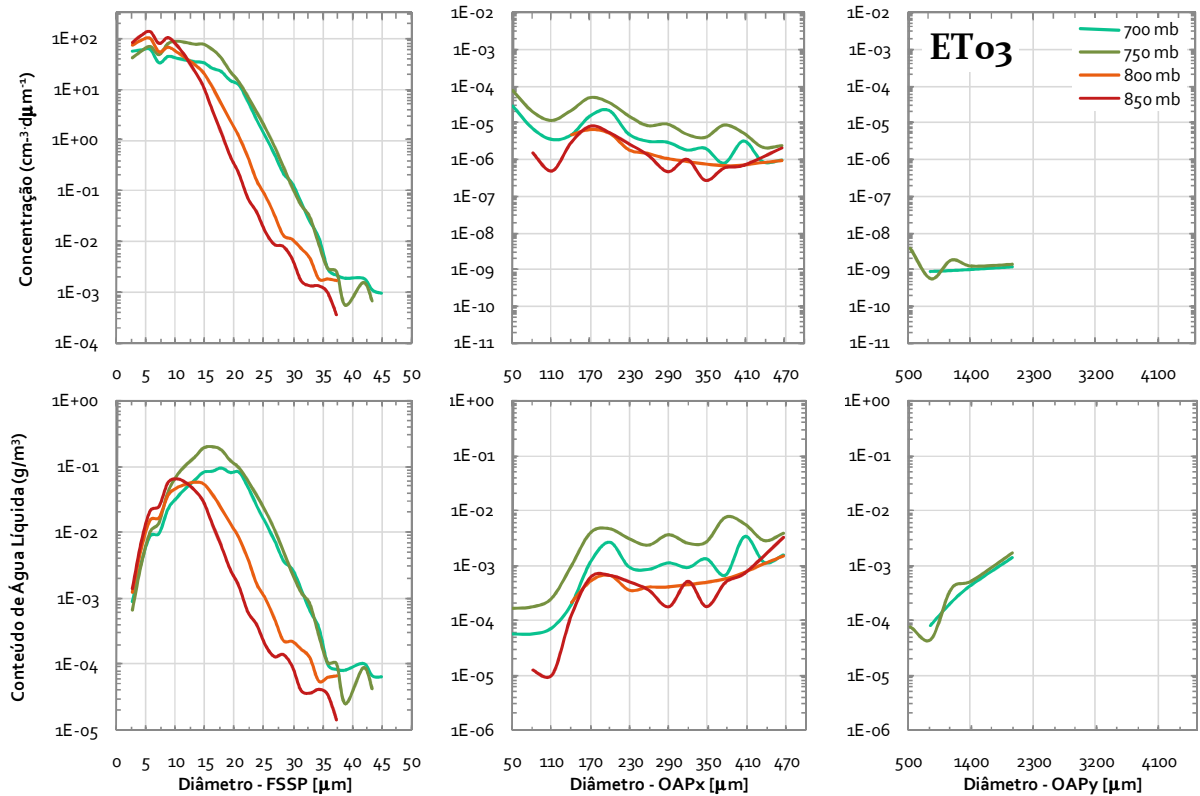


Figura 4.46: Distribuição de tamanho de gotas e gotículas, e distribuição de conteúdo de água líquida por tamanho, obtidas com os sensores FSSP, 200x e 200y em os diversos níveis de pressão para o caso da Estação Seca, caso ET03, de 12/10/2002 das 17:05 às 17:21Z.

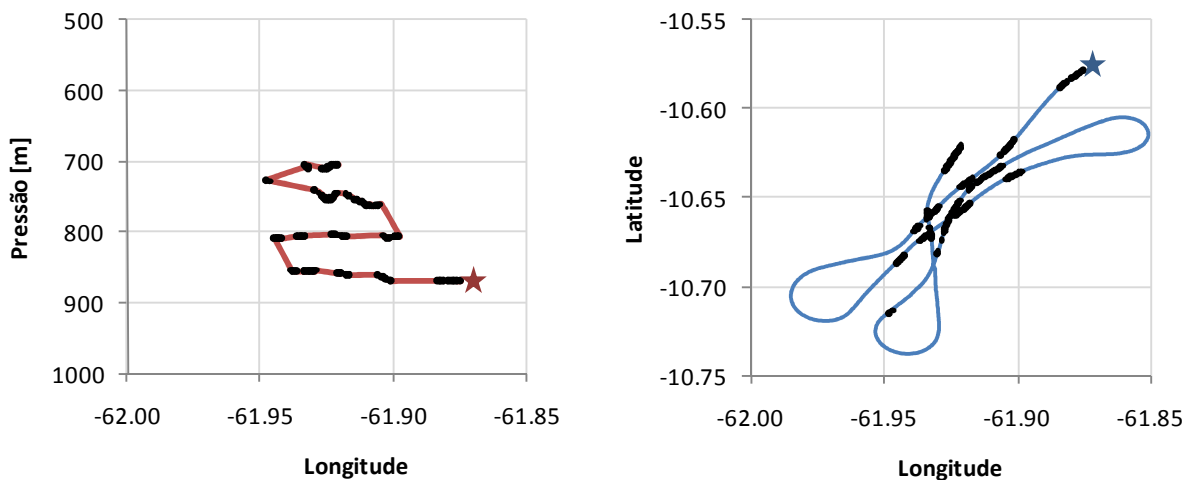


Figura 4.47: Trajetória do voo correspondente ao caso ET03. À esquerda, Altitude versus Longitude e à direita, Latitude versus Longitude. A linha contínua representa o percurso realizado pelo avião e os pontos, as coordenadas onde foram tomadas as medidas utilizadas nas distribuições. A estrela representa o início da trajetória.

O caso ET04 (curva amarela, Figura 4.41) apresentou medidas em apenas três níveis médios de pressão, entre 850 (19,8°C) e 750mb (12,5°C).. Dentre os casos da Estação de Transição, este foi o que apresentou a menor fração de LWC proveniente de gotículas, 96%. O perfil vertical de gotículas foi crescente entre 850 e 800mb (17,9°C), tal que o LWC máximo observado foi de 0,88g/m³. O perfil de gotas médias, grandes e precipitáveis também foi crescente com a altitude, apesar de terem registrado hidrometeoros apenas nos níveis de 800 e 750mb. Em ambos os casos o valor máximo foi observado no topo, sendo ~ 0,012 e 0,016g/m³, nos sensores OAP-200x e 200y, respectivamente.

A distribuição de gotículas, exibida na Figura 4.48, apresentou os maiores valores de concentração inicial, dentre todas as estações, na base da nuvem, com 190cm⁻³μm⁻¹ em 2,75μm. Nota-se que gotas médias, grandes e precipitáveis não foram observadas no nível de 850mb, portanto, pode-se assumir que a concentração de gotículas medidas se refere à hidrometeoros recém ativados. No entanto, o desenvolvimento do processo de crescimento por condensação foi, aparentemente, mais eficiente nos níveis mais elevados. O crescimento por CC mostrou sinais de atividade entre gotículas de 32,75μm e novamente no espectro de gotas médias, entre 170 e 199μm. O LWC obtido pelos sensores OAP-200x e 200y exibiu tendência de aumento com o tamanho, tal que as maiores concentrações de ambas as distribuições foram retratadas no topo da nuvem, e o máximo diâmetro de gota registrado foi o maior dentre todas as estações, de 4,4mm. A Figura 4.49 exhibe a trajetória da amostragem tomada em uma região específica da nuvem realizada em ascensão vertical.

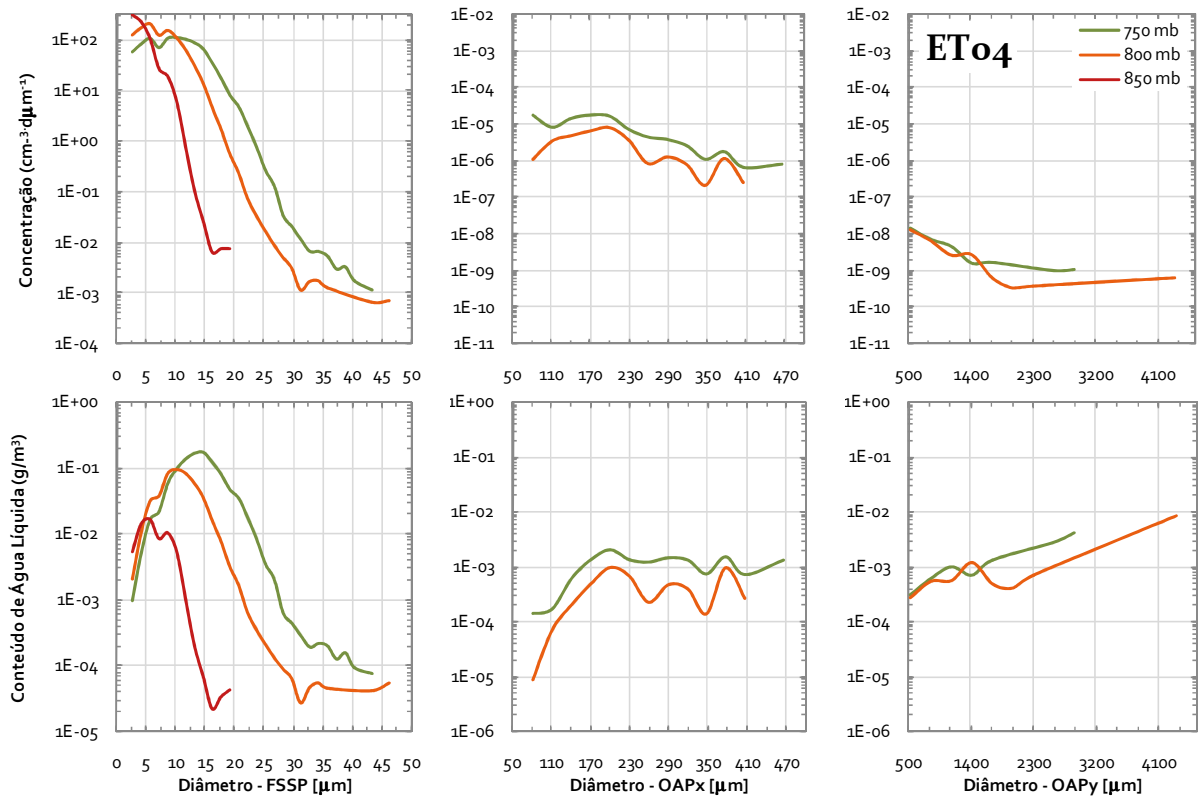


Figura 4.48: Distribuição de tamanho de gotas e gotículas, e distribuição de conteúdo de água líquida por tamanho, obtidas com os sensores FSSP, 200x e 200y em os diversos níveis de pressão para o caso da Estação Seca, caso ET04, de 13/10/2002 das 19:07 às 19:23Z.

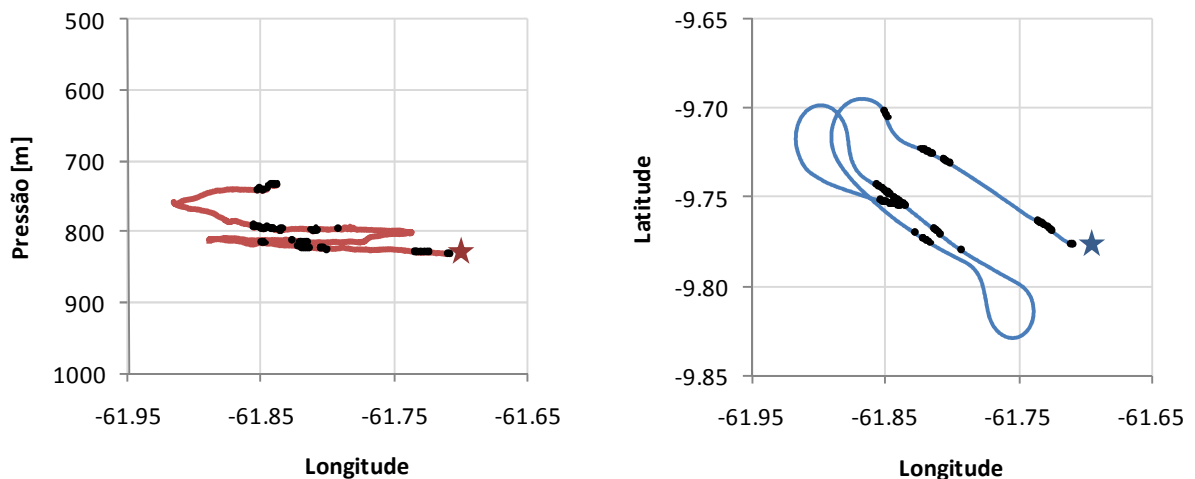


Figura 4.49: Trajetória do vôo correspondente ao caso ET04. À esquerda, Altitude versus Longitude e à direita, Latitude versus Longitude. A linha contínua representa o percurso realizado pelo avião e os pontos, as coordenadas onde foram tomadas as medidas utilizadas nas distribuições. A estrela representa o início da trajetória.

5 DIFERENÇAS MICROFÍSICAS

5.1 Estação Chuvosa × Estação Seca × Estação de Transição

Neste capítulo são apresentados os resultados representativos de cada estação, de forma que as mesmas possam ser comparadas entre si. Para cada estação, há uma distribuição média de gotículas e gotas e uma distribuição média de LWC por tamanho, para camadas representando os níveis de 900-800, 800-700, 700-600 e 600-500mb (Figura 5.1 à Figura 5.6). Além das distribuições de gotas e LWC, são apresentados dois histogramas de frequência, para cada estação, com as ocorrências de LWC e ocorrências de D_0 , que representa o diâmetro médio onde se encontra 50% do conteúdo de água líquida (Figura 5.7 à Figura 5.9). Finalmente, a Figura 5.10 mostra o perfil vertical do D_0 para cada estação.

- **Concentrações de Hidrometeoros**

As diferenças observadas entre as distribuições de gotículas da Estação Chuvosa versus a Estação Seca e de Transição foram extremamente marcantes (Figura 5.1 à Figura 5.3). A concentração de gotículas pequenas, no início do espectro da FSSP, foi consideravelmente menor durante a Estação Chuvosa. No auge da atividade do processo de crescimento por condensação, a Estação Chuvosa apresentou uma concentração que variou entre $12\text{cm}^{-3}\mu\text{m}^{-1}$, na camada de 800-700mb, e $0,98\text{cm}^{-3}\mu\text{m}^{-1}$, na camada de 900-800mb, ambos em $12,5\mu\text{m}$. Já a Estação Seca, apresentou uma variação da concentração da moda de condensação de $94\text{cm}^{-3}\mu\text{m}^{-1}$, na camada de 800-700mb, a $43\text{cm}^{-3}\mu\text{m}^{-1}$, na camada de 600-500mb, ambas em $5,75\mu\text{m}$. Para a Estação de Transição, esta variação ficou entre $130\text{cm}^{-3}\mu\text{m}^{-1}$, na camada de 900-800mb, e $49\text{cm}^{-3}\mu\text{m}^{-1}$, na camada de 700-600mb, ambas em $5,75\mu\text{m}$. As Estações Seca e de Transição apresentaram a maior concentração da moda de condensação no nível mais baixo da nuvem, em 900-800mb, enquanto que na Estação

Chuvosa, as maiores concentrações foram observadas no nível acima, em 800-700mb. Portanto, pode-se atribuir esse relativo aumento ao excesso de pequenos aerossóis durante as Estações Seca e de Transição.

A moda de condensação também foi diferente entre as estações: Seca e de Transição com $5,75\mu\text{m}$ enquanto que a Chuvosa tinha $12,5\mu\text{m}$. Este resultado indica que o processo de crescimento por condensação foi mais eficiente na Estação Chuvosa do que nas outras estações. Esta maior eficiência poderia ser causada tanto pelo excesso de vapor, distribuído em uma quantidade menor de CCN, quanto por uma maior fração de CCN grandes que ficam disponíveis nesta estação. Desta maneira poderia haver uma menor competição dos aerossóis grandes com os aerossóis pequenos provenientes de queimadas.

O processo de crescimento por CC se mostrou bem mais eficiente na Estação Chuvosa através de uma moda bem definida em $32,5\mu\text{m}$, onde a concentração máxima de gotículas foi de $1,5\text{ cm}^{-3}\mu\text{m}^{-1}$ na camada de 600-500mb. Nota-se ainda que as concentrações nas duas modas (condensação e CC) não foram significativamente diferentes. Por outro lado, as Estações Seca e de Transição, apresentaram indícios de uma moda de crescimento por CC em torno de $30\mu\text{m}$. No entanto, o desenvolvimento deste processo foi mais evidente em torno de $170\mu\text{m}$.

Além das diferenças de tamanho, as concentrações também foram distintas entre as estações. Na Estação Chuvosa a concentração máxima da moda de CC, observada em $32,5\mu\text{m}$, foi de $1,5\text{ cm}^{-3}\mu\text{m}^{-1}$, enquanto que o máximo observado dentre os níveis dos casos da Estação Seca e de Transição, tanto em $30\mu\text{m}$ quanto em $170\mu\text{m}$, foram inferiores. Na moda em torno de $30\mu\text{m}$ obteve-se uma concentração máxima de $0,7\text{ cm}^{-3}\mu\text{m}^{-1}$ na camada 600-500mb para a Estação Seca enquanto que na Estação de Transição foi de $0,1\text{ cm}^{-3}\mu\text{m}^{-1}$ na camada 700-600mb. Na moda de $170\mu\text{m}$ entre 600-500mb a concentração foi de $2,6\times 10^{-5}\text{ cm}^{-3}\mu\text{m}^{-1}$ na Estação Seca e entre 700-600mb $2,3\times 10^{-5}\text{ cm}^{-3}\mu\text{m}^{-1}$ na Estação de Transição.

O desenvolvimento das gotas entre 50 e 500 μ m se aproximou de uma função exponencial nas três estações, porém as concentrações da Estação Chuvosa ficaram entre uma e duas ordens de grandeza acima das outras estações. As distribuições das Estações Seca e de Transição foram bem mais semelhantes entre si, no entanto, a partir da moda de CC situada em 170 μ m, a Estação de Transição exibiu concentrações ligeiramente maiores.

As distribuições das gotas grandes e precipitáveis apresentaram uma forma exponencial muito semelhante em todas as estações, porém, divergiram nas concentrações. Além das maiores concentrações observadas na Estação Chuvosa, chegando a duas ordens de grandeza, o tamanho máximo dos hidrometeoros observados também foi considerável. Os hidrometeoros precipitáveis da Estação Chuvosa atingiram diâmetros de 12mm, enquanto que os da Estação de Transição atingiram 4,4mm e os da Estação Seca, 3,8mm. Tais hidrometeoros, especialmente da Estação Chuvosa, muito provavelmente seriam partículas congeladas, uma vez que gotas de chuva se quebram a partir de 5-6mm. Deste modo, o tamanho máximo dos hidrometeoros permite inferir sobre a fase fria das nuvens e também sobre a produção de precipitação, pois parte da chuva é produzida pelo derretimento de cristais e agregados de gelo. A falta de evidência de gelo durante a Estação Seca sugere que a fase fria destas nuvens não foi bem desenvolvida e como consequência ocorreu uma supressão dos hidrometeoros grandes. Por outro lado, não se pode afirmar categoricamente as conclusões sobre a fase fria, pois o avião ALPA não realizou medidas acima da isoterma de -10°C.

- **LWC**

O desenvolvimento das gotículas ao longo da vertical foi muito semelhante entre as Estações Seca e de Transição, a base da nuvem (900-800mb) apresentou alto LWC de gotículas pequenas (Figura 5.4 à Figura 5.6), menores que 8,75 μ m, e conforme essas gotículas

ascenderam pela nuvem, elas cresceram, e o LWC gradualmente passou a ser maior nos níveis mais altos. Na Estação Chuvosa a concentração máxima de LWC em baixos níveis (abaixo de 700mb) encontrou-se entre os diâmetros de 12,5 e 17,5 μ m e em níveis mais altos, entre 30 e 35 μ m. Estas diferenças representam um predomínio do crescimento por condensação na Estação Seca e de Transição (translação do espectro) e CC (aumento do LWC com o diâmetro) na Chuvosa. Este fato pode ser devido ao tamanho das gotículas pequenas, ou seja, na Estação Seca e de Transição a eficiência de CC é inferior à da Estação Chuvosa. Esse efeito se refletiu no LWC das gotas médias, grandes e precipitáveis, pois a Estação Chuvosa apresentou maior volume de água do que as outras estações.

O maior volume de água líquida proveniente de gotas médias, observado na Estação Chuvosa, foi provavelmente, uma consequência da eficiência do processo de CC, cujas diferenças dentre as estações pôde ser notada desde a segunda moda da distribuição, e permaneceu marcante ao longo de todo espectro de gotas médias.

- **D₀**

A frequência do D₀ (Figura 5.9) na base da nuvem mostra que ocorreram gotículas maiores durante a Estação Chuvosa e que houve um eficiente processo de crescimento ao longo da ascensão vertical. O deslocamento das distribuições de frequência pelos níveis verticais se mostrou mais amplo que na Estação Seca e na Estação de Transição, o que significa uma menor eficiência no processo de crescimento. A Estação de Transição não apresentou medidas entre 600-500mb, porém, entre 700-600mb a distribuição de frequência foi bem mais estreita e com D₀ médio maior que a Estação Seca. Isto pode ser resultado da diminuição da concentração de aerossóis, o respectivo aumento do tamanho dos aerossóis e da disponibilidade de vapor d'água.

Os perfis verticais de D_0 (Figura 5.10) indicaram maior eficiência no crescimento de gotículas durante a Estação Chuvosa. Apesar de, na camada da base, o D_0 na Estação Seca ter sido maior que na Estação de Transição, o desenvolvimento das gotículas, durante a ascensão, se mostrou um pouco mais eficiente na Estação de Transição. O crescimento experimentado pelas gotículas ao longo da ascensão vertical (900 e 500mb) na Estação Chuvosa foi de $\sim 12\mu\text{m}$, enquanto que na Estação Seca foi de $7,8\mu\text{m}$. Essa eficácia na Estação Chuvosa pode ser um reflexo do predomínio do processo de CC com a altura, uma vez que a eficiência de CC aumenta com o tamanho das gotículas. Na Estação de Transição, entre os níveis de 900 e 600mb, as gotículas cresceram $9,5\mu\text{m}$, contra $5,1\mu\text{m}$ entre as camadas equivalentes da Estação Seca. Neste caso em particular, pode-se especular que o aumento da disponibilidade de vapor d'água e diminuição da concentração de aerossóis tenham favorecido o maior desenvolvimento das gotículas na Estação de Transição.

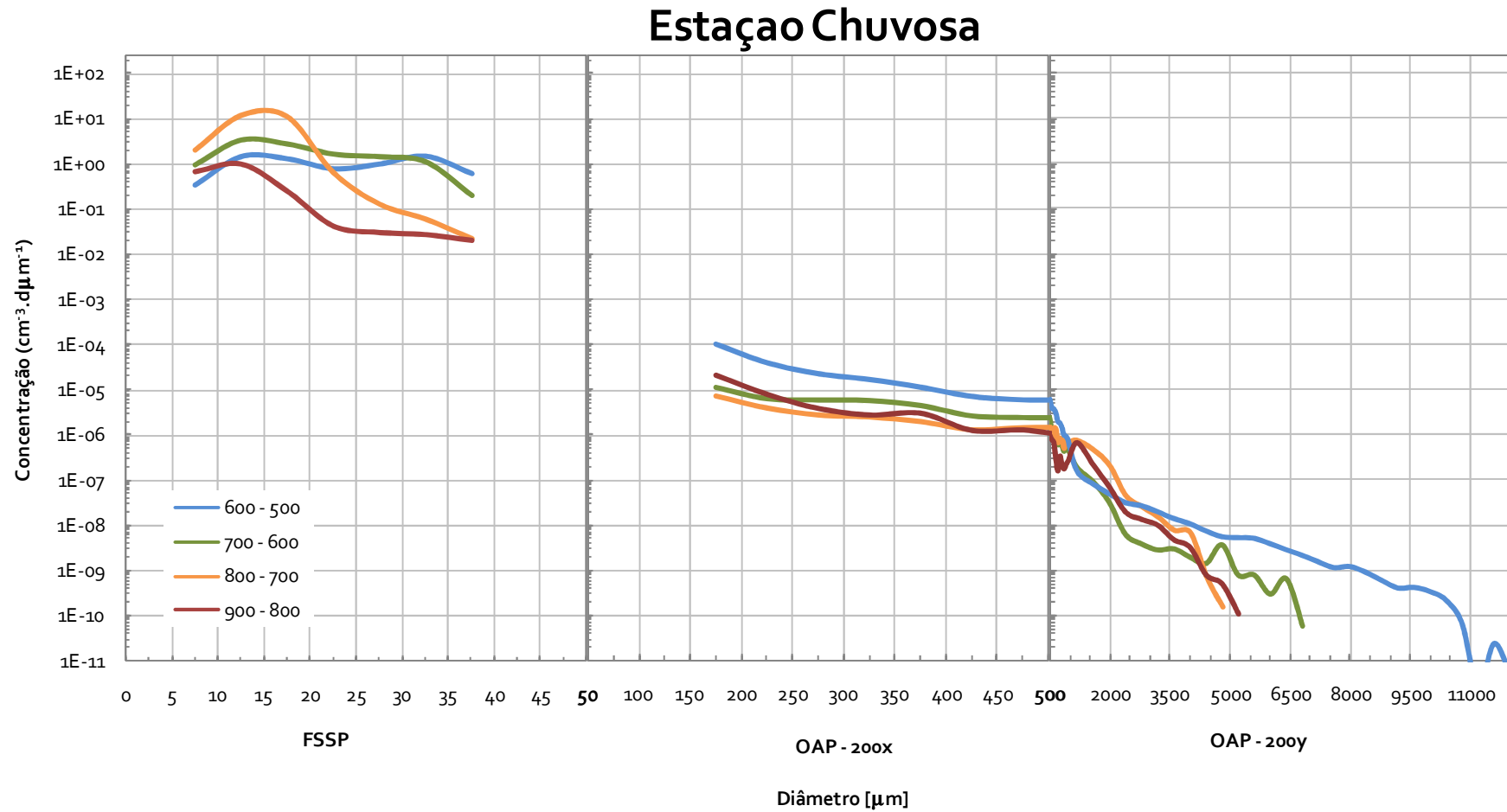


Figura 5.1: Distribuição de tamanho de hidrometeoros, obtidas com os sensores FSSP, OAP-2DC e 2DP, entre os níveis de pressão de 900 a 500mb, para os casos da Estação Chuvosa.

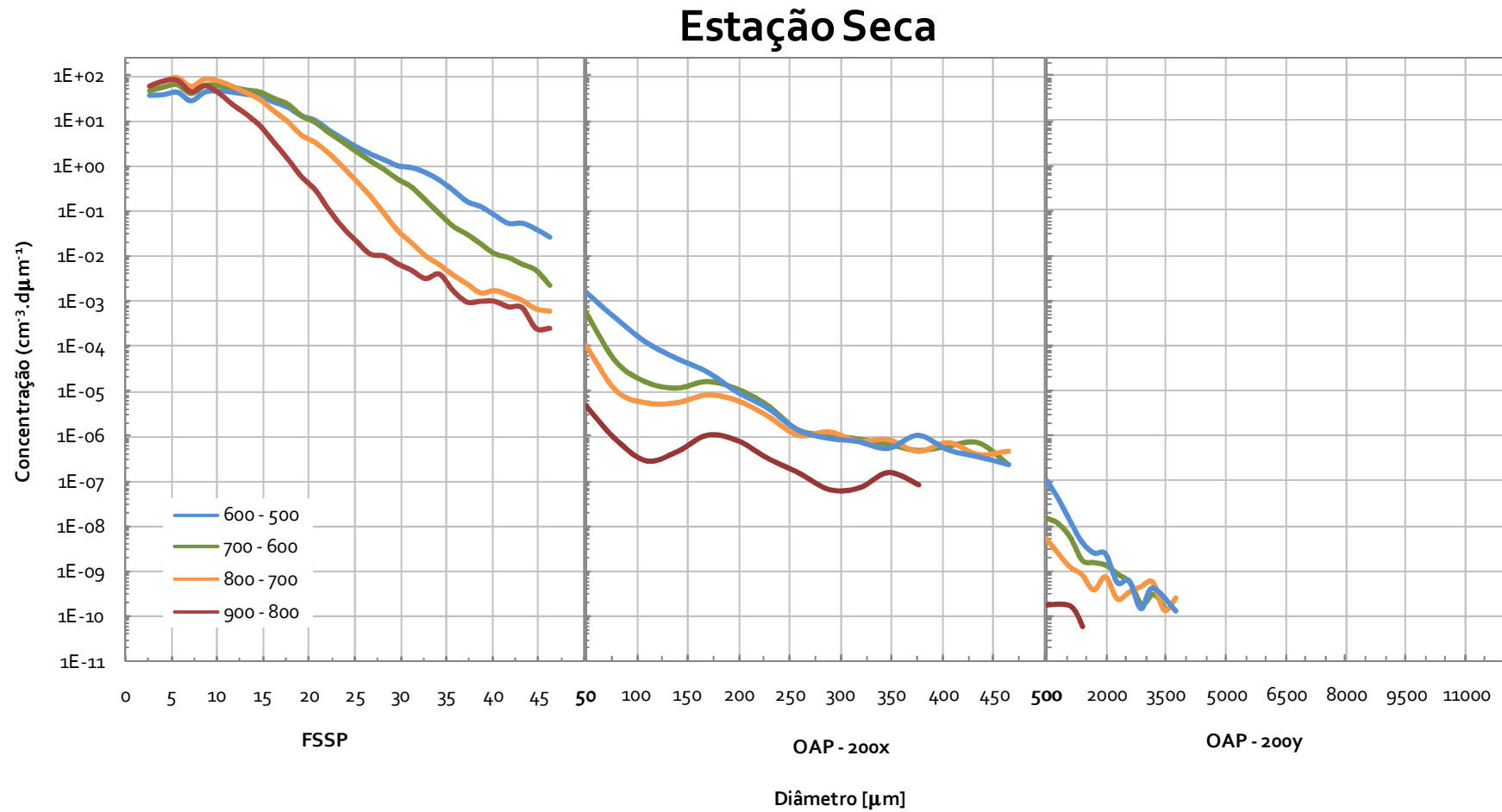


Figura 5.2: Distribuição de tamanho de hidrometeoros, obtidas com os sensores FSSP, 200x e 200y, entre os níveis de pressão de 900 a 500mb, para os casos da Estação Seca.

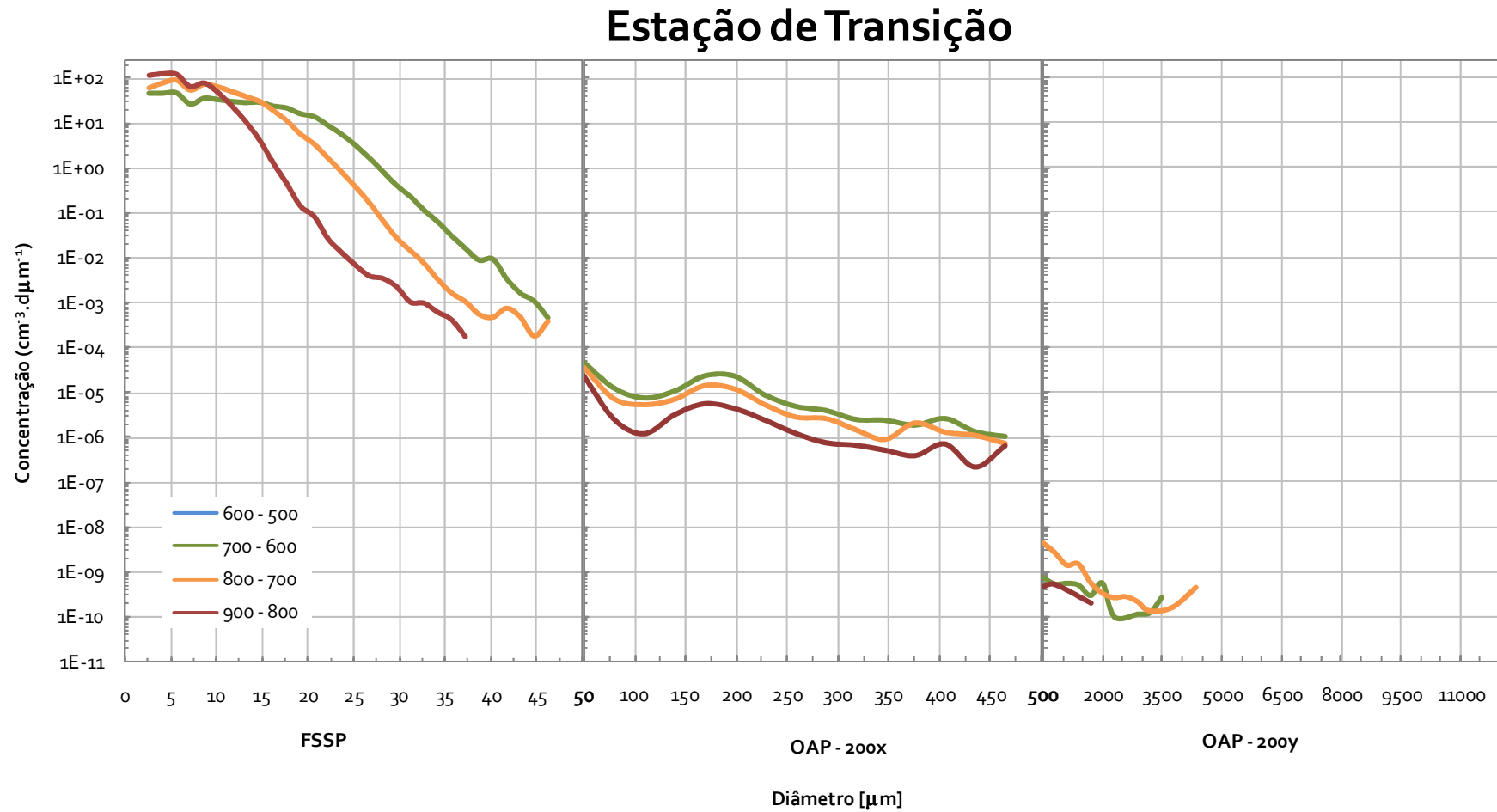


Figura 5.3: Distribuição de tamanho de hidrometeoros, obtidas com os sensores FSSP, 200x e 200y, entre os níveis de pressão de 900 a 500mb, para os casos da Estação de Transição.

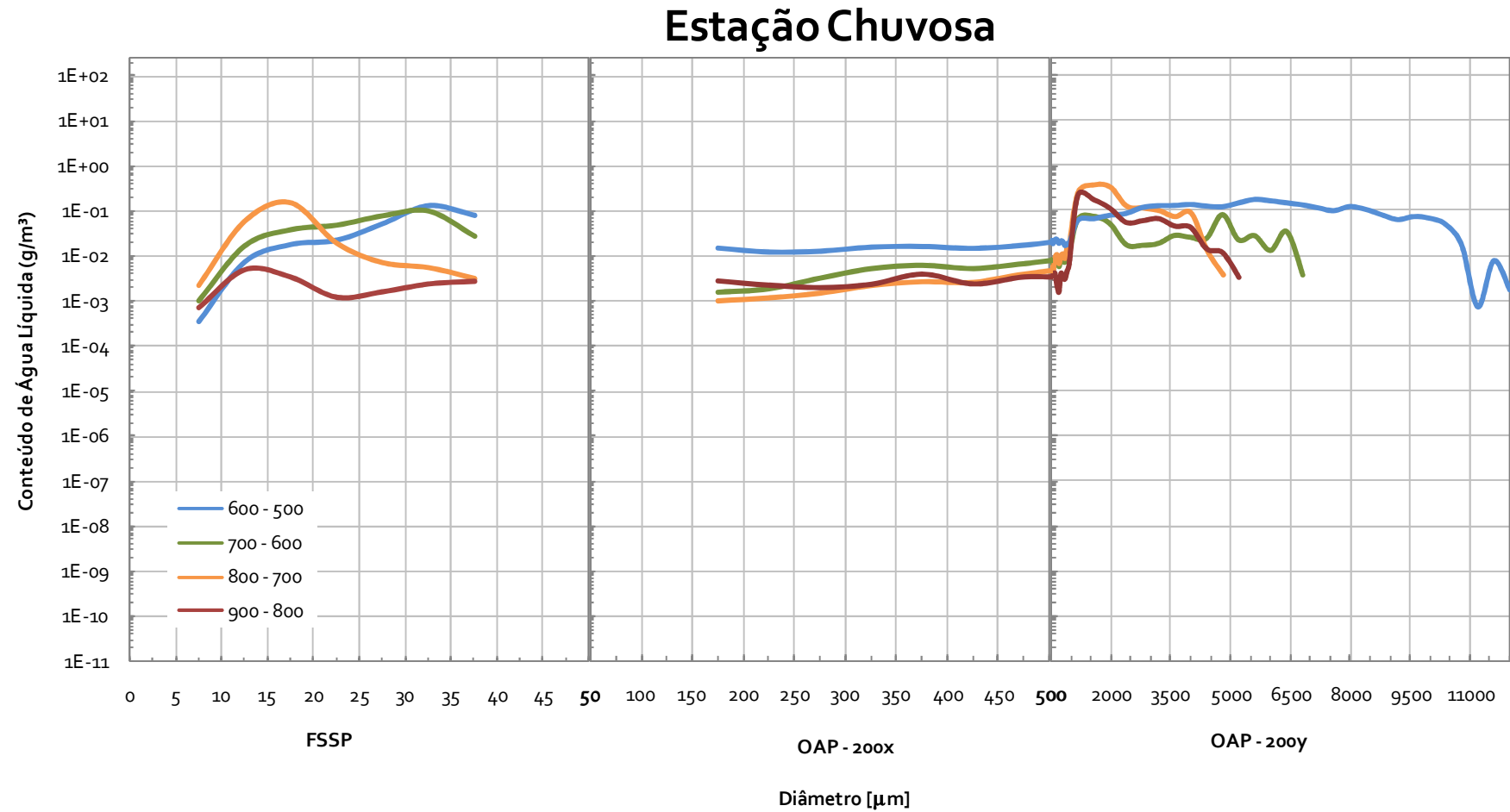


Figura 5.4: Distribuição de conteúdo de água líquida por tamanho, obtida com os sensores FSSP, OAP-2DC e 2DP, entre os níveis de pressão de 900 a 500mb, para os casos da Estação Chuvosa.

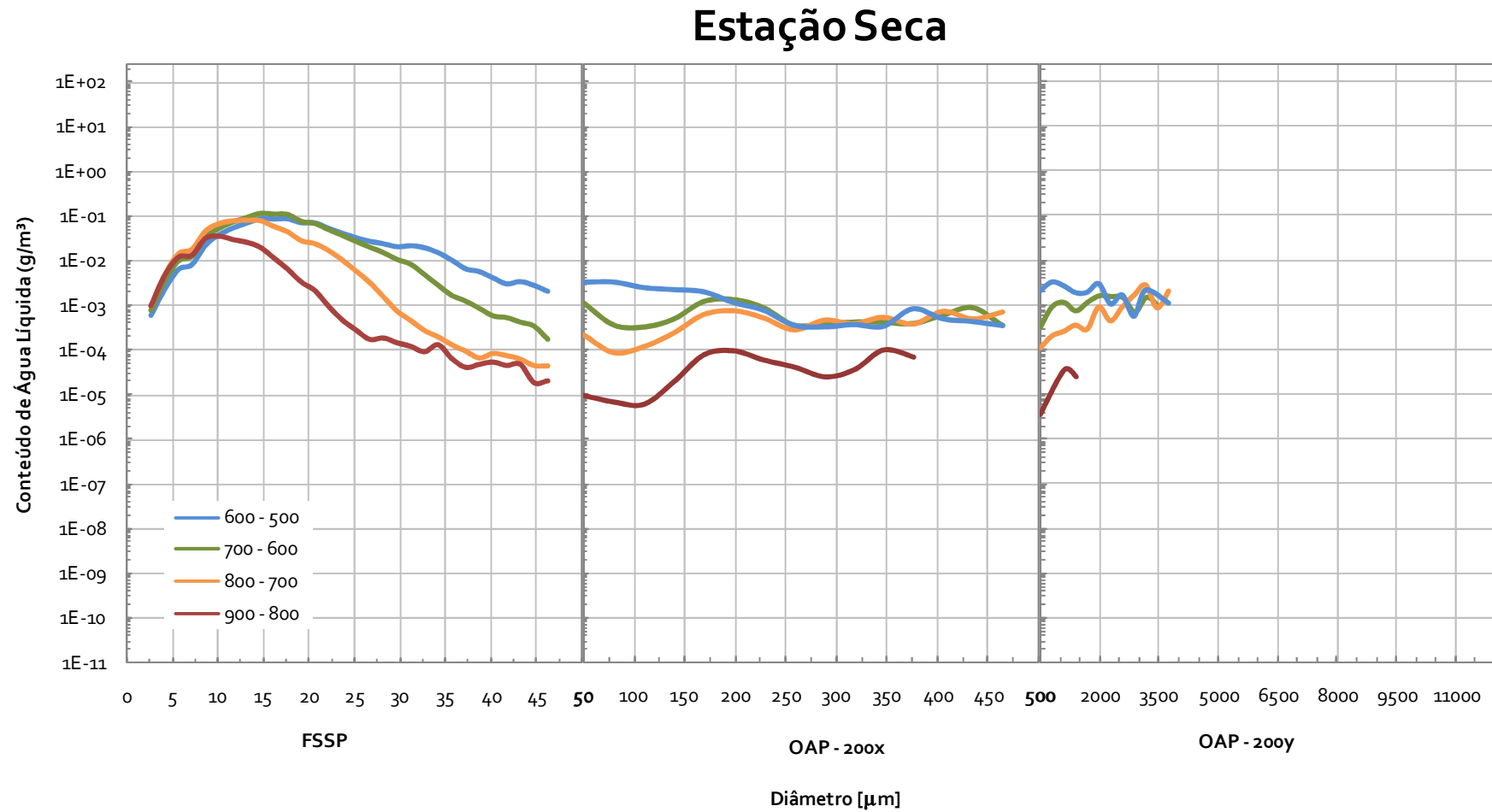


Figura 5.5: Distribuição de conteúdo de água líquida por tamanho, obtida com os sensores FSSP, 200x e 200y, entre os níveis de pressão de 900 a 500mb, para os casos da Estação Seca.

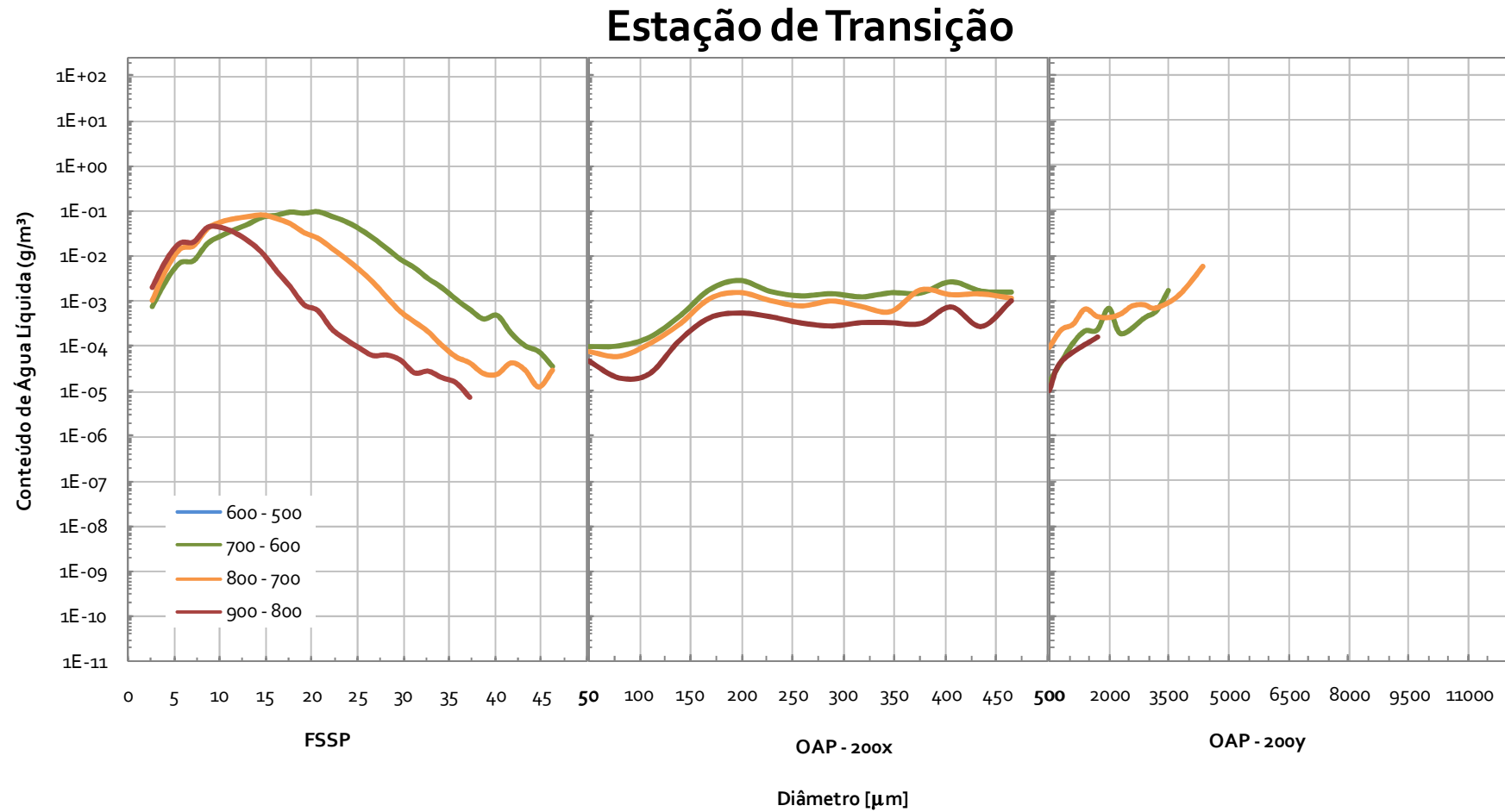


Figura 5.6: Distribuição de conteúdo de água líquida por tamanho, obtida com os sensores FSSP, 200x e 200y, entre os níveis de pressão de 900 a 500mb, para os casos da Estação de Transição.

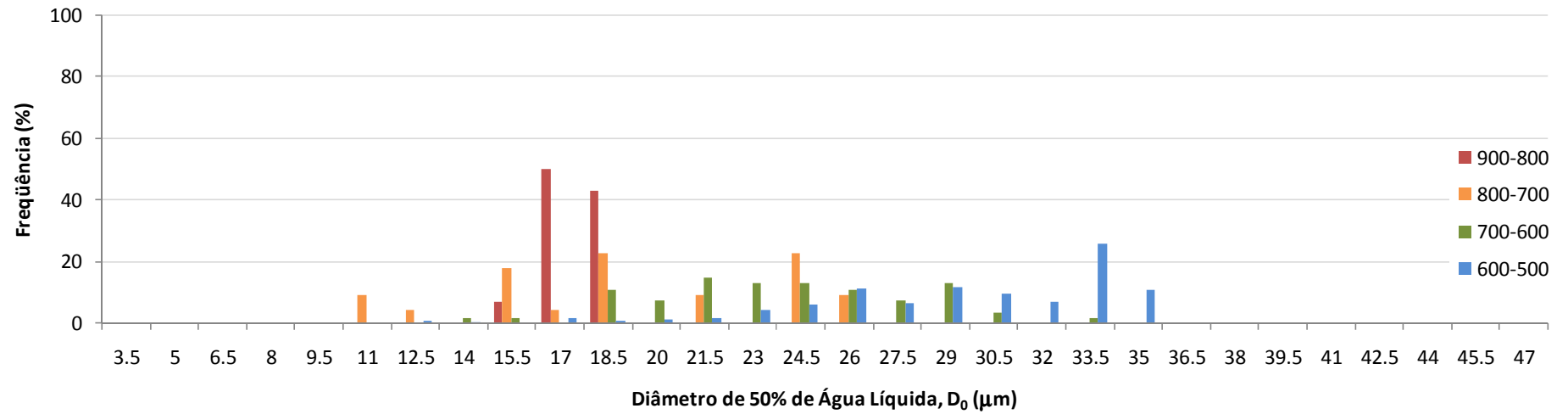


Figura 5.7: Frequência de ocorrência do diâmetro onde o conteúdo de água líquida é 50% (D_0), para as camadas entre os intervalos de pressão, 900-800, 800-700, 700-600 e 600-500mb, para a Estação Chuvosa.

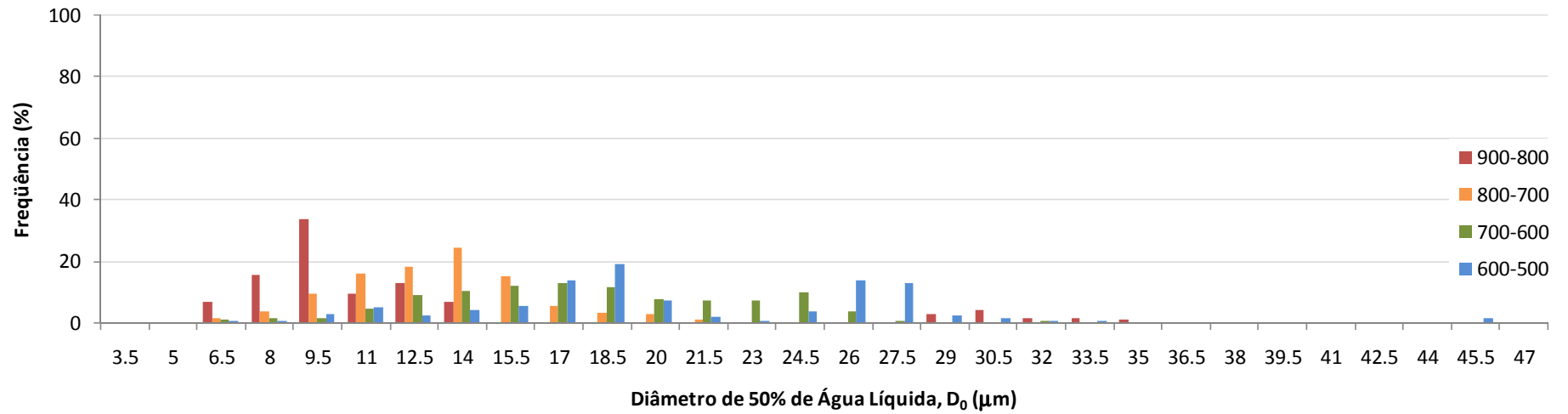


Figura 5.8: Frequência de ocorrência do diâmetro onde o conteúdo de água líquida é 50% (D_0), para as camadas entre os intervalos de pressão, 900-800, 800-700, 700-600 e 600-500mb, para a Estação Seca.

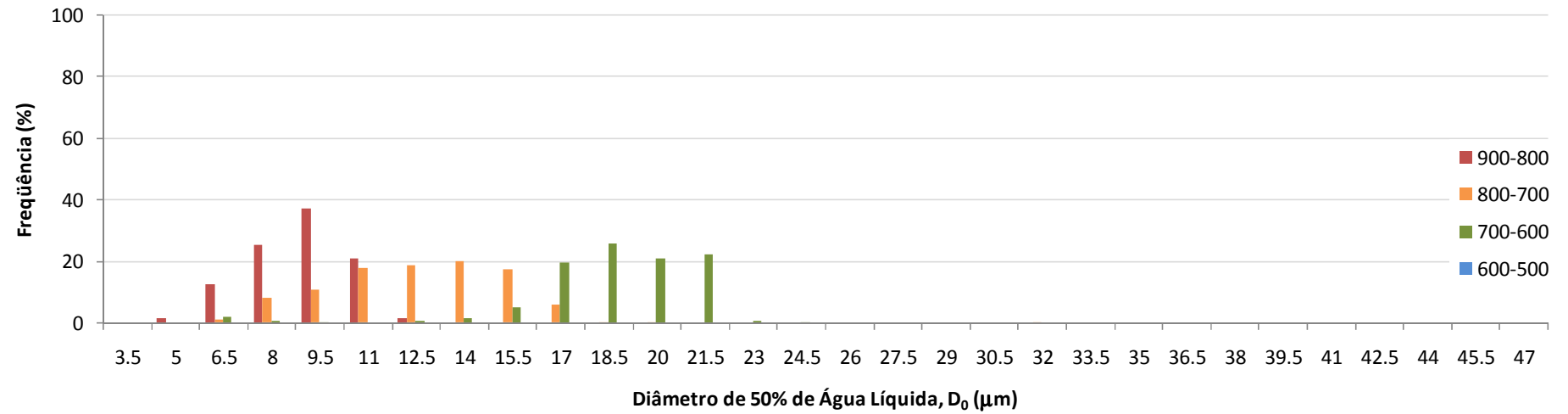


Figura 5.9: Frequência de ocorrência do diâmetro onde o conteúdo de água líquida é 50% (D_0), para as camadas entre os intervalos de pressão, 900-800, 800-700, 700-600 e 600-500mb, para a Estação de Transição.

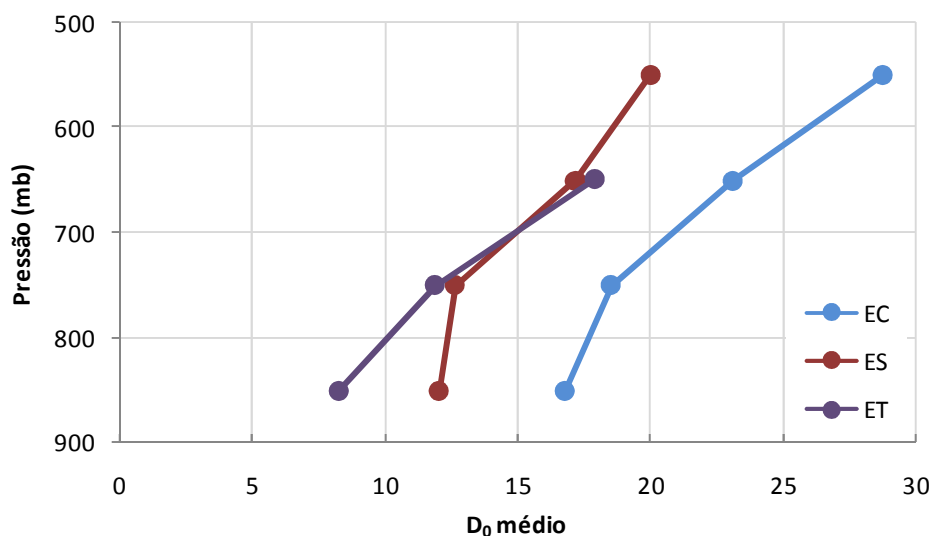


Figura 5.10: Perfil vertical do diâmetro de 50% do conteúdo de água líquida, para as Estações Chuvosa (EC), Seca (ES) e de Transição (ET).

5.2 Poluído × Não Poluído

- **Concentração e LWC**

Neste item são apresentados os resultados relativos às condições de poluição das categorias determinadas para a Estação Seca. Para cada categoria, PPF, MP e IP, há uma distribuição média de gotículas e gotas e uma distribuição média de LWC por tamanho, para camadas representando os níveis de 900-800, 800-700, 700-600 e 600-500mb (Figura 5.11 à Figura 5.16). Assim como no item anterior, é apresentado um histogramas de frequência, para cada categoria, com as ocorrências de D_0 (Figura 5.17 à Figura 5.19), e o perfil vertical do D_0 de cada categoria (Figura 5.20).

A concentração inicial de gotículas do caso PPF na camada da base da nuvem (900-800) foi a maior dentre as categorias da Estação Seca, e se manteve elevada ao longo de todo espectro de gotículas, uma vez que não foram observadas gotículas nesta camada sob condições MP, e sob condições IP, as gotículas da camada simplesmente não se desenvolveram para gotas maiores. Nas camadas acima de 800mb, a concentração de

gotículas (até $16,25\mu\text{m}$) foi maior nos casos poluídos, indicando que houve transporte vertical e ativação dos CCN. Entretanto, a taxa de crescimento das gotículas nos casos PPF foi mais eficiente, pois as gotículas acima de $16,25\mu\text{m}$ começaram a exibir as maiores concentrações da Estação conforme sua ascensão.

O crescimento e o deslocamento da distribuição de LWC indicam que o processo de CC se desenvolveu melhor na categoria PPF que nas restantes. A moda representativa deste processo encontrou-se em $170\mu\text{m}$, e deste ponto em diante, as concentrações da categoria MP ficaram maiores que das categorias PPF e IP, apesar de não terem sido observadas diferenças significativas no LWC nesta parte do espectro. As gotas grandes e precipitáveis apresentaram maior concentração nas camadas mais elevadas, acima de 700mb , sob condições PPF, entretanto, não houve diferença na camada $800\text{-}700\text{mb}$ entre as categorias PPF e MP. Os hidrometeoros sob condições IP apresentaram maiores concentrações e LWC, no entanto, o máximo tamanho foi observado em condições MP.

- **D_0**

A evolução do diâmetro D_0 , ao longo da vertical, da categoria PPF, mostrou que sob tais condições, as gotículas cresceram com mais eficiência, ou seja, distribuições mais amplas. As distribuições de frequência sob condições IP foram as mais estreitas e retrataram a menor eficiência de crescimento de gotículas. Já o MP apresentou um comportamento intermediário às duas, porém com alguns “*outliers*”. Essas distribuições indicam que com o aumento da poluição existe um estreitamento do espectro. Por outro lado, a diminuição de poluição pode ressaltar a presença de aerossóis maiores, que eram suprimidos devido à grande quantidade de partículas pequenas. Esse raciocínio é plausível, pois medidas em PPF apresentam maiores D_0 , que podem ser resultado de aerossóis maiores.

Em termos de crescimento com a altura (Figura 5.20), sob condições PPF, as gotículas cresceram $16\mu\text{m}$ entre a base e o topo da nuvem (900-500mb), e sob condições IP as gotículas cresceram apenas $5,3\mu\text{m}$. Isto pode ser uma consequência da diminuição da concentração e aumento de tamanho dos aerossóis, que permitiu uma melhor eficiência do crescimento por CC. Desconsiderando a camada de 900-800mb das condições MP, já que este nível está associado com a distribuição da Figura 5.18, as condições PPF apresentaram um crescimento de $10,39\mu\text{m}$, a MP $4,51\mu\text{m}$ e IP $2,81\mu\text{m}$. Este resultado pode demonstrar que a diminuição sistemática da concentração de aerossóis tem impacto no aumento do diâmetro das gotículas. Porém, cuidado deve ser tomado com esta afirmação, já que a diminuição da concentração dos aerossóis pode estar associada com o aumento do tamanho dos mesmos. Vale ressaltar que o PPF situava-se sobre regiões de floresta, onde o tamanho dos aerossóis é maior, enquanto que sob MP e IP as medidas foram realizadas sobre área desmatada (Albrecht, 2008).

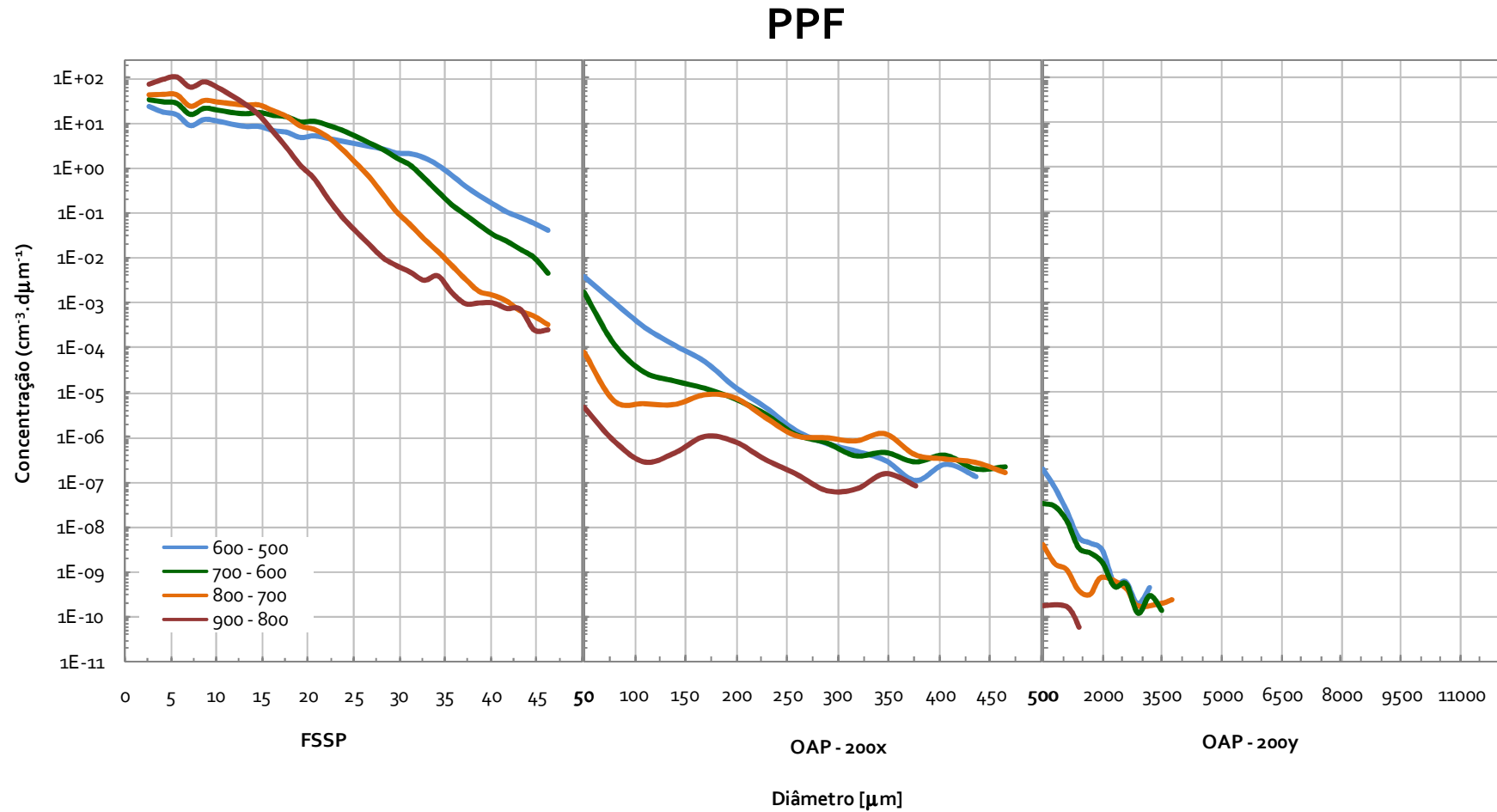


Figura 5.11: Distribuição de tamanho de hidrometeoros, obtidas com os sensores FSSP, 200x e 200y, entre os níveis de pressão de 900 a 500mb, para os casos Pouco Poluídos sobre Floresta da Estação Seca.

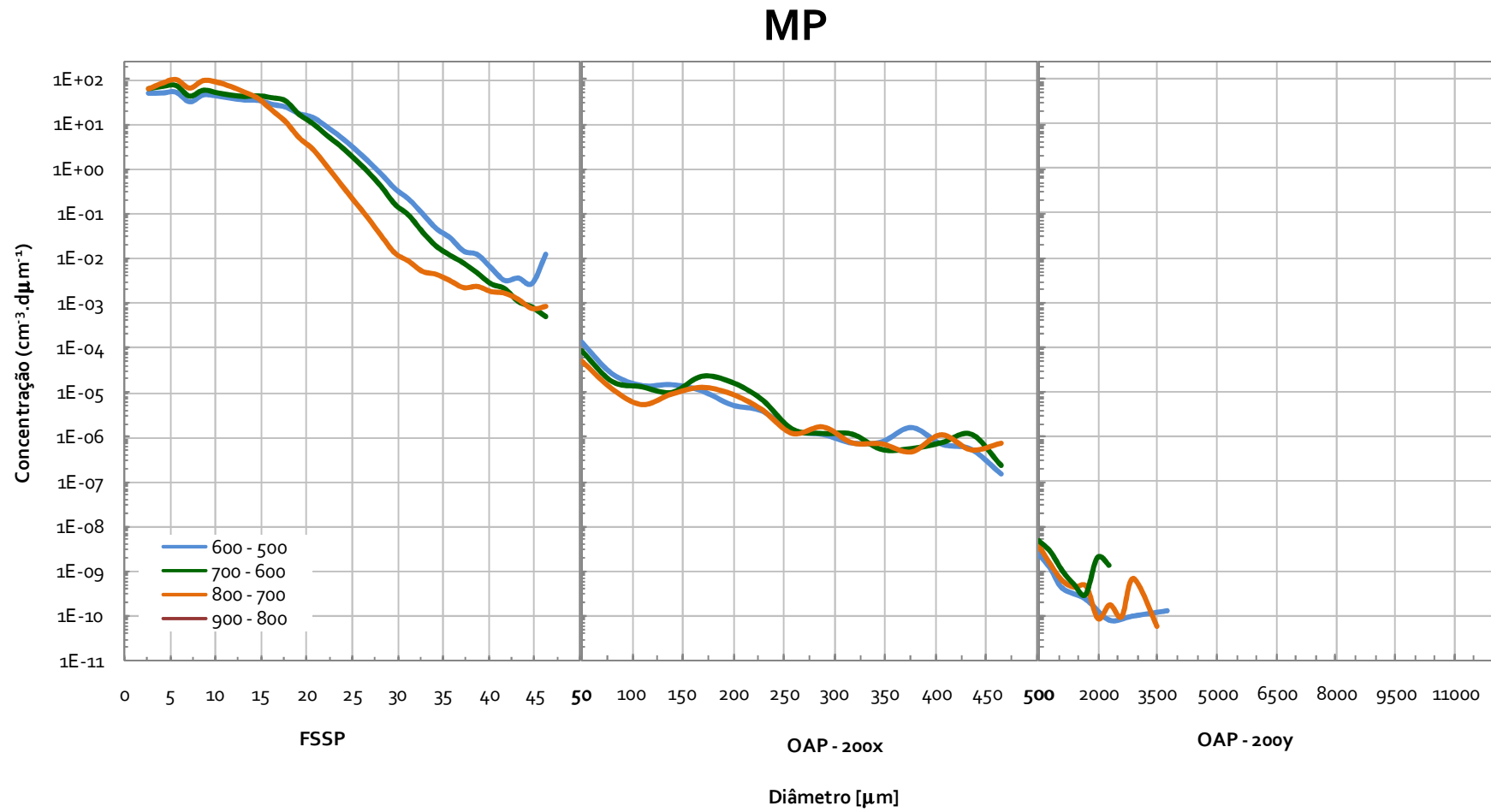


Figura 5.12: Distribuição de tamanho de hidrometeoros, obtidas com os sensores FSSP, 200x e 200y, entre os níveis de pressão de 900 a 500mb, para os casos Moderadamente Poluídos da Estação Seca.

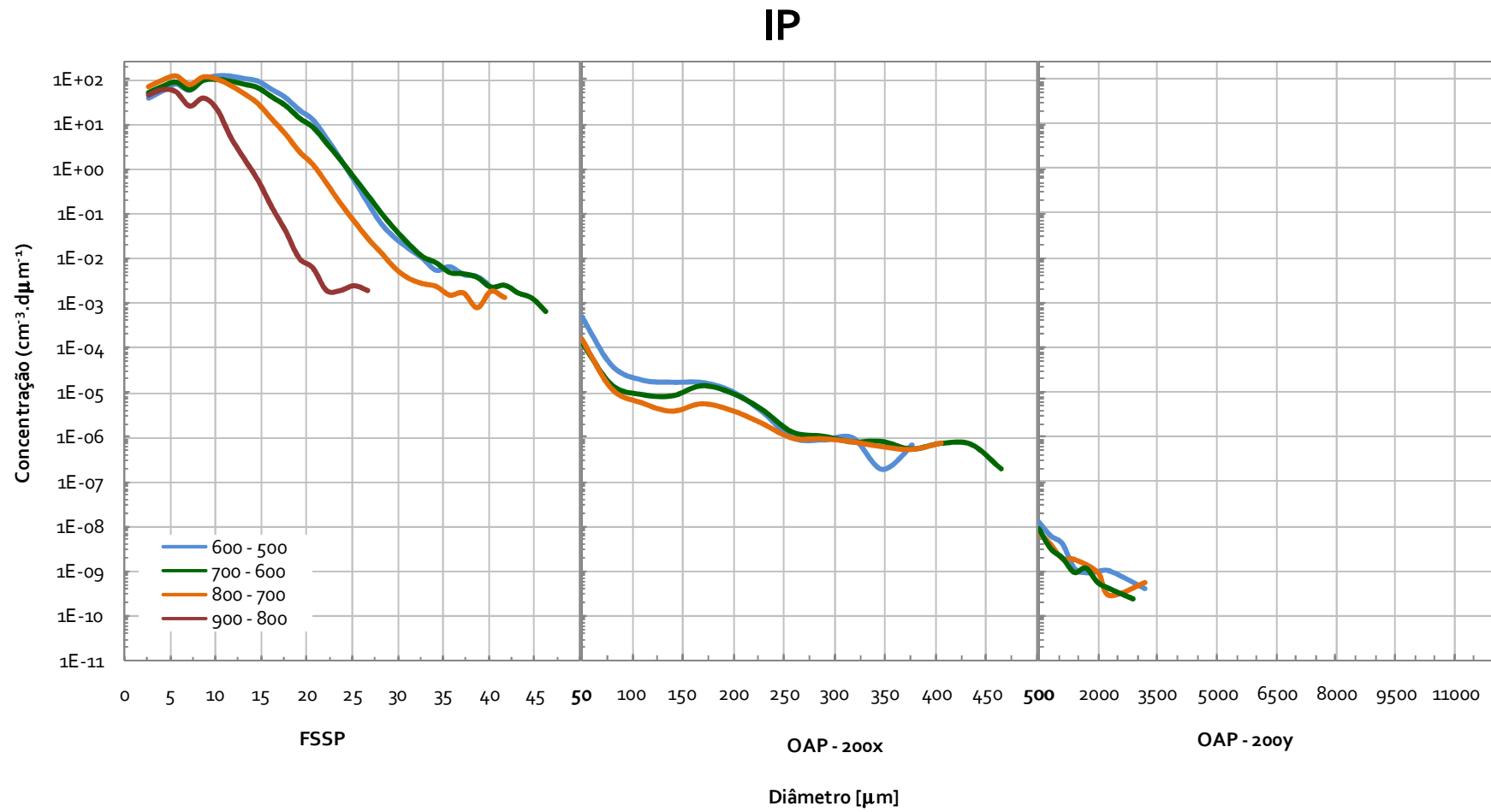


Figura 5.13: Distribuição de tamanho de hidrometeoros, obtidas com os sensores FSSP, 200x e 200y, entre os níveis de pressão de 900 a 500mb, para os casos Intensamente Poluídos da Estação Seca.

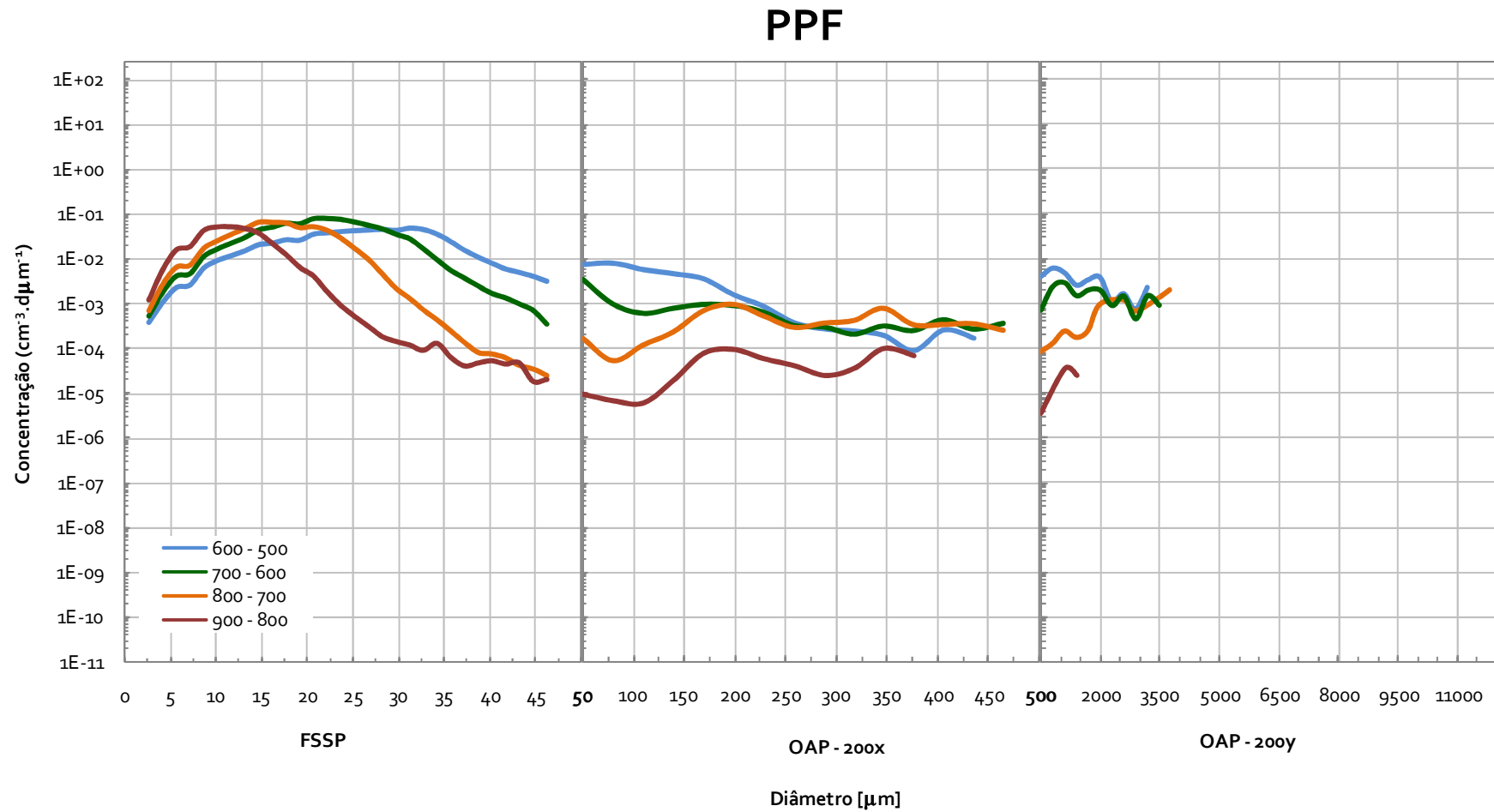


Figura 5.14: Distribuição de conteúdo de água líquida por tamanho, obtida com os sensores FSSP, 200x e 200y, entre os níveis de pressão de 900 a 500mb, para os casos Pouco Poluídos sobre Floresta da Estação Seca.

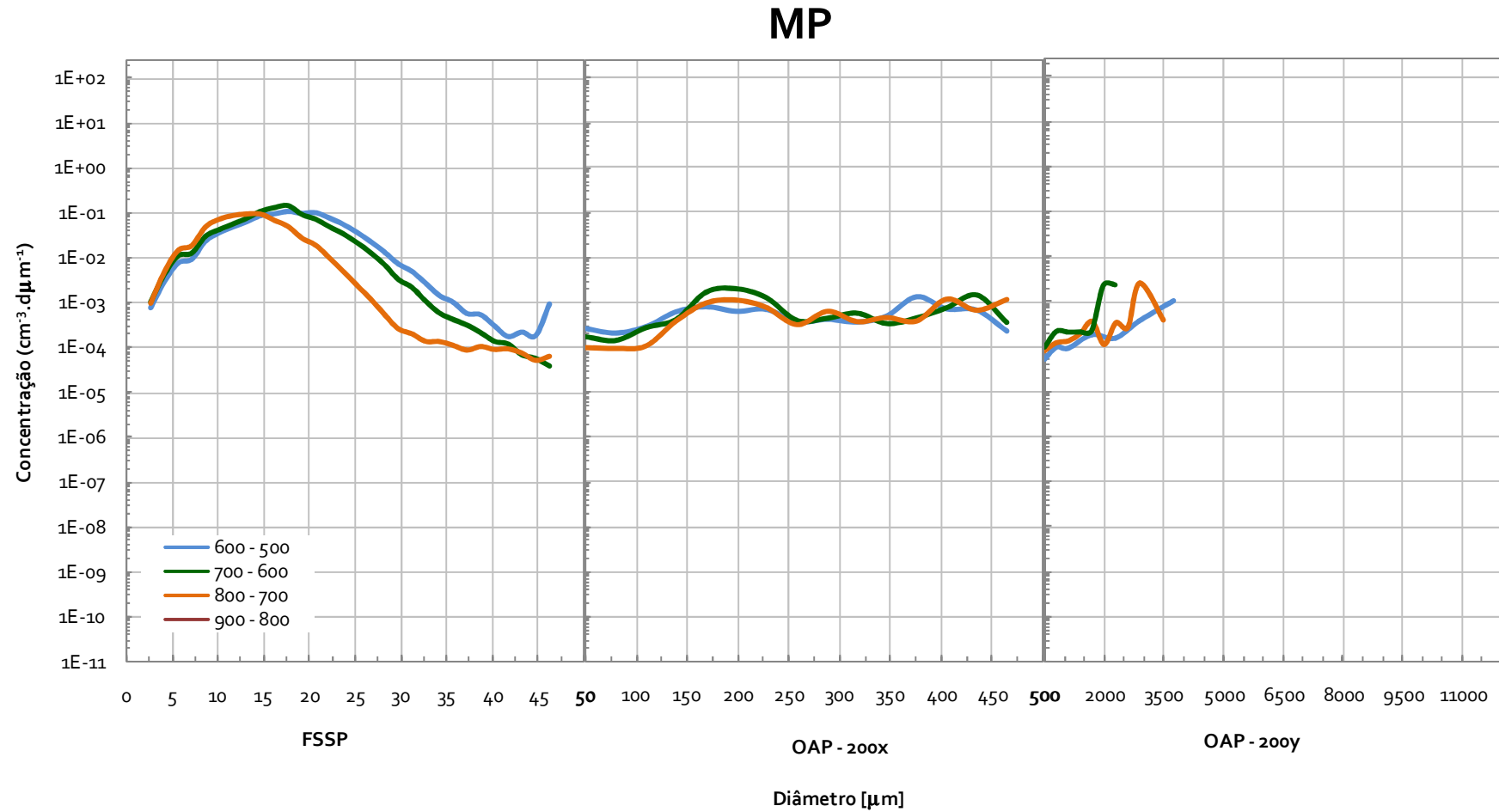


Figura 5.15: Distribuição de conteúdo de água líquida por tamanho, obtida com os sensores FSSP, 200x e 200y, entre os níveis de pressão de 900 a 500mb, para os casos Moderadamente Poluídos da Estação Seca.

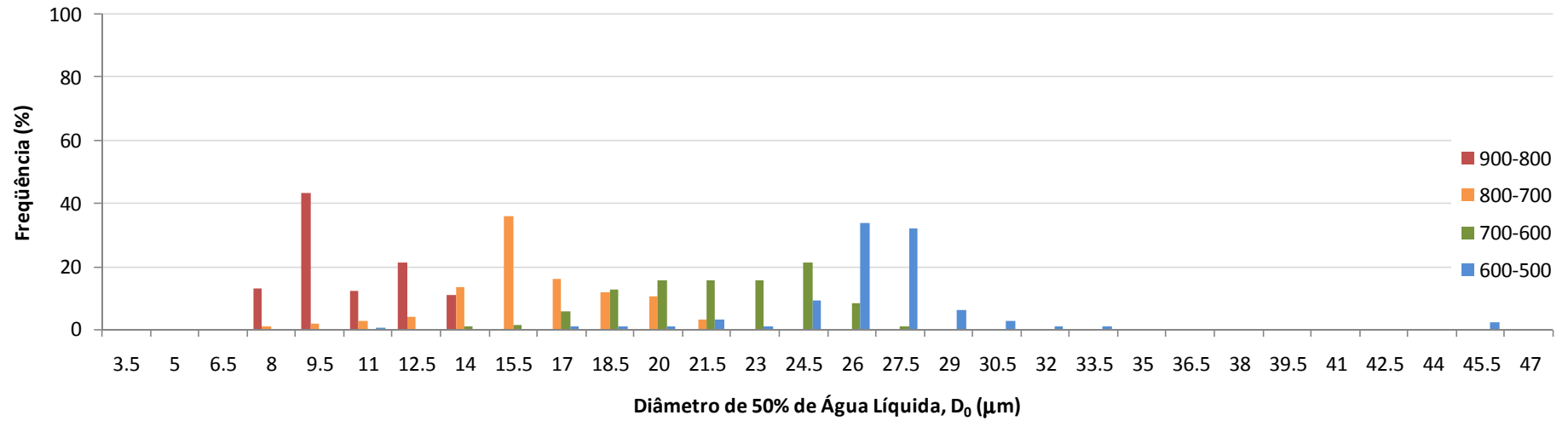


Figura 5.17: Frequência de ocorrência do diâmetro onde o conteúdo de água líquida é 50% (D_0), para as camadas entre os intervalos de pressão, 900-800, 800-700, 700-600 e 600-500mb, sob condições Pouco Poluídas sobre Floresta (PPF) da Estação Seca.

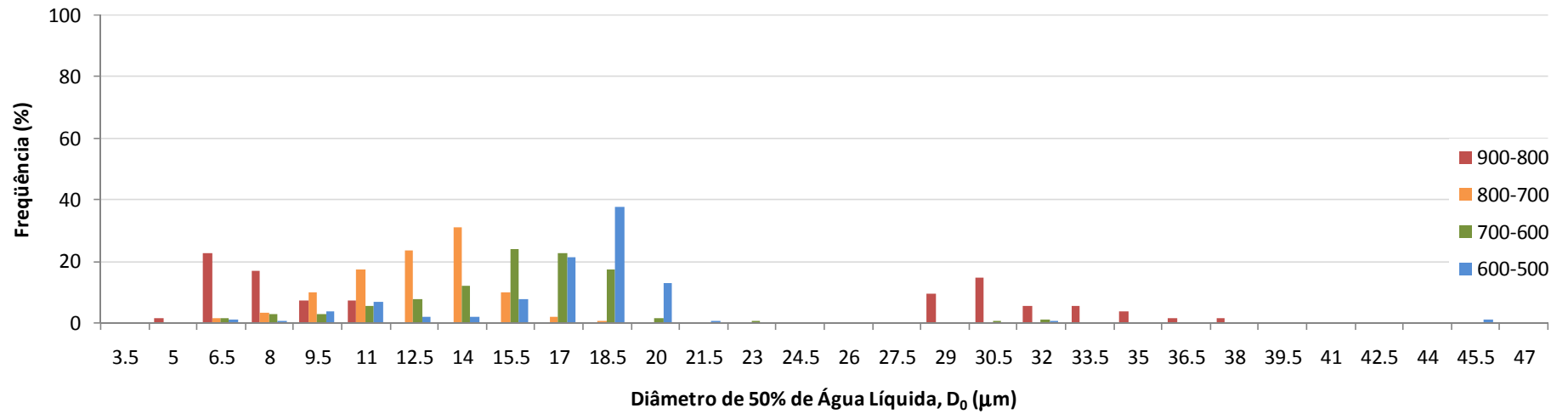


Figura 5.18: Frequência de ocorrência do diâmetro onde o conteúdo de água líquida é 50% (D_0), para as camadas entre os intervalos de pressão, 900-800, 800-700, 700-600 e 600-500mb, sob condições Moderadamente Poluídas (MP) da Estação Seca.

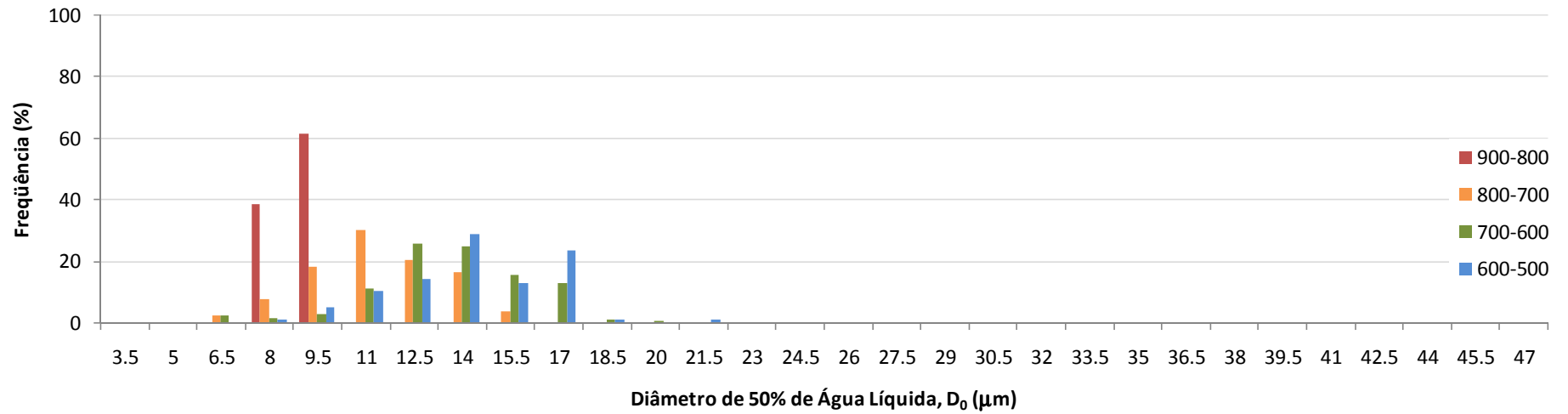


Figura 5.19: *Freqüência de ocorrência do diâmetro onde o conteúdo de água líquida é 50% (D_0), para as camadas entre os intervalos de pressão, 900-800, 800-700, 700-600 e 600-500mb, sob condições Intensamente Poluídas (MP) da Estação Seca.*

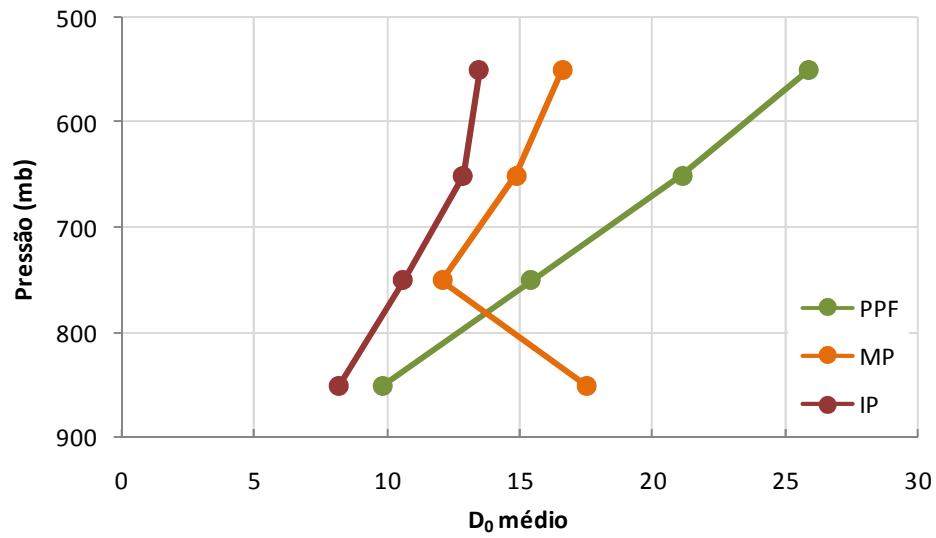


Figura 5.20: Perfil vertical do diâmetro de 50% do conteúdo de água líquida, para as categorias Pouco Poluído sobre Floresta (PPF), Moderadamente Poluído (MP) e Intensamente Poluído (IP), da Estação Seca.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho foi fundamentado em medidas microfísicas das nuvens realizadas por aviões instrumentados durante as campanhas experimentais WetAMC, 1999 e Dry-to-Wet/RACCI, 2002. Os dados de ambas as campanhas foram uniformizados, calibrados e ajustados, e os arquivos dos vôos foram filtrados de forma a conter somente amostras tomadas dentro das nuvens. Todo o trabalho em tratar estes dados foi empenhado não apenas para esta pesquisa, mas também com intuito de construir uma base de dados que poderá ser utilizada por outros pesquisadores em trabalhos futuros.

Uma metodologia foi desenvolvida para classificar as amostragens resultantes do tratamento de dados, estabelecida em função de alguns critérios como, estação do ano, condição atmosférica de poluição, registros do “*Log Book*” dos aviões e cobertura vegetal. Uma vez classificadas, a caracterização das nuvens foi desenvolvida com base nos perfis verticais de concentração e LWC dos hidrometeoros, assim como das suas distribuições de tamanho em diferentes níveis de pressão. Cada amostragem foi discutida individualmente para posteriormente constituírem um grupo representativo de cada estação: Chuvosa, Seca e de Transição. Além do perfil geral de cada estação, as amostragens realizadas durante a Estação Seca deu origem a três categorias, Pouco Poluído sobre Floresta, Moderadamente Poluído e Intensamente Poluído, que também foram comparadas entre si de forma a caracterizar os principais aspectos microfísicos consequentes da poluição emitida por queimadas.

As diferenças observadas entre as estações e entre as condições de poluição foram bem evidentes. Os principais valores encontrados para cada estação e condição de poluição encontram-se na Tabela 6.1. A comparação entre as estações mostrou maior eficiência de crescimento na Estação Chuvosa, tanto para o processo de crescimento por condensação, quanto para o de CC. Durante a Estação Chuvosa o D_0 variou entre 16,8 e 28,7 μm , a moda de

crescimento por condensação ocorreu em $12,5\mu\text{m}$ e a moda de CC ficou situada em $32,5\mu\text{m}$; no caso da Estação Seca, a variação do D_0 foi de $12,1$ a $20,0\mu\text{m}$, sendo que a moda de condensação ocorreu em $5,75\mu\text{m}$ e a moda mais evidente de CC ficou em $170\mu\text{m}$; na Estação de Transição, a variação do D_0 , entre as camadas de 900-600mb, foi de $8,3$ a $17,9\mu\text{m}$, e as modas de condensação e CC ficaram em $5,75$ e $170\mu\text{m}$.

As Estações Seca e de Transição apresentaram concentrações maiores na região da moda de condensação (máximo de $93,8\text{cm}^{-3}\mu\text{m}^{-1}$ em $5,75\mu\text{m}$ e $126,0$ em $5,75\mu\text{m}$, para as Estações Seca e de Transição, respectivamente), entretanto, o diâmetro médio destas gotículas foi menor que os diâmetros vistos nesta mesma moda durante a Estação Chuvosa ($11,68\text{cm}^{-3}\mu\text{m}^{-1}$ em $12,5\mu\text{m}$).

A Estação Chuvosa caracterizou-se por um crescimento de gotículas eficaz, onde o processo de condensação auxiliou na eficiência de coleta do processo de CC, uma vez que foi atingida em diâmetros menores do que os observados durante as outras estações. Como consequência, a Estação Chuvosa também apresentou as maiores concentrações e LWC provenientes de gotas médias, grandes e precipitáveis, assim como o tamanho máximo obtido por estes hidrometeoros. O máximo LWC proveniente da OAP-2DC foi de $0,3\text{g/m}^3$, da OAP-2DP, $2,7\text{g/m}^3$ e os hidrometeoros atingiram 12mm de diâmetro. Já nas Estações Seca e de Transição, o máximo LWC proveniente da OAP-200x foi de $0,02\text{g/m}^3$ para ambas as estações, o LWC da OAP-200y foi de $0,02$ e $0,01\text{g/m}^3$, e os hidrometeoros chegaram a $3,8$ e $4,4\text{mm}$ de diâmetro, respectivamente. Porém, vale ressaltar que durante 2002 o avião não realizou vôos abaixo da isoterma de 0°C , podendo então ser um reflexo da amostragem de dados.

A maior eficiência de crescimento observada em ambos os processos na Estação Chuvosa, e também ao longo da vertical, pode ter sido causada tanto pelo excesso de vapor, distribuído em uma quantidade menor de CCN, quanto por uma maior fração de CCN grandes que ficam disponíveis nesta estação. Durante a Estação Chuvosa o D_0 variou $12\mu\text{m}$ ao longo

da vertical, e na Estação Seca, essa variação foi de $7,8\mu\text{m}$. No caso da Estação de Transição, a variação do D_0 , entre as camadas de 900-600mb, foi de $9,5\mu\text{m}$ ($6,3$ e $5,1\mu\text{m}$ para as Estações Chuvosa e Seca, respectivamente, nas camadas equivalentes).

A Estação de Transição apresentou um desenvolvimento das gotículas ao longo da vertical ligeiramente mais eficiente que o observado na Estação Seca, possivelmente causado pelo aumento da disponibilidade de vapor d'água e diminuição da concentração de aerossóis.

As condições de poluição derivadas da Estação Seca mostraram que em ambiente PPF houve mais eficiência de crescimento no início do processo de CC, entretanto, as diferenças entre as concentrações e LWC de gotas médias, grandes e precipitáveis não foram significativas. O perfil vertical do D_0 indicou uma maior taxa de crescimento das gotículas sob condições PPF ($16\mu\text{m}$ em PPF contra $5,3\mu\text{m}$ em IP) e apontou um estreitamento do espectro das distribuições proporcional à intensidade da poluição, que poderia ter sido causado pela maior concentração de aerossóis pequenos.

		1ª Moda	Conc	LWC	2ª Moda	Conc	LWC	D _{máx}	D ₀	LWC _{FSSP}	LWC _{2DC/200x}	LWC _{2DP/200y}
		μm	$cm^{-3} \mu m^{-1}$	g/m^3	μm	$cm^{-3} \mu m^{-1}$	g/m^3	μm	μm	g/m^3	g/m^3	g/m^3
EC	600-500	12,5	1,51	7,7E-03	32,5	1,5E+00	1,4E-01	12000	28,7	0,33	3,0E-01	2,7E+00
	700-600	12,5	3,26	1,7E-02	32,5	1,1E+00	9,7E-02	6800	23,1	0,30	1,1E-01	5,1E-01
	800-700	12,5	11,58	5,9E-02	32,5	6,1E-02	5,5E-03	4800	18,5	0,25	1,1E-01	1,5E+00
	900-800	12,5	0,98	5,0E-03	32,5	2,7E-02	2,4E-03	5200	16,8	0,02	5,4E-02	8,1E-01
ES	600-500	5,75	42,73	6,4E-03	170	2,6E-05	2,0E-03	3750	20,0	0,91	1,9E-02	2,1E-02
	700-600	5,75	66,76	1,0E-02	170	1,6E-05	1,2E-03	3465	17,2	0,94	9,6E-03	1,2E-02
	800-700	5,75	93,86	1,4E-02	170	8,3E-06	6,4E-04	3750	12,6	0,57	6,7E-03	1,1E-02
	900-800	5,75	79,51	1,2E-02	170	1,0E-06	7,8E-05	1400	12,1	0,20	5,5E-04	6,2E-05
ET	600-500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	700-600	5,75	49,09	7,3E-03	170	2,3E-05	1,8E-03	3465	17,9	0,87	2,0E-02	4,2E-03
	800-700	5,75	92,38	1,4E-02	170	1,4E-05	1,1E-03	4350	11,9	0,56	1,3E-02	1,2E-02
	900-800	5,75	125,97	1,9E-02	170	5,4E-06	4,2E-04	1700	8,3	0,21	5,1E-03	2,1E-04

PPF	600-500	2,75	23,20	3,8E-04	170	4,7E-05	3,6E-03	3175	25,8	0,65	3,4E-02	3,0E-02
	700-600	2,75	33,25	5,4E-04	170	1,2E-05	9,6E-04	3465	21,1	0,81	1,1E-02	1,7E-02
	800-700	2,75	43,89	7,2E-04	170	8,7E-06	6,7E-04	3750	15,4	0,55	5,8E-03	7,0E-03
	900-800	5,75	106,8	1,6E-02	170	1,0E-06	7,8E-05	1400	9,9	0,33	5,5E-04	6,2E-05
MP	600-500	5,75	50,64	7,6E-03	140	1,5E-05	6,3E-04	3750	16,6	0,88	8,3E-03	2,0E-03
	700-600	5,75	73,68	1,1E-02	170	2,3E-05	1,8E-03	2290	14,8	0,92	1,1E-02	5,7E-03
	800-700	5,75	97,51	1,5E-02	170	1,3E-05	9,7E-04	3465	12,1	0,62	8,7E-03	4,5E-03
	900-800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IP	600-500	10,25	124,80	1,1E-01	170	1,7E-05	1,3E-03	3175	13,5	1,45	8,0E-03	7,8E-03
	700-600	10,25	98,24	8,3E-02	170	1,4E-05	1,1E-03	2880	12,9	1,04	8,1E-03	4,4E-03
	800-700	5,75	121,47	1,8E-02	170	5,4E-06	4,2E-04	3175	10,6	0,55	4,9E-03	6,0E-03
	900-800	4,25	57,65	3,5E-03	-	-	-	26,75	8,2	0,07	0	0

Tabela 6.1: Síntese das principais valores obtidos para cada Estação (EC, ES e ET) e condição de poluição da Estação Seca (PPF, MP e IP). As colunas, da esquerda para a direita, representam: O diâmetro médio das gotículas que compuseram a 1ª moda da distribuição; a concentração na 1ª moda; o LWC na 1ª moda; o diâmetro médio das gotículas da 2ª moda; a concentração na 2ª moda; o LWC na 2ª moda; o diâmetro máximo observado; o diâmetro onde o LWC é 50%, o LWC total de cada sensor, FSSP, OAP-2DC/200x e OAP-2DP/200y.

7 REFERÊNCIAS

- Albrecht, B. A., 1989. Aerosols, cloud microphysics and fractional cloudiness. *Science*, 245, 1227.
- Albrecht, R. I., 2008. Eletrificação dos sistemas precipitantes na região Amazônica: Processos físicos e dinâmicos do desenvolvimento de tempestades. Tese de Doutorado, IAG-USP.
- Almeida, F. C., 1976. The collision problem of cloud droplets moving in a turbulent environment. Part I: A method of solution. *J. Atmos. Sci.*, 33, 1571–1578.
- Almeida, F. C., 1979. The collision problem of cloud droplets moving in a turbulent environment. Part II: Turbulent collision efficiencies. *J. Atmos. Sci.*, 36, 1564–1576.
- Andreae, M. O., D. Rosenfeld, P. Artaxo, A. A. Costa, G. P. Frank, K. M. Longo, e M. A. F. Silva Dias, 2004. Smoking Rain Clouds over the Amazon. *Science* 303 (5662), 1337. [DOI: 10.1126/science.1092779].
- Artaxo, P., J. V. Vanderlei Martins, M. A. Yamasoe, A. S. Procópio, T. M. Pauliquevis, M. O. Andreae, P. Guyon, L. V. Gatti, e A. M. Cordova Leal, 2002. Physical and chemical properties of aerosols in the wet and dry seasons in Rondônia, Amazônia. *J. Geophys. Res.*, 107, doi: 10.1029/2001JD000666.
- Baker, M. B., R. G. Corbin, e J. Latham, 1980. The influence of entrainment on the evolution of cloud droplet spectra: I. A model of inhomogeneous mixing, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 106, 581–598.
- Borovikov, A. M. et al. 1963. *Cloud Physics*, p65. Trad. pelo Programa para Trad. Cient. de Israel, Dept. Com. EUA, Washington, D. C.
- Carey, L.D., R. Cifelli, W.A. Petersen, e S.A. Rutledge, 2001. Characteristics of Amazonian Rain Measured During TRMM-LBA. Preprint Volume, American Meteorological Society 30th International Radar Conference, Munich, Germany, 19-24 July.
- Conant, W.C., A. Nenes, e J.H. Seinfeld, 2002. Black carbon radiative heating effects on cloud microphysics and implications for the aerosol indirect effect. 1. Extended Köhler theory, *J. Geophys. Res.*, 107, D21, 4604, doi:10.1029/2002JD002094.
- Costa, A. A. e S. Sherwood, 2005. Parcel model simulations of aerosol - warm phase cloud microphysics interactions over the Amazon. *Atmospheric Chemistry And Physics Discussions* 5, 481-508.
- Delene, D. J., e J. A. Ogren, 2002. Variability of aerosol optical properties at four North American surface monitoring sites, *Journal of Atmospheric Sciences*, 59, 1135-1150.
- Freud, E., D. Rosenfeld, M. O. Andreae, A. A. Costa, e P. Artaxo, 2008. Robust relations between CCN and the vertical evolution of cloud drop size distribution in deep convective clouds. *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 1661-1675.

- Gunn, R. e G. D. Kinzer, 1949. The terminal velocity of fall for waterdrops in stagnant air. *J. Meteor.*, 6, 243.
- Guyon, P., Frank, G., Welling, M., Chand, D., Artaxo, P., Rizzo, L., Nishioka, G., Kolle, O., Fritsch, H., Silva-Dias, M. A., Gatti, L. V., Cordova, A.M., e Andreae, M. O., 2005. Airborne measurements of trace gas and aerosol particle emissions from biomass burning in Amazonia, *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 2989–3002.
- Harrington, J.Y., G. Feingold, and W.R. Cotton, 2000. Radiative impacts on the growth of a population of drops within simulated summertime arctic stratus, *J. Atmos. Sci.*, 57, 766–785.
- Hegg, D.A., L.F. Radke, e P.V. Hobbs, 1991. Measurements of Aitken nuclei and cloud condensation nuclei in the marine atmosphere and their relation to the DMS-cloud-climate hypothesis, *J. Geophys. Res.*, 96, 18727–18,733.
- Hobbs, P. V., M. K. Politovich e L. F. Radke, 1980. The Structures of Summer Convective Clouds in Eastern Montana. I: Natural Clouds. *J. Appl. Meteor.* 19, 645.
- Hudson, J. G., J. Hallett, e C. F. Rogers, 1991. Field and laboratory measurements of cloud-forming properties of combustion aerosols, *J. Geophys. Res.*, 96, 10,847-10,859.
- Huffman et al. 1997.
- Kaufman, Y. J., I. Koren, L. A. Remer, D. Rosenfeld, Y. Rudich, 2005. The effect of smoke, dust, and pollution aerosol on cloud development over the Atlantic Ocean. *Science*, 102, 32, 11209,
- Klett, J. D. e M. H. Davis, 1973. Theoretical collision efficiencies of cloud droplets at small Reynolds numbers. *J. Atmos. Sci.*, 30, 107-117.
- King, W. D., C. T. Maher, and G. A. Hepburn, 1981. Further performance tests on the CSIRO liquid water probe. *J. Appl. Meteor.*, 20, 195–202.
- Kingsmill, D. E., S. E. Yuter, A. J. Heymsfield, P. V. Hobbs, A. V. Korolev, J. L. Stith, A. Bansemer, J. A. Haggerty, and A. L. Rangno, 2004. TRMM common microphysics products: A tool for evaluating spaceborne precipitation retrieval algorithms. *J. Appl. Meteor.*, 43, 1598-1618.
- Kohler, H., 1921. Zur kondensation des wasserdampfe in der atmosphere, *Geofys. Publ.*, 2, 3–15.
- Kummerow, C., W. Barnes, T. Kozu, J. Shiue, and J. Simpson, 1998. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 15, 809-816.
- Laurent, H., L. A. T. Machado, C. A. Morales e L. Durieux, 2002. Characteristics of the Amazonian mesoscale convective systems observed from satellite and radar during the WETAMC/LBA experiment. *J. Geophys. Res.*, 107, (D20).

- Lawson, R.P. e W. A. Cooper 1990. Performance of Some Airborne Thermometers in Clouds. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 7, 480-494.
- Levizzani, V., R. Amorati, e F. Meneguzzo, 2002. A review of satellite-based rainfall estimation methods. European Commission Project MUSIC Report (EVK1-CT-2000-00058, <http://www.isac.cnr.it/meteosat/pub.html>), 66 pp.
- Magono, C., and C. W. Lee, 1966. Meteorological classification of natural snow crystals. *J. Fac. Sci. Hokkaido Univ. Ser. VII*, 2, 321–335.
- Marshall, J. S., e W. McK. Palmer, 1948. The distribution of raindrops with size. *J. Meteor.* 5, 165-166.
- Massambani, O. e C. A. Morales, 1990. Specific Attenuation as Inferred from Drop Size Distribution Measurements in the Tropics. Regional Factors in Predicting Radiowave Attenuation Due to Rain – URSI Comm. F. Open Symp., Rio de Janeiro, 25-28.
- Martins, J. A., 2006. Efeitos dos núcleos de condensação na formação de nuvens e o desenvolvimento da precipitação na Região Amazônica durante a estação seca. Tese de Doutorado, IAG-USP.
- Mason, B. J., 1971. *The Physics of Clouds*. Clarendon Press, Oxford, 671pp.
- McDonald, J. E., 1958. The Physics of Cloud Modification. *Advances in Geophysics*, vol 5, 223–303, Academic Press Inc., New York.
- Morales C. A., Machado L. A. T., Silva Dias M. A. F., Amorim W., Frediani M. E. B., Albrecht R. I., 2004. Characteristics of the precipitating systems during the 2002 dry-to-wet field campaign in the Amazon region. Anais do XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Sociedade Brasileira de Meteorologia, Fortaleza-CE.
- NCAR RAF Bulletin. The National Center for Atmospheric Research, P.O. Box 3000, Boulder, Colorado 80307.
- Petersen, W.A., e S.A. Rutledge, 2001. Regional Variability in tropical convection: Observations from TRMM. *J. Climate*, 14, 3566–3586.
- Petersen, W.A., S.W. Nesbitt, R.J. Blakeslee, R. Cifelli, P. Hein, e S.A. Rutledge, 2002. TRMM Observations of Intraseasonal Variability in Convective Regimes over the Amazon. *J. Climate*, 15, 1278–1294.
- Pruppacher, H. R., e J. D. Klett, 1997. Microphysics of cloud and precipitation. Kluwer Academic Publishers, 2^a ed.
- Rickenbach, T. M., R. N. Ferreira, J. Halverson, e M .A.F. Silva Dias, 2001. Mesoscale properties of convection in western Amazonia in the context of large-scale wind regimes. *J. Geophys. Res.*

- Rissler, J., A. Vestin, E. Swietlicki, G. Fisch, J. Zhou, P. Artaxo e M. O. Andreae, 2006. Size distribution and hygroscopic properties of aerosol particles from dry-season biomass burning in Amazonia. *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 471-491.
- Rogers, R.R., e M.K. Yau, 1989. *A Short Course in Cloud Physics*. Butterworth Heinemann, Elsevier, 3^a ed.
- Rosenfeld, D. e I. M. Lensky, 1998. Satellite-based insights into precipitation formation processes in continental and maritime convective clouds. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79, 2457-76.
- Rosenfeld D., 2000. Suppression of Rain and Snow by Urban and Industrial Air Pollution. *Science* **287** (5459), 1793-1796. Rosenfeld, D., 2000.
- Ramanathan, V., P. J. Crutzen, J. T. Kiehl, and D. Rosenfeld, 2001. Aerosols, Climate and the Hydrological Cycle. *Science* **294**, 2119-2124.
- Schemenauer, R. S., J. I. MacPherson, G. A. Isaac e J. W. Strapp, 1980. Canadian participation in HIPLEX 1979. Report APRB 11 P34, Atmospheric Environment Service, Environment Canada, 206.
- Segal, Y., A. Khain, M. Pinsky e A. Sterkin, 2004. Effects of atmospheric aerosol on precipitation in cumulus clouds as seen from 2000-bin cloud parcel microphysical model: sensitivity study with cloud seeding applications. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 130, 561– 581.
- Silva Dias M. A. F., Rutledge S., co-autores Clouds and rain processes in a biosphere-atmosphere interaction context in the Amazon region, *J. Geophys. Res.*, 2002, vol. 107, p. 8072
- Silva Dias M. A. F., Cohen J. C. P., Gandu A. W., Interações entre nuvens, chuvas e a biosfera na Amazônia, *Acta Amazonica*, 2005, vol. 35, p. 215
- Squires, P., 1958. The microstructure and colloidal stability of warm clouds. *Tellus* 10, 256.
- Stith, J. L., J. E. Dye, A. Bansemer, A.J. Heymsfield, C.A. Grainger, W.A. Petersen, e R. Cifelli, 2002. Microphysical Observations of Tropical Clouds. *J. Appl. Meteor.*, 41, 97-117.
- TRMM Common flight product definition, version 4 document, 2002. http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/fieldexp/TRMM_FE/CMPD_rel4.pdf
- Twomey, S., and T. A. Wojciechowski, 1969: Observations of the geographical variation of cloud nuclei. *J. Atmos. Sci.*, 26, 684-688.
- Vali, G., 1997. Cloud Properties Measured From Aircraft – An Assessment. Proc. of WMO Workshop on Measurements of Cloud Properties for Forecasts of Weather and Climate, *WMP Report* 30, WMO/TD 852, pp. 37-55.

- Vestin A, J. Rissler, E. Swietlicki, G. P. Frank, M. O. Andreae, 2007. Cloud-nucleating properties of the Amazonian biomass burning aerosol: Cloud condensation nuclei measurements and modeling. *Journal of Geophysical Research* 112(d14): D14201
- Wallace, J. M., and P. V. Hobbs, 2006: *Atmospheric Science: An Introductory Survey* (Second Edition), Academic Press, 483 pp
- Wang, L. P., Y. Xue, O. Ayala, and W.W. Grabowski, 2006. Effects of stochastic coalescence and air turbulence on the size distribution of cloud droplets, *Atmos Res*, 82, 416-432.
- Warner, J., 1969a: The microstructure of cumulus cloud. Part 1. General features of the droplet spectrum, *J. Atmos. Sci.*, 26, 1049-1059.
- Williams E., et al. 2002. Contrasting convective regimes over the Amazon: Implications for cloud electrification. *J. Geophys. Res.* 107(D20), doi: 10.1029/2001JD000380.