

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

**MESOMÓVEL: UMA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA
MÓVEL DE SUPERFÍCIE PARA A OBSERVAÇÃO DE
FENÔMENOS CONVECTIVOS LOCAIS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Diogo Machado Custodio

Santa Maria, RS, Brasil

2012

MESOMÓVEL: UMA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA MÓVEL DE SUPERFÍCIE PARA A OBSERVAÇÃO DE FENÔMENOS CONVECTIVOS LOCAIS

Diogo Machado Custodio

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Área de Concentração em Instrumentação Meteorológica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Meteorologia.**

Orientador: Prof. Ernani de Lima Nascimento

Santa Maria, RS, Brasil

2012

Custodio, Diogo Machado

Mesomóvel: Uma estação meteorológica móvel de superfície para a observação de fenômenos convectivos locais / Diogo Machado Custodio.-2012.

84 p. ; 30cm

Orientador: Ernani de Lima Nascimento

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, RS, 2012

1. Instrumentação Meteorológica 2. Observação Meteorológica em Mesoescala 3. Tempestades Convectivas I. Nascimento, Ernani de Lima II. Título.

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo autor.

©2012

Todos os direitos autorais reservados a Diogo Machado Custodio. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

End. Eletr.: diogocustodio@gmail.com

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Naturais e Exatas
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**MESOMÓVEL: UMA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA MÓVEL DE
SUPERFÍCIE PARA A OBSERVAÇÃO DE FENÔMENOS
CONVECTIVOS LOCAIS**

elaborada por
Diogo Machado Custodio

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Meteorologia

COMISSÃO EXAMINADORA:

Ernani de Lima Nascimento, Dr.
(Presidente/orientador)

Maria Assunção Faus da Silva Dias, Dra. (USP)

Otavio Costa Acevedo, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 05 de setembro de 2012.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, em especial à minha mãe, Enilza, e à minha namorada, Nicole, por todo o apoio que me foi dado nos momentos de dificuldade e por toda a paciência que tiveram em meus momentos de estresse. Sem elas, esta jornada teria sido muito mais difícil.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Ernani de Lima Nascimento, por toda atenção a mim dedicada no decorrer desta pesquisa. Sua paciência e sua ajuda imensurável ante as minhas dificuldades foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Obrigado pelo gratificante aprendizado nestes dois anos de convívio.

Agradeço ao Prof. Dr. Hans Rogério Zimmermann, do Laboratório de Micrometeorologia da UFSM, pelo suporte dado durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos meteorologistas Pablo Eli de Oliveira e Daniel Caetano Santos, da UFSM e aos colegas Maurício Ilha, Diogo Arsego, Guilherme Marqueri e Lucas Vaz Perez, dos Programas de Graduação e Pós-Graduação em Meteorologia da UFSM, pelo inestimável apoio prestado durante os testes de instalação da estação Mesomóvel e nas interceptações de tempestades.

Agradeço aos professores Dr. Otávio Costa Acevedo (UFSM) e Dra. Maria Assunção Faus da Silva Dias (USP), membros componentes da comissão examinadora deste trabalho, pelos comentários pertinentes e pelas revisões precisas.

Agradeço ao Departamento de Fitotecnia da UFSM, pelo suporte dado ao projeto durante os experimentos de verificação da Estação Mesomóvel.

Agradeço ao Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais (CRS/INPE), pela infraestrutura cedida no decorrer deste trabalho.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo suporte financeiro.

Agradeço a todos os amigos que de forma direta ou indireta, me ajudaram no decorrer desta jornada.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia
Universidade Federal de Santa Maria

MESOMÓVEL: UMA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA MÓVEL DE SUPERFÍCIE PARA A OBSERVAÇÃO DE FENÔMENOS CONVECTIVOS LOCAIS

AUTOR: DIOGO MACHADO CUSTODIO

ORIENTADOR: ERNANI DE LIMA NASCIMENTO

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 05 de setembro de 2012.

Neste trabalho é apresentada a Estação Mesomóvel, que consiste no protótipo de uma unidade táctica de observação meteorológica automática de superfície, montada sobre tripé e transportável em um veículo de pequeno porte, podendo assim ser instalada na trajetória de tempestades convectivas. Com sua amostragem em alta frequência, a Estação Mesomóvel é capaz de monitorar de maneira adequada circulações de mesoescala produzidas pela convecção.

São apresentados os desafios e as soluções encontradas durante a concepção deste protótipo, e também os resultados de comparações feitas entre as medições da Estação Mesomóvel e de uma estação da rede operacional de observação em superfície. A operação da Estação Mesomóvel em modo de interceptação de tempestades é discutida em termos das estratégias de análise e previsão de tempo empregadas, da logística de deslocamento, e dos dados atmosféricos obtidos em campo.

Resultados da análise dos dados coletados pela Estação Mesomóvel mostraram sua capacidade de amostrar a evolução, em alta frequência, de fenômenos convectivos da escala meso- γ , como frentes de rajada, piscinas de ar frio, mesoaltas e altas taxas de precipitação, que tipicamente é mal representada pela rede de observação de superfície em escala sinótica.

Esta pesquisa demonstrou que é factível realizar no Brasil a coleta de dados meteorológicos com qualidade científica através da estratégia de interceptação de tempestades convectivas.

Palavras-chave: Instrumentação Meteorológica. Observação Meteorológica em Mesoescala. Tempestades Convectivas.

ABSTRACT

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia
Universidade Federal de Santa Maria

MESOMÓVEL: A MOBILE SURFACE WEATHER STATION FOR THE OBSERVATION OF LOCAL CONVECTIVE PHENOMENA

AUTOR: DIOGO MACHADO CUSTODIO

ORIENTADOR: ERNANI DE LIMA NASCIMENTO

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 05 de setembro de 2012.

This study presents a prototype of a deployable unit for automated surface weather observation, named Estação Mesomóvel, which is mounted on a tripod and portable in a small vehicle, allowing its installation in the path of oncoming convective storms. With a high frequency data sampling strategy, the Estação Mesomóvel is capable of monitoring adequately mesoscale surface features produced by convection.

The challenges and solutions found during the conception of the prototype are discussed, as well as the results from the data comparison experiments conducted between the Estação Mesomóvel and an automated surface weather station from the operational network. The operation of the Estação Mesomóvel in storm interception mode is presented in the context of the weather analysis and forecasting strategies used, the deployment logistics, and the atmospheric data obtained in the field.

Results from the analysis of the collected data showed the capability of the Estação Mesomóvel in sampling the evolution, at high frequency, of convective phenomena at the meso- γ scale, such as gust fronts, cold pools, mesohighs and high precipitation rates, which are typically poorly represented by the synoptic-scale surface observing network.

This investigation showed the feasibility of conducting storm interception in Brazil with the goal of collecting high-quality atmospheric data for scientific purposes.

Keywords: Meteorological Instrumentation. Mesoscale Meteorological Observation. Convective Storms.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Ordem de magnitude típicas de tempo e espaço de alguns fenômenos atmosféricos. Adaptado de Markowski e Richardson (2010). 13
- Figura 2 – Distribuição geográfica da rede automática de superfície operada pelo INMET (a) no Brasil e (b) no estado do Rio Grande do Sul. Fonte: INMET (www.inmet.gov.br). 14
- Figura 1.1 – Modelo conceitual esquemático de alguns padrões atmosféricos de meso-escala induzidos em superfície pela atividade convectiva. Neste esquema temos uma seção horizontal idealizada de uma linha de instabilidade se deslocando para sudeste e com precipitação estratiforme na sua retaguarda. As linhas vermelhas representam isóbaras, com a indicação da mesoalta (H) e das mesobaixas (L); as setas ilustram a direção predominante do vento em um referencial que se desloca junto com o sistema convectivo; o hachurado colorido indica a intensidade da precipitação (vide convenção de cores); a linha azul representa a frente de rajada na dianteira do sistema convectivo. Figura adaptada de Markowski e Richardson (2010), a partir do original de Johnson e Hamilton (1988). 18
- Figura 1.2 – Representação esquemática de uma piscina de ar frio induzida pela atividade convectiva - este esquema ilustra uma piscina de ar frio sob uma tempestade já em fase de dissipação. Figura adaptada do módulo de treinamento do MetEd-COMET da *University Corporation for Atmospheric Research* (www.meted.ucar.edu). 20
- Figura 1.3 – Perturbações no campo de pressão induzidas pela presença de um volume de ar com fluatibilidade negativa - p. ex., ar resfriado pela evaporação da chuva. Figura adaptada do módulo de treinamento do MetEd-COMET da *University Corporation for Atmospheric Research* (www.meted.ucar.edu). 21
- Figura 1.4 – Visão instantânea das linhas de corrente, variação da pressão atmosférica, vento e temperatura do ar através de uma frente de rajada. Figura adaptada de Markowski e Richardson (2010), a partir do original de Wakimoto (1982). 22
- Figura 1.5 – Modelo conceitual idealizado de uma seção transversal da região de precipitação estratiforme de uma linha de instabilidade. As setas indicam linhas de corrente do escoamento relativo ao sistema e a linha tracejada indica a região onde o escoamento relativo é nulo. Adaptado de Johnson e Hamilton (1988). 24
- Figura 1.6 – (a) Visão geral de uma Mesonet Móvel. (b) Detalhe da disposição dos instrumentos: (1) barômetro, (2) termômetro e termohigrômetro, (3) anemômetro, (4) sistema de posicionamento global, (5) bússola eletrônica. Adaptado de Straka, Rasmussen e Fredrickson (1996). 26
- Figura 1.7 – Versões de estação móvel de observação atmosférica em superfície montada sobre tripé da *StickNet*. Em (a) um modelo do tipo A indicando (1) Anemômetro, (2) bússola eletrônica, (3) termohigrômetro, (4) barômetro e conjunto de aquisição de dados. Em (b) um modelo do tipo B, indicando (1) o instrumento integrado. Fotografias por Ian Giammanco; Adaptado de Skinner (2012). 27
- Figura 2.1 – Estação Mesomóvel sendo instalada (a) e em funcionamento (b), posicionada

	à dianteira de uma tempestade convectiva. Fotografias gentilmente cedidas por Nascimento, E. (2012) e Ilha, M. (2012) (respectivamente).	30
Figura 2.2	– (a) Tripé Trident TSD-620. Em (b) e (c) observa-se a adaptação de flanges para a conexão entre os conjuntos superior e inferior.	31
Figura 2.3	– (a) Visão geral da Estação Mesomóvel com os conjuntos superiores e inferiores instalados. As setas indicam a disposição do (1) anemômetro, (2) termohigrômetro, (3) barômetro e <i>datalogger</i> e (4) pluviômetro. Em (b) o conjunto inferior em destaque.	33
Figura 2.4	– (a) Esquema de instalação do barômetro e (b) sua posição já instalada na Estação Mesómovel.	34
Figura 2.5	– Idem à figura 2.4, mas para o termohigrômetro.	35
Figura 2.6	– Idem à figura 2.4, mas para o anemômetro.	35
Figura 2.7	– Partes da Estação Mesomóvel (mala com os instrumentos e tripé) e estojo de ferramentas.	36
Figura 2.8	– Portabilidade da Estação Mesomóvel: (a) mala e tripé acondicionados em um veículo de pequeno porte e (b) partes da Estação Mesomóvel sendo transportadas para a montagem e instalação.	38
Figura 2.9	– Exemplos de alguns aspectos morfológicos das células convectivas: (a) cortina de chuva e (b) <i>shelf cloud</i> . Fotografias gentilmente cedidas por Ilha, M. (2012) e Nascimento, E. (2012) (respectivamente).	41
Figura 3.1	– Estação Mesomóvel instalada ao lado da Estação Automática do INMET, em Santa Maria, RS.	43
Figura 3.2	– Vórtice ciclônico de altos níveis sobre o Rio Grande do Sul em 15 de dezembro de 2011. (a) Análise em 300hPa do modelo GFS-NCEP válida às 18Z de 15/12/2011: Altura geopotencial (isolinhas pretas, em mgp), vento (barbelas, em m/s), e vorticidade relativa (hachurado colorido, em $1/s \times 10^{-05}$); (b) imagem realçada e setorizada do satélite GOES-12 no canal infravermelho térmico às 18Z de 15/12/2011. Fonte: DSA/CPTEC-INPE.	44
Figura 3.3	– Séries temporais coletadas no campus da UFSM referentes ao período entre 12Z do dia 13/12/2011 e 12Z do dia 16/12/2011 das variáveis meteorológicas selecionadas para a comparação entre a Estação Mesomóvel (linhas pretas) e a estação automática do INMET em Santa Maria/RS (linhas vermelhas). Para a velocidade da rajada de vento (painel (b)) também é fornecido, a cada hora cheia, o valor da máxima rajada detectada na Estação Mesomóvel nos 60 min precedentes (linha azul), replicando o procedimento de registro de rajadas empregado nas estações automáticas do INMET e, portanto, facilitando a comparação. Vide texto para a análise. Fonte dos dados do INMET: www.inmet.gov.br	45
Figura 3.4	– Radar meteorológico de Santiago/RS: CAPPIs em 5500m do campo de refletividade em um raio de 250km de distância do radar para o dia 15/12/2011. Imagens válidas às: (a) 23:00Z, e (b) 23:15Z. Vide na barra indicativa a convenção de cores empregada para o campo de refletividade. Fonte das imagens: Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (www.redemet.aer.mil.br).	47
Figura 3.5	– Igual à figura 3.3, mas fazendo uma ampliação entre as 22:30Z de 15/12/2011 e 00:15Z de 16/12/2011, em torno do horário da passagem da célula convectiva sobre Santa Maria/RS.	48
Figura 3.6	– Previsão numérica de horizonte de 18h do modelo GFS-NCEP válida às 18Z	

	de 03/02/2012 para a Baía do Prata. (a) pressão atmosférica ao nível do mar (isóbaras azuis, a cada 2 hPa), vento a 10m (barbelas, em m/s), e temperatura do ar a 2m, acima de 18°C (hachurado colorido, a cada 3°C); (b) 850hPa: altura geopotencial (isoípsas azuis, a cada 30mgp), vento (barbelas, em m/s), e umidade específica do ar, acima de 8g/kg (hachurado colorido, a cada 2g/kg); a linha tracejada branca envolve as regiões onde a magnitude do vento é maior ou igual a 10m/s. (c) 500hPa: altura geopotencial (isoípsas azuis, a cada 30mgp), vento (barbelas, em m/s), e vorticidade relativa ciclônica (hachurado colorido, a cada $1 \times 10^{-5} 1/s$); (d) 200hPa: vento (barbelas, em m/s), magnitude do vento, acima de 40m/s (hachurado colorido, a cada 5m/s), e divergência positiva (isolinhas vermelhas, a cada $1 \times 10^{-5} 1/s$).	50
Figura 3.7 – Igual à figura 3.6, mas para: (a) CAPE de superfície, acima de 100J/kg (hachurado colorido, em J/kg), e índice de levantamento negativo para uma parcela de superfície (isolinhas brancas tracejadas, a cada 2°C); (b) magnitude do cisalhamento vertical do vento entre superfície e 6km de altura, acima de 15m/s (hachurado colorido, a cada 5m/s), <i>lapse rate</i> entre 700 – 500hPa, menor ou igual a $-6,5^{\circ}C/km$ (isolinhas amarelas tracejadas, a cada $0,5^{\circ}C/km$), e água precipitável, maior ou igual a 40mm (isolinhas vermelhas, a cada 5mm).	51	
Figura 3.8 – Diagrama <i>skew-T</i> da radiossondagem de Santa Maria/RS realizada às 12Z de 03/02/2012. Fonte: Departamento de Ciências Atmosféricas, <i>University of Wyoming</i> (www.weather.uwyo.edu).	53	
Figura 3.9 – Mapa indicando o caminho percorrido pela Equipe de Campo na interceptação de tempestades realizada na tarde do dia 3 de fevereiro de 2012. O ponto B indica o local da coleta de dados analisada nesta seção. Ver texto para detalhes.	53	
Figura 3.10 – Séries temporais no período entre 17:52Z e 19:29Z de 03/02/2012 referente à coleta de dados em modo de interceptação realizada no ponto B indicado na figura 3.9 ($29^{\circ}45'52,5''S; 54^{\circ}03'7,36''O$), localizado a 21km a sudoeste de Santa Maria/RS. Frequência de amostragem de $\frac{1}{3}Hz$	55	
Figura 3.11 – Igual à figura 3.4 mas para o dia 03/02/2012. Imagens válidas às: (a) 17:45Z, (b) 18:00Z, (c) 18:30Z, (d) 18:45Z, (e) 19:00Z, e (f) 19:15Z. A extremidade da seta indica a localização da Estação Mesomóvel durante a coleta de dados. Fonte das imagens: Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (www.redemet.aer.mil.br).	56	
Figura 3.13 – Igual à figura 3.7, mas para a previsão numérica de horizonte de 21h válida às 21Z de 29/05/2012.	59	
Figura 3.14 – Igual à figura 3.3, mas referentes ao período entre 15:00Z de 29/05 e 15:00Z de 30/05/2012. As três faixas coloridas indicam intervalos em que as séries temporais são examinadas com mais detalhes. Vide texto.	61	
Figura 3.15 – Igual à figura 3.4 mas para os dias 29 e 30/05/2012. Imagens válidas às: (a) 22:00Z, e (b) 23:00Z de 29/05; e (c) 00:00Z, (d) 01:00Z, (e) 02:00Z, e (f) 03:00Z de 30/05. As tempestades deslocam-se predominantemente de O-SO. Fonte das imagens: Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (www.redemet.aer.mil.br).	63	
Figura 3.16 – Igual à figura 3.3, mas referentes ao período entre 20:30Z e 23:30Z de 29/05/2012.	64	

Figura 3.17 – Igual à figura 3.3, mas referentes ao período entre 23:30Z de 29/05 e 02:30Z de 30/05/2012.	67
Figura 3.18 – Igual à figura 3.3, mas referentes ao período entre 02:45Z e 06:05Z de 30/05/2012.	69

SUMÁRIO

RESUMO	4
ABSTRACT	5
INTRODUÇÃO	12
1 TEORIA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
1.1 O conceito de fluuabilidade	16
1.2 Circulações de mesoescala em superfície induzidas por atividade convectiva ...	17
1.2.1 Piscina de ar frio (<i>cold pool</i>)	18
1.2.2 Mesoalta (<i>mesohigh</i>)	19
1.2.3 Frente de rajada (<i>gust front</i>)	21
1.2.3.1 Frentes de rajada como correntes de densidade	22
1.2.4 Mesobaixa (<i>wake low</i>)	23
1.2.5 Importância das circulações convectivas de superfície para a meteorologia de mesoescala	24
1.3 Sistemas móveis de observação meteorológica em superfície	25
1.3.1 Mesonet Móvel (<i>Mobile Mesonet</i>)	25
1.3.2 Sticknet	27
2 METODOLOGIA	29
2.1 Instrumentação	29
2.1.1 Descrição geral do sistema	29
2.1.1.1 Tripé e estrutura para os instrumentos	29
2.1.2 Sensores e instrumentos	31
2.1.2.1 Pressão atmosférica	33
2.1.2.2 Temperatura e umidade relativa do ar	34
2.1.2.3 Velocidade e direção do vento	34
2.1.2.4 Precipitação	35
2.2 Portabilidade e instalação	36
2.3 Estratégia Operacional	38
3 RESULTADOS	42
3.1 Experimento de verificação da Estação Mesomóvel: 13 a 16 de dezembro de 2011	43
3.2 Experimento de interceptação de tempestades: 03 de fevereiro de 2012	49
3.2.1 Análise e previsão do tempo	49
3.2.2 Coleta de dados	53
3.3 Experimento de intercomparação de estações: 29 e 30 de maio de 2012	57
3.3.1 Análise e previsão do tempo	57
3.3.2 Coleta de dados: Análise geral	60
3.3.3 Coleta de dados: análise do intervalo 1, entre 20:30Z e 23:30Z de 29/05/2012. ...	62
3.3.4 Coleta de dados: análise do intervalo 2, entre 23:30Z de 29/05 e 02:30Z de 30/05. ...	66
3.3.5 Coleta de dados: análise do intervalo 3, entre 02:45Z e 06:00Z de 30/05/2012. ...	66
4 CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS	70
4.1 Principais conclusões	70
4.2 Trabalhos futuros e recomendações	72
Apêndice A – Resfriamento latente	74
Apêndice B – Corrente de densidade	76
Apêndice C – Perturbação no campo de pressão devido a variação vertical da flutua-	

bilidade	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80

INTRODUÇÃO

Observações atmosféricas de qualidade representam uma das “espinhas dorsais” de qualquer atividade realizada em Meteorologia. Embora o escoamento atmosférico apresente um comportamento contínuo, as observações atmosféricas o amostram em intervalos de espaço e tempo discretos, e portanto registram os eventos meteorológicos também de forma discreta. Assim, a análise dos fenômenos meteorológicos é limitada pela frequência com que os sistemas observacionais amostram o escoamento atmosférico.

Fenômenos atmosféricos costumam ser categorizados de acordo com as escalas de movimento que caracterizam sua evolução. Orlanski (1975) e Fujita (1981) foram alguns dos autores que propuseram formalizar uma classificação de escalas do movimento atmosférico (Figura 1). Orlanski (1975) sugeriu o uso dos sufixos macro, meso e micro em conjunto com as letras α , β e γ na subdivisão dos níveis escalares. Na chamada microescala prevalecem os fenômenos de turbulência que ocorrem na escala espacial da ordem de metros e temporal da ordem de poucos minutos. No outro extremo está a macroescala, onde prevalecem os fenômenos de escala climática de duração acima de 30 dias. Tradicionalmente, eventos com dimensões espaciais e temporais intermediárias a estas duas são classificados como de escala sinótica ou de mesoescala (esta segunda, historicamente, chamada de “subsinótica”).

A dificuldade operacional em se implementar uma rede densa de observação meteorológica em grandes regiões como um país ou continente dificulta o registro de fenômenos de curta duração e extensão espacial. No Brasil, por exemplo, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) gerencia atualmente uma rede no padrão da Organização Meteorológica Mundial (OMM) com 458 estações meteorológicas automáticas de superfície que realizam medições horárias. No estado do Rio Grande do Sul (RS) esta rede compreende 35 estações, representando um espaçamento médio de 90km entre cada estação (Figuras 2a e 2b). Este espaçamento espacial e temporal atende às necessidades observacionais delineadas pela OMM para o monitoramento dos fenômenos de escala sinótica (WMO, 2006).

Entretanto há fenômenos de escala meso- γ , que compreende a escala espacial característica de 2 a 20km e temporal da ordem de 60min ou menos, que são de difícil detecção por uma rede de observação sinótica. Nesta escala incluem-se, por exemplo, tempestades convectivas de natureza local que não raramente deflagram fenômenos de alto impacto sócio-econômico. Em particular a região sul-americana à leste dos Andes compreendida entre latitudes médias e subtropicais apresenta condições atmosféricas potencialmente conducentes à ocorrência das chamadas tempestades severas (SILVA DIAS, 1999; BROOKS; LEE; CRAVEN, 2003), capazes de produzir rajadas de vento destrutivas, grandes pedras de granizo e tornados. Seu monitoramento representa um grande desafio por se tratarem de eventos altamente localizados e de curta duração.

Assim, não são raros os relatos de fenômenos convectivos mais intensos obtidos via o

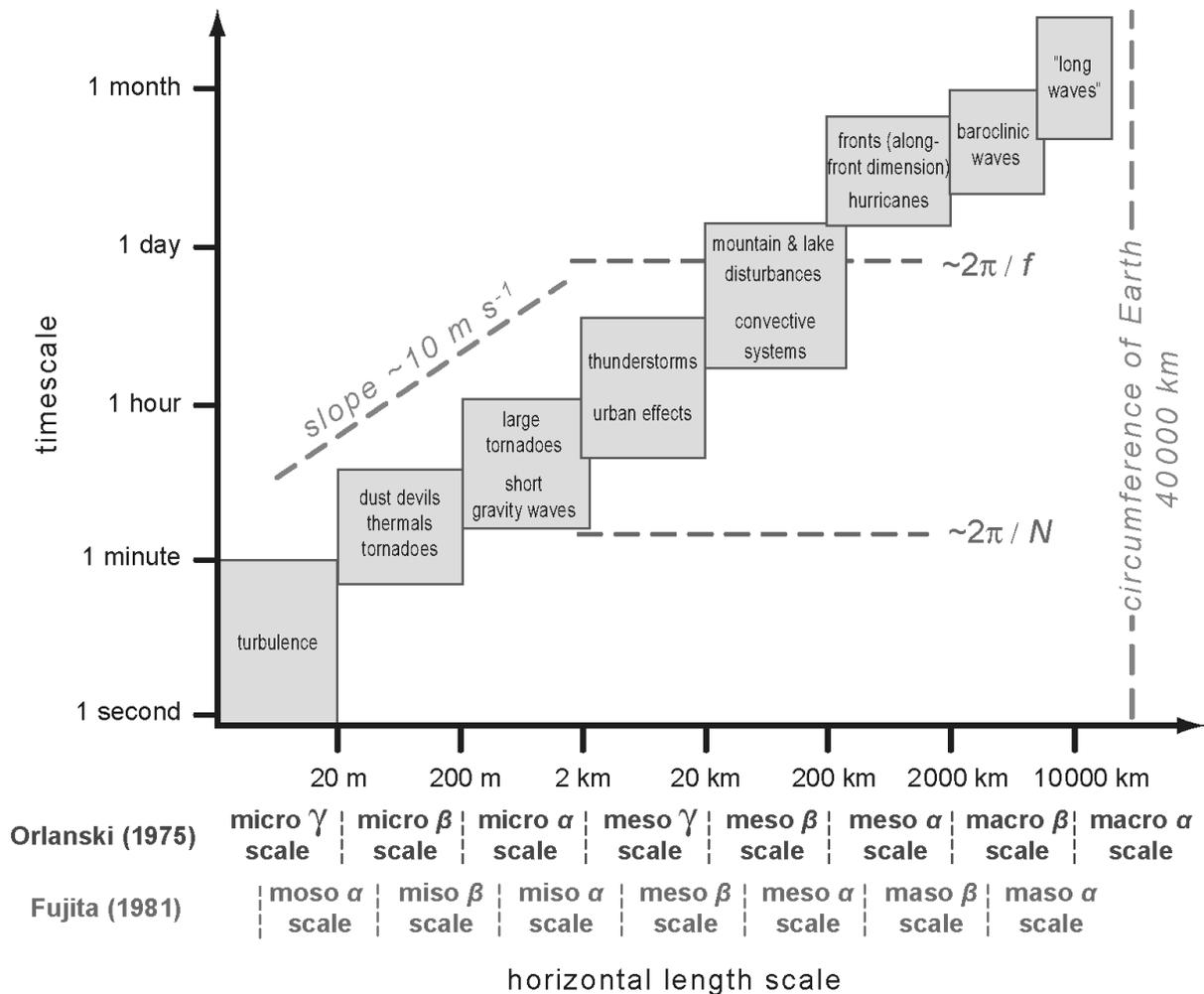


Figura 1: Ordem de magnitude típicas de tempo e espaço de alguns fenômenos atmosféricos. Adaptado de Markowski e Richardson (2010).

registro de danos causados ou “relatos anedóticos” por parte da população atingida, mas desacompanhados de uma medição direta via instrumentos meteorológicos. Além disto, mesmo que uma determinada estação meteorológica seja atingida por um intenso fenômeno convectivo localizado, a frequência de amostragem dos dados na rede de observação sinótica é inadequada para a escala de tempo do evento convectivo, impedindo seu registro adequado (MAGGIOTTO et al., 2007).

Para a observação de fenômenos das escalas meso- β e meso- γ frequentemente recorre-se ao auxílio de sensoriamento remoto da atmosfera (SR), seja via radar ou satélites meteorológicos. Estes instrumentos permitem um monitoramento praticamente contínuo da atmosfera, com alta resolução espacial e temporal (em particular o radar meteorológico), permitindo o registro de dados meteorológicos mesmo em regiões não cobertas por uma rede de observação convencional. No entanto, por se tratarem de medições indiretas, são mais suscetíveis a erros de processamento do que as medições *in situ*. Além disto, o SR via satélite ou radar (ainda) não é adequado para o monitoramento de fenômenos atmosféricos que ocorrem ao nível da superfície (KIDDER; VONDER HAAR, 1995; RINEHART, 1997).

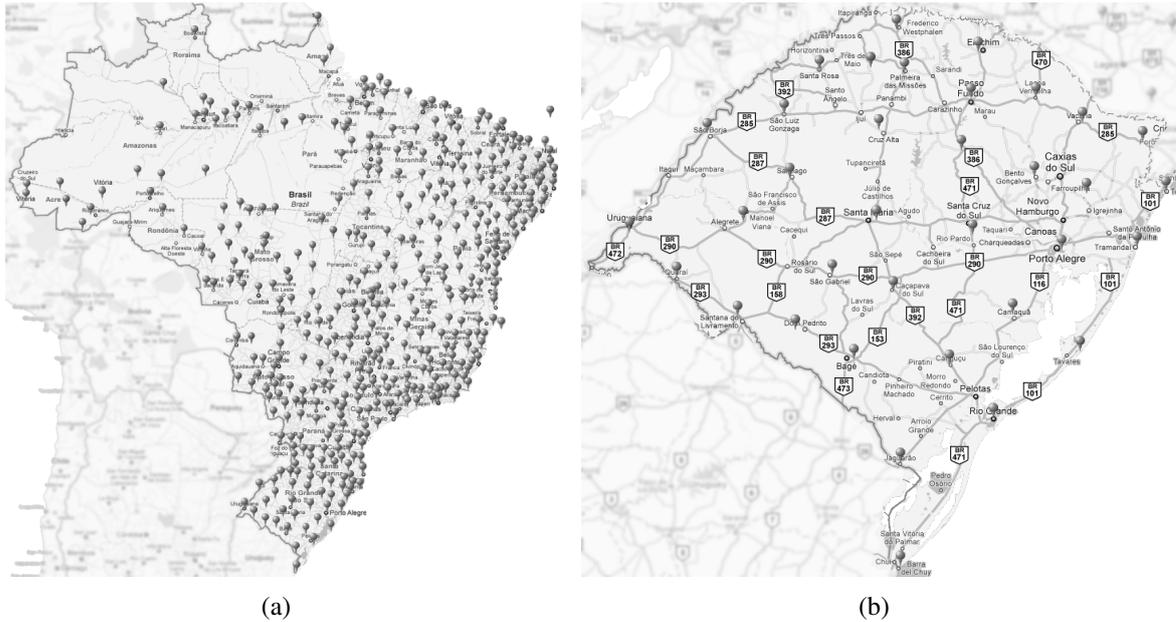


Figura 2: Distribuição geográfica da rede automática de superfície operada pelo INMET (a) no Brasil e (b) no estado do Rio Grande do Sul. Fonte: INMET (www.inmet.gov.br).

Além do SR, a modelagem numérica da atmosfera é um outro recurso utilizado para auxiliar a sanar a deficiência observacional em mesoescala. Atualmente existe capacidade computacional suficiente para se realizar simulações numéricas com resoluções espacial e temporal adequadas para fenômenos de mesoescala e escala convectiva¹ (SCHWARTZ et al., 2009). Porém, alguns mecanismos físicos importantes em sistemas convectivos, como a microfísica de nuvens, ainda são mal parametrizados nos modelos de alta resolução, implicando em uma má representação de processos que têm influência na dinâmica da convecção (p.ex., a intensidade das piscinas de ar frio). Idealmente o aumento de resolução espacial dos modelos atmosféricos usados na previsão do tempo deve ser acompanhado de um aumento de resolução espacial da rede observacional, tanto para assimilação de dados quanto para a verificação da previsão.

Redes de observação em meso e microescala existentes em operação ratificam o valor do aumento da resolução espaço-temporal do monitoramento atmosférico em superfície, como as redes observacionais de mesoescala (Mesonet) na América do Norte (BROCK et al., 1995; FIEBRICH; CRAWFORD, 2001; SCHROEDER et al., 2005). No Brasil, Nascimento e Calvetti (2006) examinaram alguns exemplos de fenômenos típicos de mesoescala que puderam ser registrados pela rede automática regional de superfície do Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR). Entretanto, custos econômicos e logísticos são fatores limitantes para a implementação e manutenção de uma rede de observação de mesoescala sobre uma grande região. Considerando o estado do RS, que possui uma área de $268.781,896\text{km}^2$ (IBGE, 2002), uma rede de observação com espaçamento médio entre as estações de 20km (representando o limite superior da escala meso- γ) demandaria a existência de mais de 700 estações sobre este

¹Por “escala convectiva” entenda-se fenômenos de escala meso- γ associados a tempestades convectivas

domínio, e para um espaçamento médio de 5km o número de estações necessárias aumentaria para mais de 11.200.

Dados os pontos discutidos acima, este projeto propõe o desenvolvimento e experimento em campo da Estação Mesomóvel: um protótipo de estação móvel de observação atmosférica em superfície montada sobre tripé e transportável em um veículo, podendo ser deslocada com antecedência de horas para regiões onde é prevista a ocorrência de atividade convectiva. O objetivo geral desta investigação é documentar as vantagens e as dificuldades encontradas na execução, no Brasil, deste tipo de “observação adaptativa” (BERGOT et al., 1999; LANGLAND et al., 1999) na escala convectiva. Uma das metas do projeto é dar o primeiro passo no teste do conceito de uma micro-rede de observação adaptativa de baixo custo que pode ser deslocada sob a demanda de um experimento de campo ou de um sistema de previsão de tempo, aumentando-se a cobertura observacional numa região-alvo relativamente pequena visando monitorar fenômenos convectivos em superfície na escala meso- γ .

Esta ferramenta pode ser útil em experimentos de campo de validação de modelos numéricos e na confrontação com dados das plataformas de SR, além da contribuição acadêmica em se expandir a documentação disponível referente a fenômenos de escala convectiva.

Mais especificamente, o projeto visa conceber um protótipo de estação móvel sobre tripé, experimentar e documentar a disposição física dos instrumentos e realizar a programação do sistema automatizado de coleta de dados (*datalogger*) para amostragem adequada dos fenômenos de mesoescala. Além disto, testar uma estratégia de ação com a realização de previsão de tempo de muito curto prazo identificando regiões favoráveis ao desenvolvimento convectivo, planejamento logístico de transporte da estação até a região de interesse e a própria execução do plano, aplicando o conceito de observações adaptativas.

A experiência adquirida ao final deste projeto contribuirá para a formação de massa crítica na área de mobilidade instrumental e observação adaptativa no Brasil.

1 TEORIA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tempestades são a manifestação de convecção úmida e profunda na atmosfera, e, ao contrário das circulações de grande escala, são fenômenos com fortes características tridimensionais. Entretanto, é ao nível de superfície que a circulação convectiva terá seu maior impacto sobre as atividades humanas (naturalmente, no caso da aviação este impacto também se estende aos níveis superiores). Neste sentido, este trabalho é fortemente direcionado à observação e documentação de circulações atmosféricas de mesoescala induzidas em superfície por tempestades convectivas locais.

Neste Capítulo são brevemente revistos alguns conceitos fundamentais importantes que ajudam na compreensão dos fenômenos abordados nesta pesquisa. Além disto, é também apresentada uma revisão bibliográfica de alguns sistemas de observação meteorológica móvel em superfície que inspiraram o desenvolvimento deste estudo.

1.1 O conceito de fluabilidade

A fluabilidade é um dos conceitos físicos fundamentais que descreve a natureza básica (“Arquimediana”) da convecção como um “movimento de fluido devido à ação da força gravitacional sobre as variações de densidade deste fluido”.

Para obter o termo de fluabilidade, utiliza-se a componente vertical da equação do momento, desprezando-se as forças de Coriolis e de atrito, da seguinte forma:

$$\frac{Dw}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad (1.1)$$

sendo w a velocidade vertical, ρ a densidade do ar, p a pressão atmosférica, g a aceleração da gravidade e $\frac{Dw}{Dt}$ representando a derivada total acompanhando uma parcela de ar.

Utilizando a Teoria da Parcela, pode-se considerar que a pressão e a densidade total é a soma entre duas componentes, uma representando um estado básico estacionário e horizontalmente homogêneo, e outra a perturbação (ou anomalia) espacial e temporal em torno do estado básico, de tal forma que:

$$p = \bar{p}(z) + p'(x, y, z, t) \quad (1.2)$$

$$\rho = \bar{\rho}(z) + \rho'(x, y, z, t) \quad (1.3)$$

, com a barra sobrescrita ($\bar{\quad}$) denotando o estado básico e a plica ($'$) denotando o desvio (perturbação) em relação ao estado básico. Nesta decomposição considera-se que $p' \ll \bar{p}$ e

$\rho' \ll \bar{\rho}$.

Substituindo (1.2) e (1.3) em (1.1) tem-se,

$$\frac{Dw}{Dt} = -\frac{1}{(\bar{\rho} + \rho')} \frac{\partial(\bar{p} + p')}{\partial z} - g \quad (1.4)$$

O fator $-\frac{1}{(\bar{\rho} + \rho')}$ pode ser expandido em uma série geométrica:

$$\frac{1}{(\bar{\rho} + \rho')} = \frac{1}{\bar{\rho}} \left(\frac{1}{1 + \frac{\rho'}{\bar{\rho}}} \right) = \frac{1}{\bar{\rho}} \left[1 - \frac{\rho'}{\bar{\rho}} + \left(\frac{\rho'}{\bar{\rho}} \right)^2 + \dots \right] \quad (1.5)$$

Uma vez que $\frac{\rho'}{\bar{\rho}} \ll 1$, os termos de segunda ordem (e superiores) da expansão podem ser desprezados. Substituindo (1.5) em (1.4) obtém-se:

$$\frac{Dw}{Dt} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} \left(\frac{\rho'}{\bar{\rho}} \right) - \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial p'}{\partial z} + \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial p'}{\partial z} \left(\frac{\rho'}{\bar{\rho}} \right) - g \quad (1.6)$$

Desprezando o produto entre as componentes de perturbação e considerando que o estado básico encontra-se em equilíbrio hidrostático ($\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} = -\bar{\rho}g$), (1.6), pode ser expressa como:

$$\frac{Dw}{Dt} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial p'}{\partial z} - g \frac{\rho'}{\bar{\rho}} \quad (1.7)$$

O termo $-g \frac{\rho'}{\bar{\rho}}$ é definido como Flutuabilidade (B) e representa a ação da força de empuxo sobre da parcela de ar.

$$B \equiv -g \frac{\rho'}{\bar{\rho}} \quad (1.8)$$

Pode-se observar, de (1.7) que se B for positivo (negativo) a parcela de ar sofre aceleração ascendente (descendente) - caso seja desconsiderado, por ora, a contribuição do gradiente vertical da perturbação de pressão. Pela equação (1.3), para B ser positivo (negativo) a densidade da parcela de ar deve ser menor (maior) do que a densidade do ar no estado básico.

A flutuabilidade é um conceito útil para se compreender o desenvolvimento das circulações convectivas induzidas em superfície, abordadas nas subseções a seguir.

1.2 Circulações de mesoescala em superfície induzidas por atividade convectiva

Dentre as circulações atmosféricas de mesoescala produzidas pelas tempestades convectivas podem ser citadas como exemplo frentes de rajada, piscinas de ar frio, mesoaltas e mesobaixas. O monitoramento em alta resolução temporal da taxa de precipitação dentro de tempestades convectivas também é alvo de estudo deste trabalho. Estas são características

importantes das tempestades no nível de superfície, e que neste estudo são examinadas no contexto do valor adicionado pela observação feita com a estação meteorológica móvel para a detecção e caracterização das mesmas.

Para uma correta interpretação dos resultados deste trabalho, é importante entender estas circulações de mesoescala produzidas pela atividade convectiva. Tais circulações são bem documentadas na literatura (p.ex., Johnson e Hamilton (1988), Johnson (2001), Wakimoto (2001), Markowski e Richardson (2010)), e seus modelos conceituais, amplamente consolidados.

A figura 1.1 representa um modelo conceitual de uma seção horizontal uma linha de instabilidade proposto por Johnson e Hamilton (1988), identificando algumas das características das tempestades convectivas relevantes para este projeto - vide legenda para descrição. Apesar de se tratar de uma linha de instabilidade, muitas das características descritas por Johnson e Hamilton (1988) são válidas também para outros modos de organização convectiva.

Uma breve revisão é apresentada nas sub-seções a seguir.

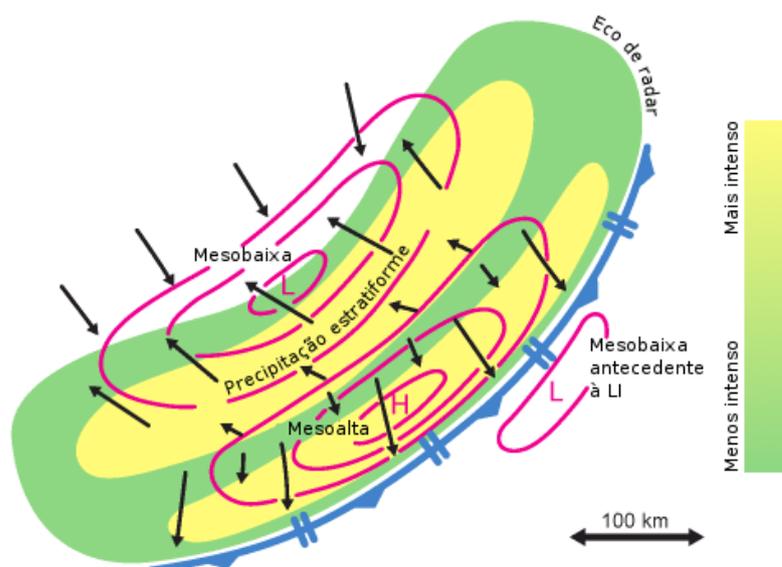


Figura 1.1: Modelo conceitual esquemático de alguns padrões atmosféricos de mesoescala induzidos em superfície pela atividade convectiva. Neste esquema temos uma seção horizontal idealizada de uma linha de instabilidade se deslocando para sudeste e com precipitação estratiforme na sua retaguarda. As linhas vermelhas representam isóbaras, com a indicação da mesoalta (H) e das mesobaixas (L); as setas ilustram a direção predominante do vento em um referencial que se desloca junto com o sistema convectivo; o hachurado colorido indica a intensidade da precipitação (vide convenção de cores); a linha azul representa a frente de rajada na dianteira do sistema convectivo. Figura adaptada de Markowski e Richardson (2010), a partir do original de Johnson e Hamilton (1988).

1.2.1 Piscina de ar frio (*cold pool*)

A piscina de ar frio de uma tempestade convectiva é um padrão de mesoescala gerado na baixa troposfera pela evaporação, e/ou derretimento e/ou sublimação dos hidrometeoros

em precipitação (HOUZE, 1993). Portanto, é um padrão observado entre a fase madura e final de desenvolvimento de uma tempestade, quando mecanismos de precipitação já estão em andamento. Os processos termodinâmicos envolvidos nas citadas mudanças de fase da água (que são no sentido de uma entropia mais alta) consomem calor latente. Isto promove um resfriamento do ar que - seguindo os mesmos passos de Markowski e Richardson (2010) - pode ser quantificado a partir da primeira lei da termodinâmica e da definição de temperatura potencial (θ), assim:

$$\delta\theta = \frac{\theta}{T} \frac{l}{c_p} \delta r_h \quad (1.9)$$

, sendo $\delta\theta$ a variação da temperatura potencial da parcela de ar em função da mudança de fase, T a temperatura absoluta do ar, c_p o calor específico do ar à pressão constante, l o calor latente de vaporização (l_v), fusão (l_f) ou sublimação (l_s), e δr_h é a variação na razão de mistura do respectivo hidrometeoro que experimentou evaporação, derretimento ou sublimação (i.e., no nosso contexto, δr_h é negativo). (Ver apêndice (A) para a derivação da equação (1.9))

De (1.9) pode-se estimar que para cada $1g/kg$ de massa de hidrometeoro evaporada / derretida / sublimada, o θ diminui em aproximadamente $2,5 / 0,3 / 2,8$ K, respectivamente. Como resultado, o resfriamento da parcela de ar aumenta sua densidade em relação ao ambiente externo - este não influenciado pela mudança de fase - e, com isto, gera uma flutuabilidade negativa ($B < 0$). Com isto, de (1.7) (analisando-se apenas a contribuição por B), é fácil compreender porque correntes descendentes frias predominam no setor precipitante da tempestade.

Como o ar da camada sub-nuvem é subsaturado, o processo de resfriamento latente é intenso nesta camada, onde, em particular, a taxa de evaporação da água de chuva é mais acentuada. Com isto, há o surgimento na camada sub-nuvem de um “domo” de ar frio que, tipicamente, se espalha lateralmente (e verticalmente) enquanto se mantiverem os processos de mudança de fase de água citados acima (Figura 1.2).

O tamanho da piscina de ar frio varia de acordo com a extensão da área de precipitação da atividade convectiva, com sua largura podendo variar de poucas dezenas de quilômetros (como em uma pancada de chuva isolada) a várias centenas de quilômetros (como em uma linha de instabilidade) (JOHNSON, 2001). Por sua vez, a profundidade de uma piscina de ar frio pode chegar a $3km$ (HOUZE, 1993). Sua intensidade varia de acordo com as taxas de evaporação/derretimento/sublimação (conforme previsto pela equação (1.9)), apresentando, em geral, temperatura na ordem de $10K$ mais baixa que a temperatura ambiente (ENGERER; STENSRUD; CONIGLIO, 2008).

A piscina de ar frio também desempenha um papel relevante para a formação dos padrões de circulação em mesoescala descritos nas próximas subseções.



Figura 1.2: Representação esquemática de uma piscina de ar frio induzida pela atividade convectiva - este esquema ilustra uma piscina de ar frio sob uma tempestade já em fase de dissipação. Figura adaptada do módulo de treinamento do MetEd-COMET da *University Corporation for Atmospheric Research* (www.meted.ucar.edu).

1.2.2 Mesoalta (*mesohigh*)

A mesoalta é outro padrão de superfície em mesoescala observado em tempestades e se forma primariamente como uma resposta hidrostática ao acúmulo de ar resfriado na piscina de ar frio.

Sua formação pode ser explicada via a dinâmica da convecção, analisando-se as perturbações de pressão induzidas pela variação vertical do campo de fluviabilidade, cuja proporcionalidade é descrita como (p.ex., Houze (1993)):

$$p'_B \propto -\frac{\partial(\bar{\rho}B)}{\partial z} \quad (1.10)$$

, sendo p'_B a perturbação no campo de pressão induzida pela variação da fluviabilidade (B) e $\bar{\rho}$ a densidade do estado básico. (Ver apêndice C para a derivação completa da expressão (1.10))

Desta relação de proporcionalidade observa-se que variações negativas de fluviabilidade com a altura contribuem para perturbações positivas no campo de pressão, e vice-versa. (Aqui é assumido que as variações verticais de B são muito maiores que as variações verticais de $\bar{\rho}$, o que é uma boa aproximação em se tratando de tempestades convectivas). Assim, conforme ilustrado na figura 1.3, a presença de um volume de ar mais denso que o ambiente externo, como é o caso do ar resfriado da piscina de ar frio, induzirá uma perturbação positiva no campo de pressão no flanco inferior deste volume - que no nosso caso de interesse é ao nível da superfície - resultando na mesoalta. Assim, em última análise, quanto mais intenso for o resfriamento por evaporação/derretimento/sublimação da precipitação mais acentuada será a mesoalta.

Em situações de correntes descendentes muito intensas, processos não-hidrostáticos, associados ao impacto físico das correntes descendentes com a superfície, podem contribuir para o aumento da pressão em superfície na mesoalta (WAKIMOTO, 1982; MARKOWSKI;

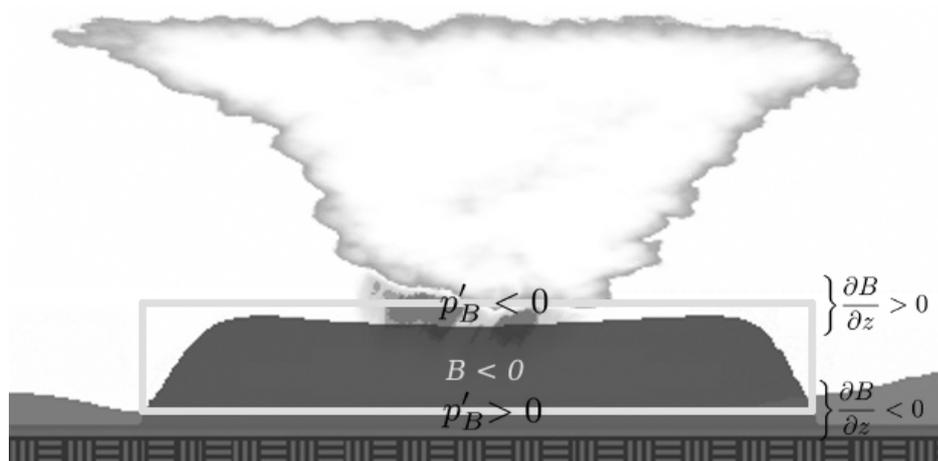


Figura 1.3: Perturbações no campo de pressão induzidas pela presença de um volume de ar com fluatibilidade negativa - p. ex., ar resfriado pela evaporação da chuva. Figura adaptada do módulo de treinamento do MetEd-COMET da *University Corporation for Atmospheric Research* (www.meted.ucar.edu).

RICHARDSON, 2010; DOSWELL, 2001).

A presença de uma mesoalta induzirá, principalmente em suas bordas, um gradiente horizontal de pressão que acelerará horizontalmente as parcelas de ar resfriadas da piscina de ar frio. Neste estágio dá-se origem a um efluxo lateral divergente da piscina de ar frio, gerando a frente de rajada.

1.2.3 Frente de rajada (*gust front*)

A frente de rajada é a fronteira existente em superfície entre o efluxo lateral de massa gerado pela tempestade convectiva e o ar do ambiente externo à circulação convectiva (WAKIMOTO, 1982). A frente de rajada pode ser entendida como uma resposta dinâmica à perturbação no campo de massa em superfície quando da formação da piscina de ar frio e da mesoalta; ou, alternativamente, como resultado do processo de conservação de massa no momento em que as correntes descendentes da tempestade atingem a condição de impermeabilidade imposta pela superfície da Terra. Em essência, a frente de rajada está intimamente relacionada ao espalhamento lateral da piscina de ar frio e da mesoalta. (Entretanto, a existência de rajadas de vento na escala convectiva não requer necessariamente a existência de uma piscina de ar frio ou mesoalta; mesobaixas e fenômenos conhecidos como “*heatbursts*” (FIEBRICH; CRAWFORD, 2001) também são capazes de gerar rajadas de vento na escala convectiva).

Um modelo conceitual idealizado de uma frente de rajada é mostrado na figura 1.4, ilustrando suas características em termos das variações da pressão atmosférica, velocidade e direção do vento e temperatura do ar. Logo na dianteira da frente de rajada observa-se um aumento não-hidroestático de pressão causado pela colisão da massa de ar frio do efluxo com a massa de ar do ambiente de influxo.

Imediatamente sob a frente de rajada há uma abrupta mudança na direção do vento associada agora ao efluxo lateral da corrente descendente. A temperatura do ar sofre uma rápida diminuição, sendo a manifestação da piscina de ar frio. Neste ambiente, há um aumento gradual e hidrostático da pressão (i.e., o deslocamento da mesoalta), até atingir a região de máxima subsidência, onde então, ocorre um máximo de pressão devido à contribuição não-hidrostática adicional devido ao impacto da corrente descendente com a superfície. Em tempestades severas, causadoras de rajadas de vento destrutivas, as perturbações não-hidrostáticas ilustradas na figura são mais relevantes. Em tempestades comuns esta contribuição não-hidrostática é de mais difícil detecção.

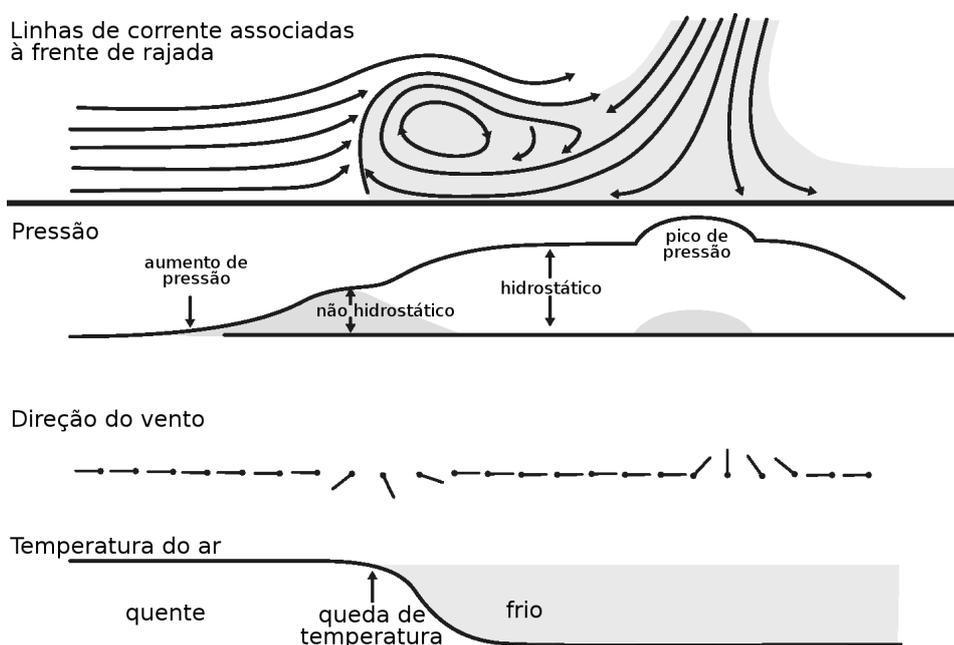


Figura 1.4: Visão instantânea das linhas de corrente, variação da pressão atmosférica, vento e temperatura do ar através de uma frente de rajada. Figura adaptada de Markowski e Richardson (2010), a partir do original de Wakimoto (1982).

No efluxo na retaguarda do evento convectivo, uma nova alteração na direção do vento pode ser percebida.

É importante ratificar que o projeto da Estação Mesomóvel tem como objetivo detectar as principais características das piscinas de ar frio, das frentes de rajada e das mesoaltas.

1.2.3.1 Frentes de rajada como correntes de densidade

Em muitos aspectos a frente de rajada comporta-se como uma corrente de densidade. A corrente de densidade (também chamada de *corrente de gravidade*) é o escoamento horizontal de um fluido relativamente denso embebido em um fluido menos denso, com seu movimento forçado devido à força do gradiente de pressão existente através da interface entre os dois fluidos (MARKOWSKI; RICHARDSON, 2010).

Correntes de densidade têm sua dinâmica bem compreendida através de simulações numéricas e experimentos em laboratório. Para este trabalho é de particular interesse entender quais fatores influenciam a sua dinâmica.

A velocidade de deslocamento de uma corrente de densidade é obtida a partir da equação do momento, assumindo que o fluido é invíscido, aplicando a aproximação de Boussinesq e condições estacionárias (sistema de referência movendo-se juntamente com a corrente de densidade), dando como resultado:

$$c = \sqrt{2gH \frac{\rho - \bar{\rho}}{\bar{\rho}}} \quad (1.11)$$

sendo c a velocidade de avanço da corrente de densidade, g a aceleração da gravidade, H a altura da corrente de densidade, ρ a densidade do fluido no ambiente interno à corrente de densidade e $\bar{\rho}$ a densidade do fluido no estado básico. No apêndice (B) encontra-se uma derivação mais detalhada da equação da velocidade de avanço da corrente de densidade.

De (1.11) percebe-se que a velocidade de avanço da corrente de densidade é diretamente influenciada tanto por sua altura quanto por sua diferença de densidade em relação ao ambiente externo. Isto possui equivalência com o que ocorre no avanço de uma frente de rajada.

Devido a efeitos de mistura e fricção da corrente de densidade com uma atmosfera real e com a superfície, frequentemente (1.11) é parametrizada da seguinte forma:

$$c = k \cdot \sqrt{gH \frac{\rho - \bar{\rho}}{\bar{\rho}}} \quad (1.12)$$

O parâmetro k ajusta a equação (1.11) para valores mais próximos ao real e tipicamente assume valores entre 0,7 e 1,3 (MARKOWSKI; RICHARDSON, 2010).

1.2.4 Mesobaixa (*wake low*)

Mesobaixas observadas com a atividade convectiva são a resposta hidrostática em superfície a um ramo convectivo subsidente e sub-saturado proveniente da média troposfera geralmente observado na retaguarda do sistema convectivo, na região de precipitação estratiforme, mas também ocasionalmente registrado na dianteira do sistema convectivo (vide figura 1.1). Na retaguarda este padrão ocorre especialmente nos estágios maduro e de dissipação de um sistema convectivo de mesoescala (SCM) (JOHNSON; HAMILTON, 1988). (Com exceção das supercélulas, tempestades isoladas tipicamente não produzem mesobaixas).

A figura 1.5, de Johnson e Hamilton (1988), mostra uma seção vertical idealizada na retaguarda de um SCM com precipitação estratiforme, mostrando um mecanismo conhecido de formação de mesobaixas em superfície no setor traseiro do sistema. Em um referencial

que se desloca com o SCM fica evidente a transição, em mesoescala, entre um escoamento ascendente saturado da dianteira para a retaguarda do SCM e um escoamento descendente sub-saturado da traseira para a dianteira do SCM. Este segundo escoamento às vezes se dá na forma de um jato de influxo de retaguarda (*rear inflow jet* na figura). Em todo caso, este escoamento promove o entranhamento de ar ambiental sub-saturado no flanco traseiro da nebulosidade estratiforme do SCM. Com a evaporação/sublimação dos hidrometeoros ocorre o resfriamento latente; mas à medida que a concentração de hidrometeoros no setor estratiforme do SCM reduz-se pela mudança de fase, este resfriamento latente deixa de ser suficiente para compensar o aquecimento por compressão adiabática das parcelas de ar que subsidem neste escoamento de mesoescala. A este aquecimento segue, em resposta hidrostática, uma queda de pressão em superfície formando uma mesobaixa na “esteira” do SCM, ou *wake low* em inglês (MARKOWSKI; RICHARDSON, 2010). De fato, é possível um SCM deixar um sinal detectável da sua mesobaixa de retaguarda mesmo algumas horas após a sua dissipação (NASCIMENTO; CALVETTI, 2006).

Em tempestades tipo supercélula outra forma de mesobaixa também é observada em superfície, associada à formação de mesociclones de baixos níveis (HOUZE, 1993; DAVIES-JONES; TRAPP; BLUESTEIN, 2001; MARKOWSKI; RICHARDSON, 2010). Por uma questão de brevidade, nesta revisão optou-se por enfatizar as mesobaixas associadas a SCMs, as quais são menos raras.

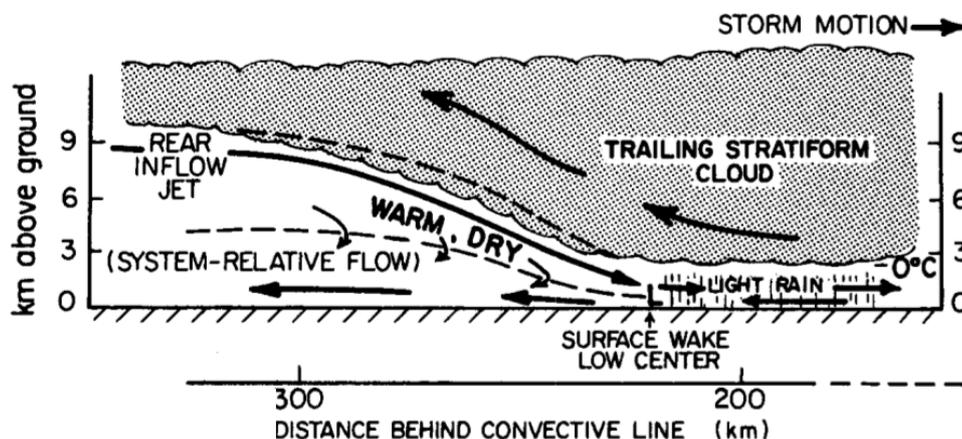


Figura 1.5: Modelo conceitual idealizado de uma seção transversal da região de precipitação estratiforme de uma linha de instabilidade. As setas indicam linhas de corrente do escoamento relativo ao sistema e a linha tracejada indica a região onde o escoamento relativo é nulo. Adaptado de Johnson e Hamilton (1988).

1.2.5 Importância das circulações convectivas de superfície para a meteorologia de mesoescala

Tanto piscinas de ar frio, quanto mesoaltas e frentes de rajada são fenômenos de mesoescala de suma importância para a análise e previsão de tempo em muito curto prazo e

“*nowcasting*”. A convergência horizontal de massa observada na expansão lateral das bordas da piscina de ar frio (e da mesoalta) e ao longo da frente de rajada pode ser intensa o suficiente para induzir o disparo de nova atividade convectiva. Estas situações caracterizam o que é chamado em inglês de “*outflow boundary*” (fronteira de efluxo), que é uma circulação de mesoescala que deve receber muita atenção por parte do meteorologista interessado na previsão de prováveis regiões de redensolvimento convectivo (WILSON; MUELLER, 1993; MARKOWSKI; RICHARDSON, 2010).

Além disto, a intensidade da piscina de ar frio e da mesoalta pode fornecer informação relevante a respeito da intensidade esperada para as rajadas de vento. O gradiente horizontal de pressão através da borda da mesoalta acelerará os ventos em superfície; em situações de mesoaltas muito intensas as rajadas de vento geradas podem atingir o nível destrutivo, como é o caso extremo de microexplosões e de linhas de instabilidade tipo “*bow echo*” (WAKIMOTO, 2001). O comportamento do deslocamento da mesoalta em relação ao escoamento sinótico em baixos níveis também é importante para definir, por exemplo, a direção preferencial e velocidade de deslocamento de sistemas convectivos de mesoescala (CORFIDI, 2003). Todos estes fatores apontam para a necessidade dos modelos numéricos de alta resolução em representar corretamente a evolução de frentes de rajada, piscinas de ar frio e mesoaltas (STENSRUD et al., 1999). Como a intensidade destes fenômenos é fortemente influenciada por processos de microfísica de nuvem (p.ex., evaporação das gotas de chuva) - os quais são tipicamente mal parametrizados em modelos numéricos (p.ex., Dawson II e Xue (2010)) - é desejável ampliar a capacidade observacional das circulações convectivas em superfície para a validação de simulações numéricas em alta resolução (REINHART; WEISS; DOWELL, 2010). Assim, a importância de um sistema observacional voltado para a detecção destes tipos de fenômeno torna-se evidente (MARKOWSKI, 2002; SKINNER et al., 2011).

A seguir é feita uma revisão de alguns sistemas de observação meteorológica de superfície utilizando unidades táticas de interceptação de tempestades.

1.3 Sistemas móveis de observação meteorológica em superfície

Nas últimas décadas, diversos desenvolvimentos na área de instrumentação meteorológica se deram visando a concepção de sistemas adaptativos de observação em superfície que possam ser transportados, instalados e operados para o monitoramento *in situ* de tempestades convectivas em modo de interceptação. Tanto instrumentos automáticos convencionais quanto unidades de sensoriamento remoto fazem parte deste longo desenvolvimento (BLUESTEIN, 1999; DAVIES-JONES; TRAPP; BLUESTEIN, 2001; BLUESTEIN; WAKIMOTO, 2003)

Dentre os diversos sistemas já desenvolvidos para a coleta de dados meteorológicos via o posicionamento intencional de instrumentos automáticos na trajetória de tempestades (BLU-

ESTEIN, 1983; BROCK; LESINS; WALKO, 1987; WINN; HUNYADY; AULICH, 1999; LEE; SAMARAS; YOUNG, 2004) dois sistemas merecem destaque nesta revisão bibliográfica por representarem de maneira mais próxima a filosofia que inspirou o projeto da Estação Mesomóvel, quais sejam: a Mesonet Móvel (*Mobile Mesonet*) e a *StickNet*.

1.3.1 Mesonet Móvel (*Mobile Mesonet*)

Desenvolvidas pelos *National Severe Storms Laboratory* (NSSL), *Center for Analysis and Prediction of Storms* (CAPS) e *University of Oklahoma* (OU), como ferramentas de auxílio no projeto *Verification of the Origins of Rotation in Tornadoes Experiment* (VORTEX; Rasmussen et al. (1994)), as unidades da Mesonet Móvel consistem de instrumentos de observação meteorológica montados, de forma semi-permanente, sobre um automóvel, permitindo mobilidade até regiões próximas a tempestades, realizando observações em superfície de fenômenos atmosféricos associados à atividade convectiva, como, por exemplo: piscinas de ar frio, frentes de rajada, mesoaltas, mesobaixas, regiões de influxo e efluxo de tempestades, escoamento próximo a tornados, entre outros (STRAKA; RASMUSSEN; FREDRICKSON, 1996; MARKOWSKI, 2002).

Cada unidade consiste em um automóvel de modelo disponível comercialmente, suporte de instrumentos, instrumentos meteorológicos e de georeferenciamento, *datalogger*, sistema de energia e um computador portátil. Os instrumentos são instalados sobre um suporte construído com tubos de alumínio com diâmetro de 3/4", fixado ao teto do automóvel. As variáveis meteorológicas observadas são: pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento. A temperatura é obtida através de dois sensores, sendo um integrado ao termohigrômetro, com tempo de resposta alto e outro independente, com tempo de resposta baixo (variando entre 0,6 e 5 segundos, dependendo do fluxo de ar sobre ele). Cada unidade utiliza uma bússola eletrônica, para registrar sua direção em relação ao norte magnético, e sistema de posicionamento global via satélite (GPS), para registrar sua posição, velocidade e direção de deslocamento. Com estas informações, pode-se, também, determinar os valores de velocidade e direção do vento, mesmo com a estação em movimento.

A figura 1.6a ilustra a montagem dos instrumentos sobre um veículo, e a figura 1.6b detalha a disposição dos instrumentos em uma Mesonet Móvel.

A Mesonet Móvel já demonstrou grande sucesso e utilidade na amostragem das variáveis meteorológicas em superfície nas vizinhanças e no interior de tempestades convectivas severas (p.ex., Markowski, Straka e Rasmussen (2002)).

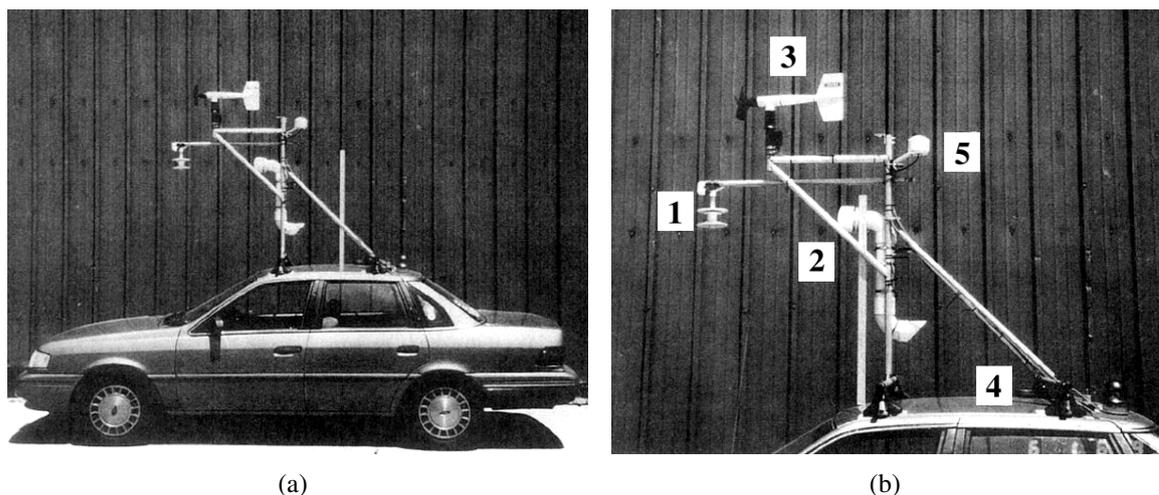


Figura 1.6: (a) Visão geral de uma Mesonet Móvel. (b) Detalhe da disposição dos instrumentos: (1) barômetro, (2) termômetro e termohigrômetro, (3) anemômetro, (4) sistema de posicionamento global, (5) bússola eletrônica. Adaptado de Straka, Rasmussen e Fredrickson (1996).

1.3.2 Sticknet

No ano de 2005, um grupo da *Texas Tech University* iniciou o desenvolvimento de uma série de plataformas móveis de observação meteorológica em superfície, denominadas *StickNet*. Estas plataformas foram projetadas para medir diversas variáveis meteorológicas e tem em suas aplicações a vantagem de serem transportadas, instaladas e postas em funcionamento muito rapidamente, permitindo seu posicionamento nas proximidades e no caminho de tempestades severas (WEISS; SCHROEDER, 2008b; SCHROEDER; WEISS, 2008).

Há duas versões de estações *StickNet*, denominadas como tipo “A” e “B” (Figura 1.7). O tipo “A” possui instrumentos para medir temperatura e umidade relativa do ar, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento. Utilizando chaveamento eletrônico é possível escolher rapidamente, sem a necessidade de reconfiguração, a frequência de amostragem a ser usada durante o experimento, podendo ser de 1, 5 ou 10Hz. As estações do tipo “B” utilizam um único instrumento integrado de medição, que mede as mesmas variáveis do tipo “A”, além de estimar o volume de precipitação (na forma líquida ou sólida) através de um disdrômetro. A amostragem é realizada na frequência fixa de 1Hz.

Ambos os modelos utilizam sistema de posicionamento global via satélite integrado, a fim de registrar sua posição geográfica e sincronizar o relógio do *datalogger* automaticamente, e uma bússola eletrônica, para referenciar as medidas de direção do vento em relação ao norte magnético. Os instrumentos são montados em uma estrutura metálica fixa ao tripé e o conjunto de aquisição de dados, que consiste na caixa de proteção, *datalogger* e o sistema de energia, pode ser destacado do conjunto e transportado separadamente.

As estações *StickNet* têm sido empregadas em campanhas de interceptação científica de tempestades severas, como descrito em Reinhart, Weiss e Dowell (2010) e Skinner et al. (2011), documentando com sucesso a localização, passagem e intensidade de frentes de rajada,

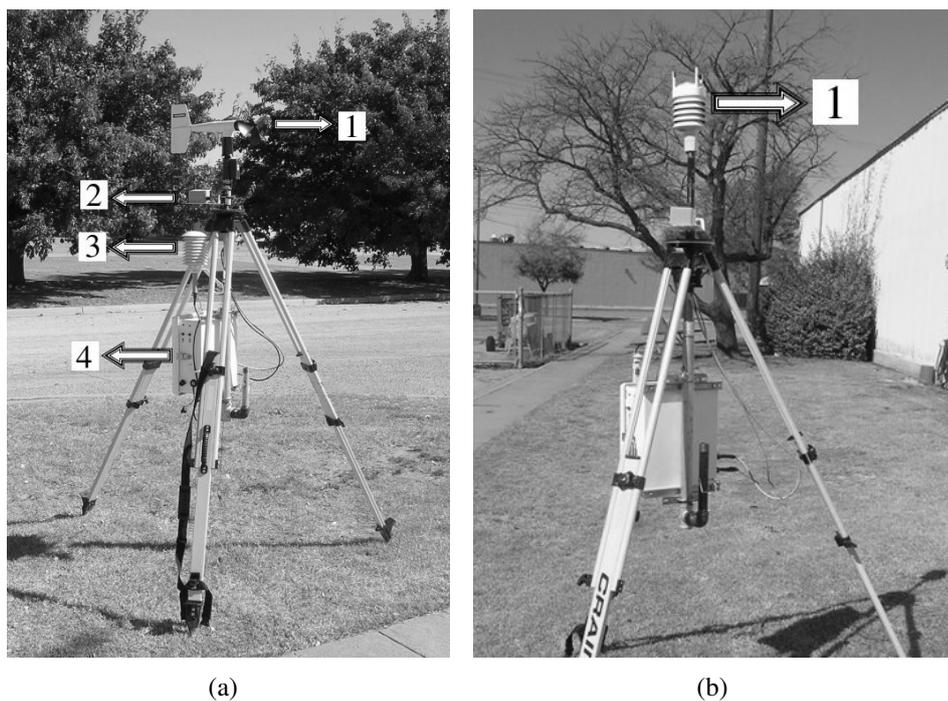


Figura 1.7: Versões de estação móvel de observação atmosférica em superfície montada sobre tripé da *StickNet*. Em (a) um modelo do tipo A indicando (1) Anemômetro, (2) bússola eletrônica, (3) termohigrômetro, (4) barômetro e conjunto de aquisição de dados. Em (b) um modelo do tipo B, indicando (1) o instrumento integrado. Fotografias por Ian Giammanco; Adaptado de Skinner (2012).

piscinas de ar frio, e mesociclones de baixos níveis. Naturalmente, a *StickNet* representa o sistema de observação adaptativa de tempestades que serviu de modelo para a concepção da Estação Mesomóvel.

2 METODOLOGIA

2.1 Instrumentação

A metodologia por trás da componente instrumental deste trabalho baseia-se em dois conceitos fundamentais: um deles refere-se à utilização de plataformas móveis de observação para a obtenção de dados atmosféricos em regiões críticas para as quais um aumento da resolução observacional pode ter grande impacto no monitoramento e previsão do tempo (BERGOT et al., 1999; LANGLAND et al., 1999). Estas regiões críticas variam no tempo e no espaço em função da dinâmica particular dos distintos fenômenos meteorológicos de modo que existe a necessidade da plataforma de observação ter mobilidade para atender as necessidades observacionais em caráter específico. O segundo conceito refere-se à própria concepção instrumental e logística das diferentes plataformas móveis de observação. Exemplos destas concepções incluem as chamadas meso-redes móveis de superfície (*mobile mesonets*) (STRAKA; RASMUSSEN; FREDRICKSON, 1996), os veículos aéreos não tripulados com sensores embarcados (HOLLAND et al., 1998; GONÇALVES et al., 2006) e dropsondas (FRANKLIN; BLACK; VALDE, 2003). Abaixo segue a descrição do sistema observacional desenvolvido e empregado nesta pesquisa.

2.1.1 Descrição geral do sistema

Inspirada na *StickNet* desenvolvida para experimentos científicos de interceptação de tempestades na América do Norte (WEISS; SCHROEDER, 2008a; SCHROEDER; WEISS, 2008; SKINNER et al., 2011), a metodologia empregada neste trabalho consiste em montar um conjunto de instrumentos meteorológicos sobre um tripé tipicamente usado para teodolitos. O conjunto resultante, chamado de "Estação Mesomóvel", representa uma unidade tática de observação automática facilmente transportável e de pronta instalação (através de encaixes modulares) sobre qualquer terreno plano minimamente adequado para a observação meteorológica. Um exemplo é mostrado na figura 2.1.

Segundo a classificação proposta em Maggiotto et al. (2007), esta estação automática móvel é do *tipo – X* (Extraordinária). As variáveis meteorológicas de superfície medidas são: pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento e precipitação. As variáveis e os respectivos instrumentos selecionados estão listados na tabela 2.1.



Figura 2.1: Estação Mesomóvel sendo instalada (a) e em funcionamento (b), posicionada à dianteira de uma tempestade convectiva. Fotografias gentilmente cedidas por Nascimento, E. (2012) e Ilha, M. (2012) (respectivamente).

Tabela 2.1: Instrumentos da Estação Mesomóvel

Instrumento	Modelo	Variável(is)
Termohigrômetro	Onset S-THB-M002	Temperatura e umidade relativa
Barômetro	Onset S-BPB-CM50	Pressão atmosférica
Pluviômetro	Onset S-RGB-M002	Precipitação
Anemômetro	R. M. Young 05103	Direção e velocidade do vento

2.1.1.1 Tripé e estrutura para os instrumentos

O tripé é a plataforma central da Estação Mesomóvel, sobre a qual a configuração e instalação dos instrumentos é realizada. Neste projeto é utilizado um tripé de madeira da marca Trident, modelo TSD-620 (Figura 2.2), que é disponibilizado comercialmente para uso em topografia e agrimensura. O peso do tripé é de 5kg. Suas partes metálicas são de alumínio injetado e a junção entre as hastes e o cabeçote é feita com buchas de *nylon*, tornando o conjunto resistente à oxidação. Estas características são adequadas para a durabilidade do material, tendo em vista o uso de caráter extraordinário ao qual o tripé será submetido.

Para adaptar o tripé à funcionalidade da Estação Mesomóvel, poucas modificações foram necessárias. Uma delas foi a remoção da manopla de fixação dos instrumentos de agrimensura. Esta medida torna a abertura do cabeçote do tripé disponível para a instalação dos conjuntos superior e inferior de instrumentos. A outra, foi a substituição dos parafusos com manípulos plásticos - utilizados no ajuste de altura das hastes - por outros equivalentes, com manípulos metálicos soldados diretamente às suas extremidades. Por conveniência, um nível de bolha foi fixado na lateral do cabeçote para auxiliar no ajuste do nível horizontal no momento da instalação.

A estrutura de suporte dos instrumentos é constituída por cinco peças, sendo: dois tubos de aço galvanizado de 3/4" de diâmetro e 50cm de comprimento, ambos com rosca em uma das extremidades; dois flanges de ferro fundido galvanizado com rosca 3/4"; uma conexão de aço com roscas 3/4". Esta estrutura permanece com uma pré-montagem em duas partes: a do

conjunto inferior, consistindo em um tubo, um flange e a conexão, e a superior, consistindo em um flange e um tubo (Figuras 2.2b e 2.2c). Com esta configuração, a união entre as partes é feita posicionando inicialmente o conjunto inferior, verificando a posição de encaixe com o cabeçote do tripé, e então posicionando e rosqueando o conjunto superior no conjunto inferior, concluindo esta etapa da montagem. O sistema completo montado com todos os instrumentos meteorológicos é mostrado na figura 2.3a, caracterizando a Estação Mesomóvel *per se*.



Figura 2.2: (a) Tripé Trident TSD-620. Em (b) e (c) observa-se a adaptação de flanges para a conexão entre os conjuntos superior e inferior.

Apesar de não ter sido feito nenhum teste em túnel de vento, julga-se, pela experiência do sistema *StickNet* norte-americano (WEISS; SCHROEDER, 2008b) e pela experiência adquirida localmente nas intercepções de tempestades realizadas até este momento, que a Estação Mesomóvel será capaz de resistir à ação das rajadas de vento na maioria dos sistemas convectivos que ocorrem na nossa região de interesse. Mais detalhes sobre o procedimento de ancoramento da Estação Mesomóvel ao solo serão fornecidos mais adiante neste capítulo.

2.1.2 Sensores e instrumentos

Os instrumentos estão conectados a um *datalogger* da marca Hobo, modelo U30-NRC-000-05-S100-000 (Figura 2.3b). Não há a necessidade de telemetria e nem de grande capacidade de armazenamento de dados, uma vez que a estação móvel geralmente permanece instalada por curtos períodos de tempo - tipicamente menor que 4 horas quando em modo de interceptação de tempestades - e a análise dos dados é realizada em momento posterior. A energia do sistema é fornecida por uma bateria interna, cuja autonomia permite o funcionamento contínuo da estação, com todos os seus instrumentos em operação, por mais 30 dias sem a necessidade de recarga.

As variáveis são amostradas com frequência maior que a padronizada pela OMM para uma rede sinótica de estações automáticas de superfície - que é de dados horários obtidos através de medições instantâneas¹ - e também maior que a utilizada operacionalmente em algumas das redes Mesonet da América do Norte - que é de três valores médios de 5 minutos reportados a cada 15 minutos (BROCK et al., 1995). Na Estação Mesomóvel os dados são amostrados com frequência máxima de 1 registro a cada 3 segundos. Esta frequência é definida durante a inicialização do *datalogger*, levando em consideração as características dos fenômenos alvo a serem observados e o tempo estimado de duração da coleta de dados. Devido aos limites de armazenamento do *datalogger*, quanto maior a frequência de amostragem, menor será o intervalo de tempo total possível a ser amostrado. Ao exceder o limite de memória, uma regravação cíclica é iniciada, substituindo os registros mais antigos por novos. A tabela 2.2 relaciona o intervalo de amostragem com o limite (temporal) de armazenamento, até que a regravação cíclica seja iniciada.

Tabela 2.2: Capacidade de armazenamento de acordo com a frequência de amostragem na Estação Mesomóvel

Intervalo	Armazenamento
3 s	1 dia 20h 43m
5 s	3 dias 2h 31m
10 s	6 dias 5h 03m
15 s	9 dias 7h 35m
20 s	12 dias 10h 07m
30 s	18 dias 15h 11m
60 s	37 dias 6h 22m

Verificações e comparações em relação a valores obtidos em escala de tempo maiores, como dados provindos de redes operacionais de observação de superfície, podem ser realizadas em um pós processamento estatístico adequado (p.ex., médias horárias sobre os dados obtidos com a Estação Mesomóvel a fim de comparação com uma estação típica da rede operacional).

Os instrumentos são dispostos sobre o tripé de maneira que: (a) o termohigrômetro

¹Uma medição instantânea é definida pela OMM como a média em um minuto da variável em questão (WMO, 2006)

permaneça posicionado a cerca de $1,5m$ de altura (Figura 2.3b), aproximadamente conforme recomendações da OMM (WMO, 2006; MAGGIOTTO et al., 2007); e (b) o anemômetro, dadas as características da estação, permaneça posicionado a aproximadamente $2m$ de altura (Figura 2.3a), uma disposição que difere do padrão OMM, mas considerado satisfatório para as medições propostas neste estudo (WEISS; SCHROEDER, 2008b; SKINNER et al., 2011).

O conjunto lógico, composto pelo abrigo com o *datalogger* e bateria, é posicionado na parte inferior do tripé (Figura 2.3b), o mais próximo possível do solo de maneira a abaixar o centro de gravidade de todo o conjunto, aumentando a estabilidade da montagem. Fixado na lateral externa do conjunto lógico encontra-se o barômetro.

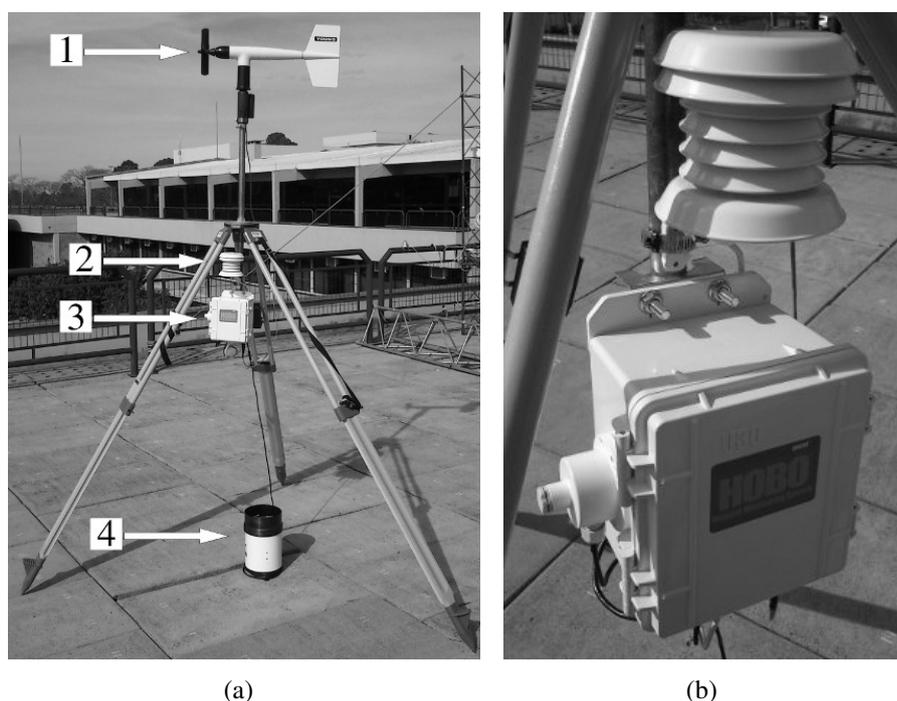


Figura 2.3: (a) Visão geral da Estação Mesomóvel com os conjuntos superiores e inferiores instalados. As setas indicam a disposição do (1) anemômetro, (2) termohigrômetro, (3) barômetro e *datalogger* e (4) pluviômetro. Em (b) o conjunto inferior em destaque.

A instalação do pluviômetro ocorre destacada do conjunto principal, sendo afixado em suporte próprio, diretamente no solo.

Algumas características mais específicas dos instrumentos utilizados e da montagem serão apresentadas nas subseções a seguir.

2.1.2.1 Pressão atmosférica

Um sensor de pressão atmosférica da marca Onset, modelo S-BPB-CM50, é utilizado na Estação Mesomóvel. O intervalo de medida de pressão deste sensor é de 660 a $1070hPa$ com resolução de $0,1hPa$. O intervalo de temperatura de operação do sensor é de -40 a $70^{\circ}C$

e sua deriva de calibração é de $1hPa/ano$.

A fixação do instrumento foi feita na lateral externa do conjunto lógico (ver figura 2.4) e na posição vertical, de forma a evitar o acúmulo de água sobre o elemento sensor em caso de precipitação. Sua posição em relação ao solo é de aproximadamente $1,2m$ de altura, podendo existir uma variação na ordem de $\pm 20cm$, dependendo da topografia do terreno onde a Estação for afixada.

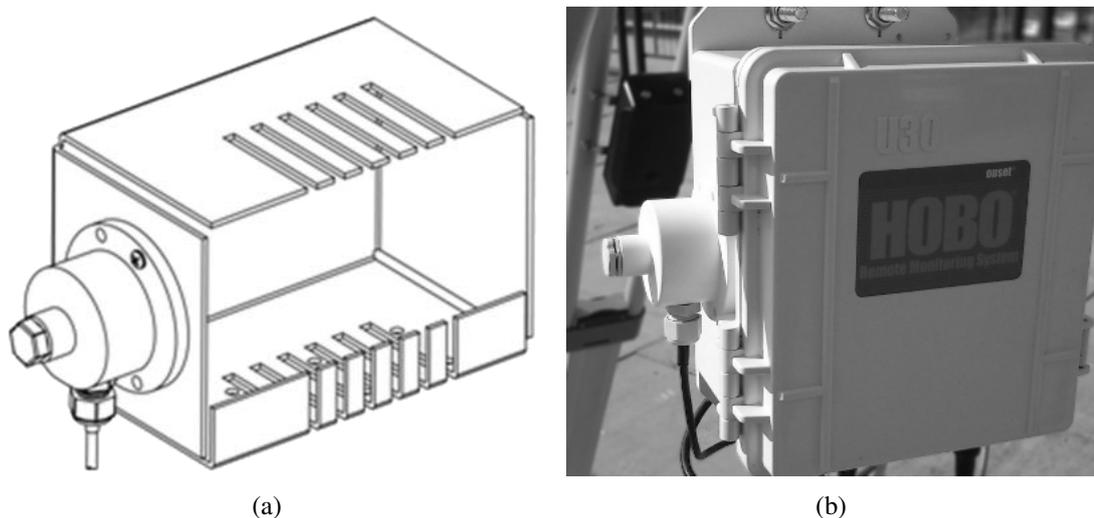


Figura 2.4: (a) Esquema de instalação do barômetro e (b) sua posição já instalada na Estação Mesómovel.

2.1.2.2 Temperatura e umidade relativa do ar

A temperatura e umidade relativa do ar são obtidas com um instrumento conjugado da marca Onset, modelo S-THB-M002. Neste instrumento o sensor de temperatura opera em um intervalo de medida de -40 a $75^{\circ}C$ com uma precisão de $0,2^{\circ}C$ dentro do intervalo de 0 a $50^{\circ}C$, e o sensor de umidade relativa opera no intervalo de 0 a 100% , dentro dos mesmos limites de temperatura citados anteriormente.

Sua instalação é feita em conjunto com o abrigo de radiação, de ventilação passiva, da marca Onset, modelo RS3. O conjunto resultante é fixado imediatamente acima do conjunto lógico (Figura 2.5), de forma que, quando em operação, permaneça a aproximadamente $1,5m$ de altura.

2.1.2.3 Velocidade e direção do vento

O anemômetro instalado na Estação Mesómovel é um R. M. Young 05103, de quatro hélices cuja rotação produz um sinal de corrente alternada senoidal com frequência proporcional à velocidade do vento. Segundo especificações do fabricante, cada revolução completa

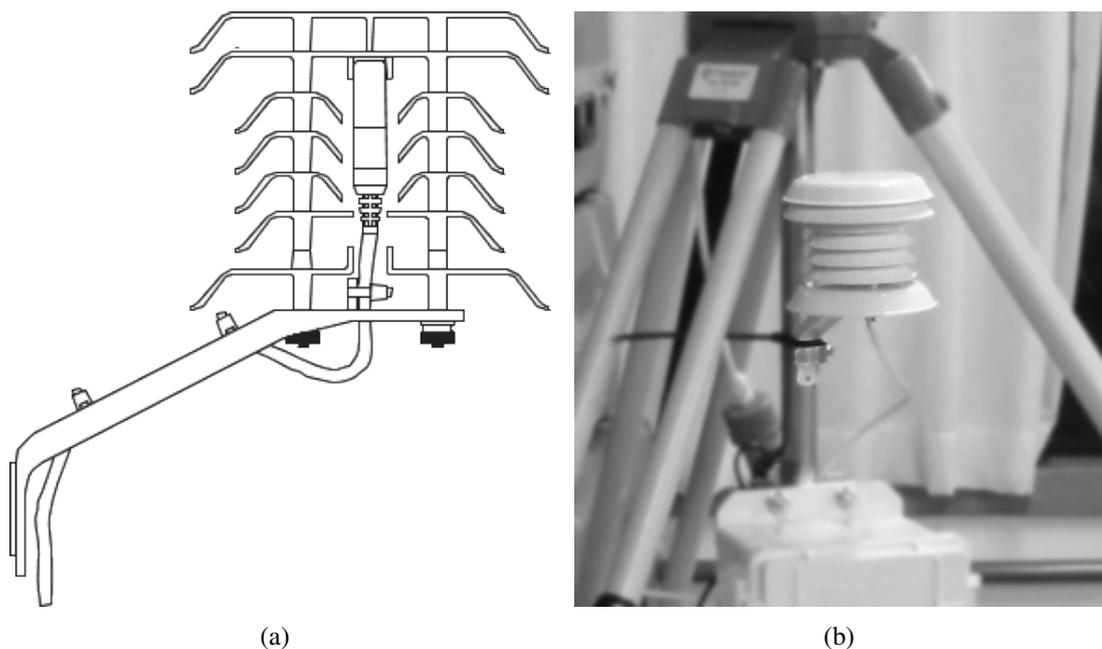


Figura 2.5: Idem à figura 2.4, mas para o termohigrômetro.

da hélice induz três ciclos da onda senoidal que correspondem a $0,0980m/s$. Os limites de operação do anemômetro variam de 0 a $100m/s$, com precisão de $\pm 0,3m/s$ e a sensibilidade de início é de $1m/s$. O equipamento é instalado em torno de $2m$ de altura (Figura 2.6). A conversão de sinais e a conexão do anemômetro ao *datalogger* é realizada com um adaptador da marca Onset, modelo S-WCE-M003, específico para este modelo.

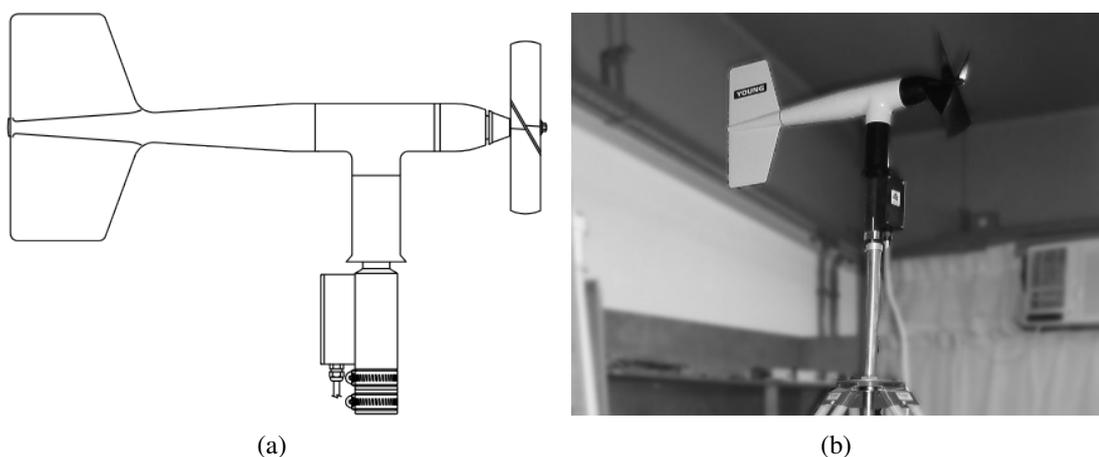


Figura 2.6: Idem à figura 2.4, mas para o anemômetro.

2.1.2.4 Precipitação

A Estação Mesomóvel utiliza um pluviômetro de báscula (*tipping bucket*) da marca Onset, modelo S-RGB-M002. Este tipo de pluviômetro funciona baseado em um mecanismo

com duas básculas em equilíbrio instável (sistema de *gangorra*). É acionado ao ter uma das básculas preenchida com a precipitação coletada, alternando entre a posição de equilíbrio. A cada mudança de posição do sistema basculado uma *reed switch*, que consiste em uma chave eletrônica acionada magneticamente, produz um pulso elétrico. Neste pluviômetro, cada pulso corresponde a um acúmulo de 0,2mm de chuva, que é contabilizado e convertido automaticamente pelo *datalogger*. Sua resolução é de 0,2mm e opera no intervalo de temperatura de 0 a 50°C. Possui dimensões de 22,8cm de altura, 15,4cm de diâmetro e peso de 1kg.

Durante a concepção da Estação Mesomóvel foram experimentadas diversas configurações para a instalação do pluviômetro e optou-se por instalá-lo separadamente do conjunto principal usando um suporte próprio. O suporte consiste em um tubo fixado por abraçadeiras metálicas na lateral do instrumento, que pode ser afixado diretamente ao solo. O cabo utilizado em sua conexão ao *datalogger* permite posicioná-lo a até 2m do conjunto principal.

Esta configuração foi escolhida pois, dadas as dimensões e peso deste instrumento, a sua instalação direta no tripé causaria assimetria e arrasto aerodinâmico no conjunto, gerando também torque e vibração no conjunto devido a ação do vento.

2.2 Portabilidade e instalação

Uma das características básicas da Estação Mesomóvel é ser um sistema de observação portátil (mesmo em um veículo de pequeno porte) e de rápida instalação. Durante o transporte a Estação Mesomóvel é acomodada em três partes (Figura 2.7), a saber:

- **Instrumentos:** A estrutura modular e compacta dos instrumentos é armazenada em uma mala com seu interior adaptado à forma dos instrumentos. Nesta mala são transportados os conjuntos inferior e superior de instrumentos e o pluviômetro.
- **Tripé:** O tripé é transportado em sua forma completamente fechada e recolhida;
- **Ferramentas:** Um estojo de ferramentas necessárias para a instalação/ajuste da estação Mesomóvel (marreta, alicate, chaves-de-fenda, entre outras) também é transportado.

A figura 2.8a ilustra o tripé fechado e a mala contendo a Estação Mesomóvel desmontada, ambos acondicionados dentro do porta-malas de um carro de pequeno porte (um veículo *hatchback*), comprovando sua portabilidade em um pequeno espaço. A figura 2.8b, por sua vez, mostra que bastam duas pessoas para carregar todo o artefato observacional; nesta equipe cada pessoa carrega no máximo 6kg.

O processo de instalação da Estação Mesomóvel consiste em identificar - na trajetória de uma tempestade convectiva em andamento - um terreno minimamente apropriado para a firme fixação do tripé, procurando, tanto quanto possível, superfícies planas, gramadas e distante de obstáculos que possam causar interferência nos dados coletados.



Figura 2.7: Partes da Estação Mesomóvel (mala com os instrumentos e tripé) e estojo de ferramentas.

Quando escolhido o local da instalação, as partes da Estação Mesomóvel são levadas para a montagem e instalação (Figura 2.8b), que é realizada em 5 etapas:

- **Instalação do tripé:** Um dos membros da equipe de campo monta o tripé e afixa seus pés ao solo com o uso de grampos metálicos. Um nível do tipo “bolha” adaptado ao console do tripé é utilizado para se certificar que o mesmo encontra-se ajustado na horizontal, o que é crucial para a medição anemométrica. O nivelamento é feito pelo ajuste do comprimento da cada perna do tripé, permitindo sua instalação mesmo em superfícies moderadamente inclinadas.
- **Instalação do conjunto inferior de instrumentos:** Com o tripé instalado, outro membro da equipe realiza o encaixe do conjunto de instrumentos inferior com o suporte do conjunto superior, ficando "em espera" para a instalação do anemômetro.
- **Instalação do pluviômetro:** A instalação do pluviômetro é realizada à parte, destacada do conjunto principal. Um membro da equipe posiciona o conjunto do pluviômetro preferencialmente na dianteira do conjunto principal, de forma a estar posicionado entre a estação e a tempestade, a fim de evitar interferência nas medições de precipitação devido à presença da estação, e fixa-se ao solo a haste do pluviômetro com um grampo metálico. Após sua fixação realiza-se sua conexão ao *datalogger*.
- **Instalação do anemômetro:** O anemômetro é encaixado no suporte do conjunto superior e, com a utilização de uma bússola manual, tem sua referência orientada e fixada em direção ao norte magnético. Após este processo de orientação da referência do anemômetro, sua conexão é realizada ao *datalogger*.
- **Georreferenciamento e início da coleta de dados:** Com todo o conjunto montado e instalado, realiza-se uma inspeção final nas conexões eletrônicas dos instrumentos e

o funcionamento do *datalogger*. Estando tudo em funcionamento, o início da coleta de dados é marcada com o uso do GPS, que obtém, via satélite, as coordenadas geográficas, a data e a hora.



Figura 2.8: Portabilidade da Estação Mesomóvel: (a) mala e tripé acondicionados em um veículo de pequeno porte e (b) partes da Estação Mesomóvel sendo transportadas para a montagem e instalação.

A montagem completa da Estação Mesomóvel, seguindo esta metodologia, é realizada em um intervalo de tempo variando entre 5 e 10 minutos e sua desmontagem é realizada em cerca de 10 a 15 minutos. Estes intervalos de tempo mostraram-se satisfatórios nos experimentos de interceptação de tempestades realizados até agora. Neste contexto é necessário mencionar que, em modo de interceptação, o *datalogger* da Estação Mesomóvel já sai da base em Santa Maria coletando dados, mesmo estando o conjunto totalmente desmontado dentro do veículo. Isto é necessário para se poupar o tempo de se iniciar o *software* de coleta de dados no momento da instalação da estação, o que necessitaria da conexão do *datalogger* a um computador portátil, consumindo tempo precioso de operação.

A interceptação é feita preferencialmente à dianteira da tempestade, amostrando inicialmente seu ambiente de influxo (i.e., a massa de ar do ambiente pré-convectivo). Uma interceptação completa e bem sucedida com a Estação Mesomóvel consiste da amostragem da passagem da frente de rajada, da precipitação convectiva e precipitação estratiforme sobre a estação. Para atingir este objetivo as etapas de previsão de tempo a curto prazo e *nowcasting* são fundamentais.

2.3 Estratégia Operacional

Neste projeto, a escolha do local alvo das interceptações de tempestades depende da identificação prévia da região onde a atividade convectiva é mais provável. Para isto, é estabelecida uma rotina diária de previsão de tempo nos horizontes de curto prazo, muito curto prazo

e *nowcasting*, conduzida com o auxílio do Grupo de Modelagem Atmosférica da Universidade Federal de Santa Maria (GRUMA/UFSM). O período escolhido para as primeiras interceptações deste projeto foi o verão, por ser quando a atividade convectiva de final de tarde é mais comum no RS (VELASCO; FRITSCH, 1987). (Episódios convectivos da parte da manhã não representaram o alvo principal para o experimento de campo devido ao menor tempo hábil para concluir todo o processo de previsão de tempo, transporte e instalação da estação móvel).

A rotina de previsão consiste, primeiramente, em um prognóstico convectivo com horizonte variando entre 6h e 24h visando identificar: (i) a probabilidade de ocorrência de tempestades no período vespertino no estado do RS; (ii) as regiões do estado em que a ocorrência de tempestades é mais provável.

Para isto, as saídas de modelos numéricos atmosféricos operacionais são usadas como principal ferramenta para a previsão de tempestades baseada em ingredientes (BROOKS, 2007). Nesta abordagem, o previsor procura identificar não só os padrões favoráveis à desestabilização da atmosfera na escala sinótica, como também as regiões de ocorrência simultânea de oferta de umidade na baixa troposfera, instabilidade condicional, e mecanismo(s) de disparo convectivo. Adicionalmente, também é examinada a magnitude e direção do cisalhamento vertical do vento em diferentes camadas para se avaliar a possibilidade de ocorrência de tempestades severas. (Vale ressaltar que este projeto não limitou sua ação à interceptação de tempestades severas).

Campos numéricos tipicamente analisados incluem as (mas não se limitaram às) variáveis: temperatura e umidade absoluta do ar em superfície e em 850hPa; pressão atmosférica reduzida ao nível do mar; vento e convergência em superfície; altura geopotencial e vento em 850hPa, 500hPa e 250/200hPa; temperatura do ar e advecção de vorticidade em 500hPa; divergência em 250/200hPa; parâmetros convectivos de Energia Potencial Convectiva Disponível (*Convective Available Potential Energy*, CAPE), índice de levantamento, água precipitável, taxa de variação vertical de temperatura (*lapse rate*) entre 700 e 500hPa, cisalhamento vertical do vento nos primeiros 1000m e 6000m da troposfera, helicidade relativa à tempestade, e deslocamento esperado das tempestades.

Neste contexto, prever não só o local mais provável de iniciação das tempestades mas também o modo convectivo esperado, e a velocidade e direção de movimento das tempestades é importante. Por exemplo, a interceptação de uma linha de instabilidade frontal ou pré-frontal requer uma logística relativamente mais simples (dada a longa duração e maior extensão do sistema) se comparada com a logística necessária para interceptar tempestades isoladas e de curta duração. Da mesma forma, tempestades de rápido deslocamento são de interceptação mais difícil do que as de deslocamento lento. Ou seja, o prognóstico de atividade convectiva frontal ou pré-frontal, da ocorrência de jatos de baixos níveis, e da intensidade do escoamento na média troposfera - este último influenciando a velocidade de deslocamento das células convectivas - são exemplos de aspectos que merecem atenção especial na previsão de tempestades nos horizontes entre 24h e 6h.

Entre os modelos numéricos operacionais empregados pode-se citar o *Global Forecast System* (GFS) do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP); Eta do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC-INPE); Brazilian-RAMS (BRAMS) executados no GRUMA/UFSM e no Instituto de Astronômico, Geofísico e de Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo; e Weather Research and Forecast (WRF) executado no GRUMA/UFSM.

Nesta etapa de previsão também utiliza-se as imagens de satélite para avaliar as condições reinantes na região corrente-acima, na Bacia do Prata, e que podem vir a definir/influenciar a atividade convectiva sobre o Rio Grande do Sul nas horas seguintes.

Identificada, com cerca de 24h de antecedência, a situação favorável ao desenvolvimento de convecção profunda na região central do Rio Grande do Sul, um veículo é alugado para a interceptação das tempestades. No horizonte de previsão menor que 24h um ajuste fino da previsão é feito para melhor caracterizar as regiões e horários mais prováveis de início da convecção. Dentro deste período, já na manhã do dia da interceptação, imagens do satélite geoestacionário GOES-12, dados de radiossondagem das 12Z - especialmente de Santa Maria (SBSM) - e dados das estações automáticas de superfície do Instituto Nacional de Meteorologia e de METAR dos aeroportos são largamente empregados. Estas informações auxiliam a traçar a estratégia de interceptação com base na disponibilidade de rodovias e na previsão do modo convectivo e do deslocamento das células convectivas. Procura-se identificar rotas de interceptação dispostas perpendicularmente ao deslocamento esperado das tempestades, de forma a aumentar as oportunidades de se posicionar a Estação Mesomóvel diretamente no caminho das mesmas. Utiliza-se, também, o critério de que a região de interceptação deve estar em até cerca de quatro horas de distância de viagem a partir de Santa Maria. Esta escolha é feita para a redução de custos de operação e também para garantir que a instalação da estação seja realizada em tempo hábil para interceptar o fenômeno convectivo.

Uma vez definida a região para onde deslocar a Estação Mesomóvel e chegado o horário estabelecido para o início da saída em campo - tipicamente entre 11h e 14h, horário local -, a estação é acomodada no veículo e a equipe de campo, pré definida na horas anteriores, sai em viagem.

A equipe mobilizada para a interceptação é organizada em dois grupos: a “Base” e a “Equipe de Campo”. A Base é composta tipicamente por um ou dois membros, e permanecem nas instalações do GRUMA/UFSM, sendo responsável por realizar a próxima fase da previsão e acompanhamento em tempo real: o *nowcasting*. A Base mantém a Equipe de Campo atualizada via telefonia celular sobre informações provindas de estações automáticas de superfície, imagens de satélite e dados de radar disponíveis no momento, identificando a iniciação, o movimento, e a intensificação/desintensificação da convecção na região alvo.

Por sua vez, a Equipe de Campo é composta de pelo menos três membros onde, durante a fase de transporte, o primeiro é responsável pela condução do veículo, o segundo é responsável pela navegação nas estradas e comunicação com a Base, e o terceiro é responsável pela

documentação áudio-visual e georreferenciamento de todo o experimento com GPS. Quando em fase de instalação e coleta de dados, esta equipe compartilha seus esforços na montagem e instalação da Estação Mesomóvel. Naturalmente, com a convecção já em andamento, é a Equipe de Campo que carrega a responsabilidade de executar a interceptação das tempestades *per se*, a qual é feita primordialmente com base visual. As informações dos radares presentes no Rio Grande do Sul são disponibilizadas com atraso que muitas vezes passa de 30 minutos, o que limita a informação de *nowcasting* fornecida pela equipe da Base. Além de avaliar o deslocamento das células convectivas, esta equipe inspeciona aspectos morfológicos importantes das células convectivas, como a base das nuvens, cortinas de chuva (Figura 2.9a), bigornas, *shelf clouds* (Figura 2.9b), etc., que caracterizam o estágio de desenvolvimento da tempestade, seu setor de maior intensidade, e suas piscinas de ar frio e frentes de rajada.



Figura 2.9: Exemplos de alguns aspectos morfológicos das células convectivas: (a) cortina de chuva e (b) *shelf cloud*. Fotografias gentilmente cedidas por Ilha, M. (2012) e Nascimento, E. (2012) (respectivamente).

Ao término da amostragem do episódio convectivo a estação é, então, desmontada e acondicionada de volta ao veículo. Através das informações de *nowcasting* obtidas em comunicação com a Base, é possível realizar o redirecionamento da Equipe de Campo para a interceptação de outra(s) tempestade(s), caso a(s) mesma(s) esteja(m) no raio de ação da Equipe de Campo dentro de um horário que conte com a luz solar - interceptações noturnas não são consideradas nesta pesquisa dada a impossibilidade da inspeção visual das tempestades e o alto grau de periculosidade na direção noturna do veículo sob chuva e ventos fortes.

Ao final do experimento a Estação Mesomóvel é transportada de volta à base em Santa Maria, onde os dados do *datalogger* são finalmente extraídos para posterior análise.

3 RESULTADOS

Neste capítulo são discutidos os resultados dos experimentos de coleta de dados em campo com a Estação Mesomóvel. Alguns destes experimentos se deram em modo de interceptação de tempestades; outros se deram em regime de comparação (*vis-à-vis*) com a estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizada no campus da Universidade Federal de Santa Maria ($29^{\circ}43'29,7''S; 53^{\circ}43'13,7''O$), com o intuito de avaliar o valor adicionado pela amostragem em alta frequência na caracterização de fenômenos convectivos. As variáveis coletadas são analisadas em forma de séries temporais, e são: pressão atmosférica ao nível da estação (em *hPa*); direção do vento (em graus); velocidade da rajada de vento¹ (em *m/s*); temperatura potencial (em *K*; esta variável é calculada via pós-processamento); temperatura do ponto de orvalho (em $^{\circ}C$; esta variável é calculada via pós-processamento); e precipitação acumulada (em *mm*).

Além da coleta de dados, são discutidos também os ambientes sinóticos reinantes no desenvolvimento das tempestades convectivas e a evolução da convecção profunda via imagens do radar meteorológico de Santiago/RS mantido pela Aeronáutica, e/ou do satélite geoestacionário GOES-12 durante a coleta de dados. Na avaliação do ambiente sinótico maior ênfase é dada aos campos meteorológicos previstos operacionalmente, que motivaram a deflagração dos experimentos de campo com a Estação Mesomóvel.

O experimento longo, de 13 a 16 de dezembro de 2011, representou um dos primeiros testes operacionais da Estação Mesomóvel realizadas dentro do campus da UFSM antes de se decidir partir em modo de interceptação com a mesma. O objetivo dos testes preliminares foi realizar uma verificação dos dados coletados pela Estação Mesomóvel, testando a operacionalidade da estação e o grau de adesão de suas medidas com aquelas realizadas pela estação automática do INMET, estando a poucos metros de distância uma da outra (Figura 3.1). Estes experimentos também foram úteis para se identificar imperfeições e realizar as correções correspondentes na configuração operacional da Estação Mesomóvel. Mesmo para este experimento de verificação, diferenças interessantes no comportamento das variáveis entre o registro da Estação Mesomóvel e o da estação do INMET serão discutidas.

O experimento seguinte, de 3 de fevereiro de 2012, foi parte da campanha de interceptação de tempestades realizadas no início daquele mês na região central do RS. Finalmente, o terceiro experimento apresentado refere-se a mais uma comparação Estação-Mesomóvel vs. automática-INMET na UFSM em uma situação de ocorrência de uma “trilha” (ou sequência) de tempestades convectivas passando sobre o campus da UFSM entre o final do dia 29 e o

¹A Estação Mesomóvel também coleta a velocidade do vento, mas em todos os experimentos de interceptação a alta frequência de amostragem empregada ($\frac{1}{3}Hz$) é tal que iguala os valores reportados de velocidade do vento e de velocidade da rajada de vento; por este motivo optou-se por analisar a velocidade da rajada de vento em todas as figuras geradas

início do dia 30 de Maio de 2012. Adicionalmente, a descrição de outro experimento de interceptação, referente ao dia 4 de fevereiro de 2012, pode ser encontrada em Custodio, Marqueri e Ilha (2012).



Figura 3.1: Estação Mesomóvel instalada ao lado da Estação Automática do INMET, em Santa Maria, RS.

3.1 Experimento de verificação da Estação Mesomóvel: 13 a 16 de dezembro de 2011

Como discutido em Oliveira e Nascimento (2012), entre os dias 12 e 18 de dezembro de 2011 um vórtice ciclônico de altos níveis (VCAN) desenvolveu-se na Bacia do Prata e deslocou-se sobre o Sul Brasileiro (Figura 3.2). Durante seu estabelecimento, muita atividade convectiva foi registrada, incluindo granizo na Serra Gaúcha e trombas d'água na Lagoa dos Patos. Entre os dias 13 e 16 de dezembro o centro do VCAN apresentou um lento deslocamento em trajetória semi-circular entre o Uruguai, o centro do RS, e o litoral sul do RS.

Entre as 12Z de 13/12/2011 e as 12Z de 16/12/2011 foi realizado um experimento de coleta de dados com a Estação Mesomóvel no campus da UFSM, ao lado da estação automática do INMET em Santa Maria. Para este experimento os dados foram amostrados com a Estação Mesomóvel a cada 5 segundos ($0,2Hz$). Dentro deste período, apenas uma precipitação convectiva breve e fraca foi registrada na UFSM, na noite do dia 15/12/2011. A figura 3.3 mostra uma comparação entre as variáveis meteorológicas coletadas através da Estação Mesomóvel (linhas pretas) e da estação automática do INMET (linhas vermelhas).

De uma maneira geral, é possível perceber que houve uma forte concordância entre os dados coletados nas horas cheias nas duas estações para as variáveis pressão atmosférica (Figura 3.3a), temperatura potencial (Figura 3.3d) e temperatura do ponto de orvalho (Figura 3.3e), com as diferenças raramente ultrapassando $1hPa$, $1K$, e $1^{\circ}C$, respectivamente. Em termos de temperatura potencial (Figura 3.3d), observa-se a evolução do ciclo diurno repre-

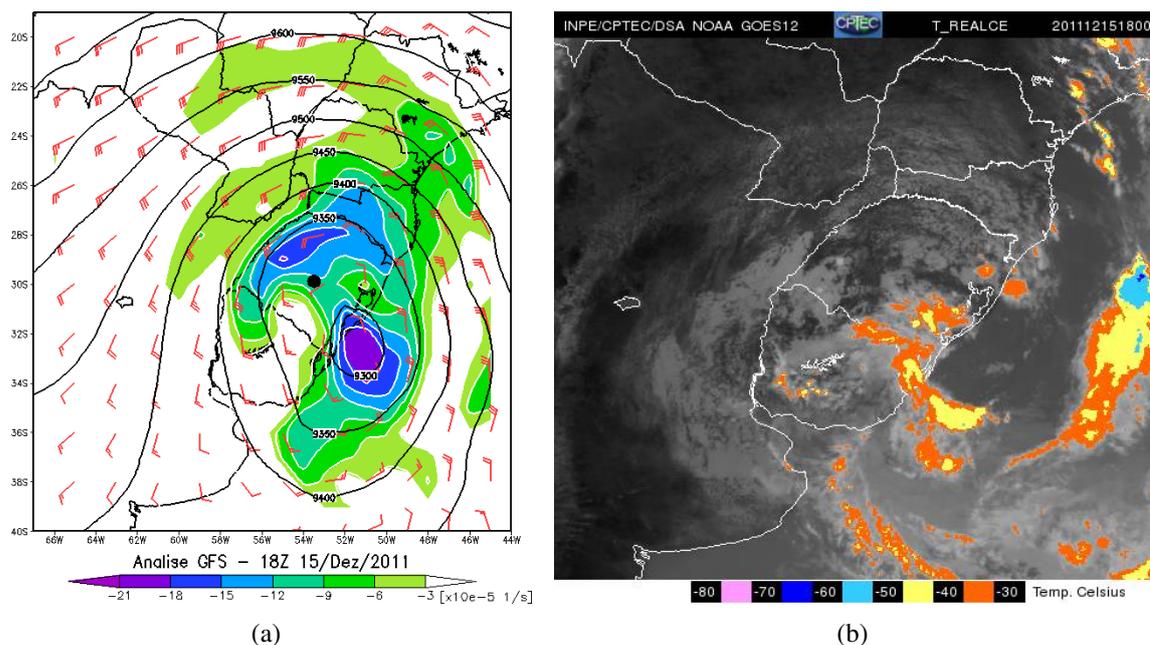


Figura 3.2: Vórtice ciclônico de altos níveis sobre o Rio Grande do Sul em 15 de dezembro de 2011. (a) Análise em 300hPa do modelo GFS-NCEP válida às 18Z de 15/12/2011: Altura geopotencial (isolinhas pretas, em mgp), vento (barbelas, em m/s), e vorticidade relativa (hachurado colorido, em $1/s \times 10^{-05}$); (b) imagem realçada e setorizada do satélite GOES-12 no canal infravermelho térmico às 18Z de 15/12/2011. Fonte: DSA/CPTEC-INPE.

sentado com boa adesão entre as duas estações. A temperatura do ponto de orvalho nas duas estações indica o gradual aumento da umidade sobre Santa Maria durante o período estudado. Como o termohigrômetro da Estação Mesomóvel localiza-se aproximadamente dentro da altura recomendada pelo padrão OMM - seguido pela estação do INMET - estes resultados são muito satisfatórios. Em termos mais específicos, as maiores diferenças no comportamento destas variáveis escalares são esperadas nas situações de ocorrência de fenômenos de curta duração, como os de escala convectiva. Este aspecto será explorado mais adiante.

Na velocidade da rajada de vento (Figura 3.3b), fica evidente também a evolução muito bem correlacionada do ciclo diurno nas duas estações (rajadas mais intensas [mais fracas] ocorrendo no período da tarde [período noturno]). Entretanto, a estação do INMET invariavelmente registrou valores mais altos. Este resultado é esperado tendo em vista a diferença de altura entre os anemômetros das estações (aproximadamente 2m na Estação Mesomóvel e 10m na estação do INMET). É necessário manter este resultado em mente para **todos** os experimentos analisados: lembrar que a Estação Mesomóvel não segue o padrão OMM de medição da velocidade do vento, que é a 10m de altura. Logo, as rajadas de vento medidas na Estação Mesomóvel muito provavelmente representarão subestimativas em relação ao que seria esperado para uma mesma estação que siga o padrão OMM.

Para o período ilustrado na figura 3.3b esta diferença foi de aproximadamente da ordem de 2m/s (há uma importante exceção, a ser examinada mais adiante). Vale ressaltar, contudo, que a solução empregada de se medir a velocidade do vento a um altura muito inferior ao

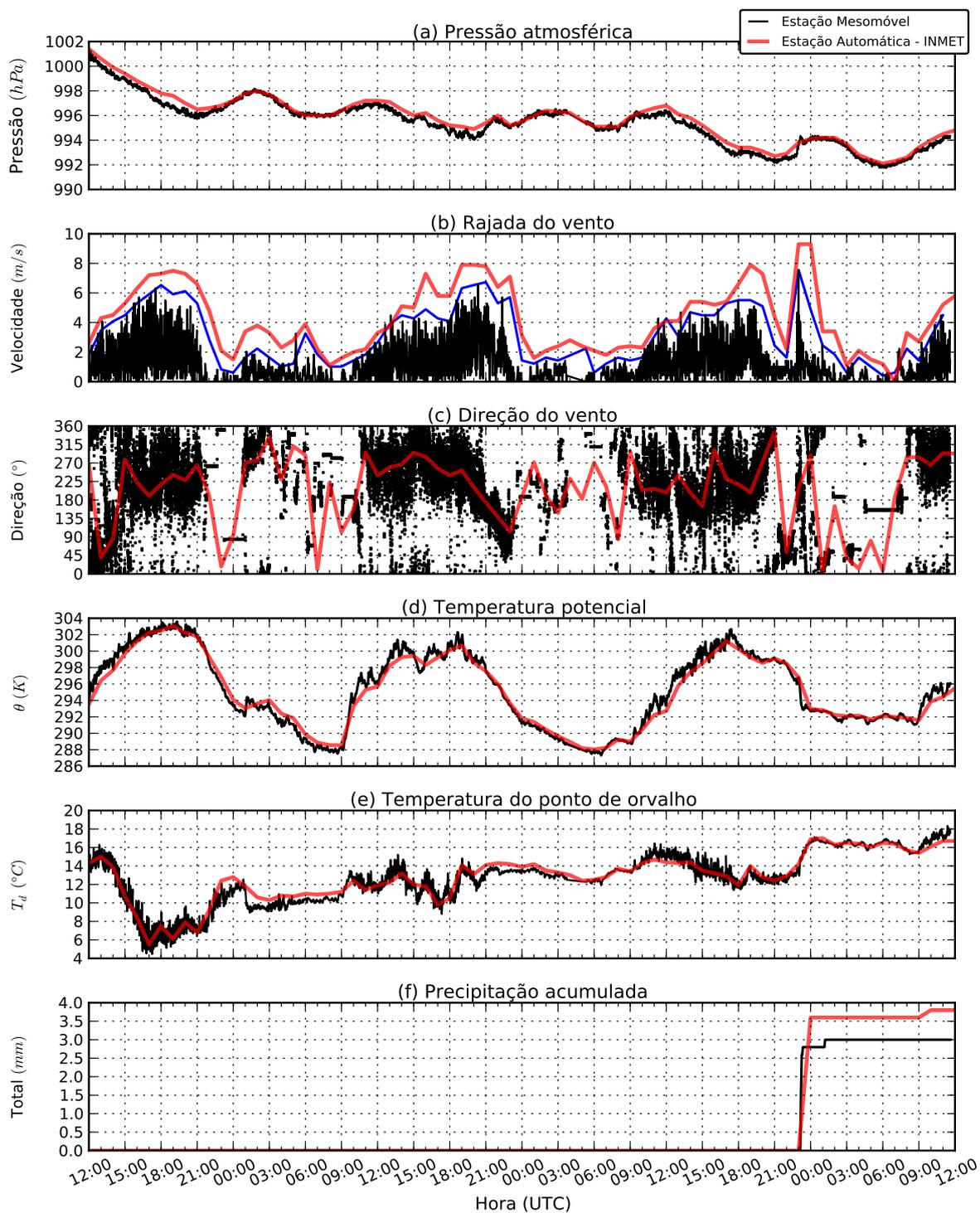


Figura 3.3: Séries temporais coletadas no campus da UFSM referentes ao período entre 12Z do dia 13/12/2011 e 12Z do dia 16/12/2011 das variáveis meteorológicas selecionadas para a comparação entre a Estação Mesomóvel (linhas pretas) e a estação automática do INMET em Santa Maria/RS (linhas vermelhas). Para a velocidade da rajada de vento (painel (b)) também é fornecido, a cada hora cheia, o valor da máxima rajada detectada na Estação Mesomóvel nos 60 min precedentes (linha azul), replicando o procedimento de registro de rajadas empregado nas estações automáticas do INMET e, portanto, facilitando a comparação. Vide texto para a análise. Fonte dos dados do INMET: www.inmet.gov.br.

definido pelo padrão OMM é seguida em todas as configurações de estações meteorológicas especiais concebidas para interceptação de tempestades; de fato, a montagem de uma torre de medição de vento com 10m de altura inviabilizaria sua utilização em modo de interceptação.

Na direção do vento (Figura 3.3c) o comportamento médio apresentou boa correlação entre as duas estações, pelo menos nas situações de ventos mais fortes - quando a direção do vento tende a apresentar um comportamento mais estável. Evidentemente, a maior frequência de amostragem faz com que a Estação Mesomóvel consiga documentar melhor o caráter turbulento do vento, com o desvio padrão das medidas de direção sendo mais acentuado. Nas situações de vento fraco, abaixo de 2m/s, a direção do vento torna-se muito variável e é quando ocorreram as maiores discrepâncias entre as duas estações; definir uma direção predominante do vento a baixas velocidades é dificultado pela baixa inércia do anemômetro, que o faz responder a flutuações turbulentas do vento que passam a ser comparáveis ao próprio valor médio do vento àquela baixa velocidade.

Uma pequena célula convectiva deslocando-se de sudoeste passou pela cidade de Santa Maria por volta das 23Z de 15/12/2011, como indicado nas imagens do campo de refletividade do radar meteorológico de Santiago/RS, ilustradas na figura 3.4. A figura 3.3f mostra a série temporal para a precipitação acumulada, indicando a detecção desta célula no campo de chuva. Como esperado houve perfeita concordância entre as duas estações na indicação da hora dentro da qual a precipitação ocorreu. Contudo, uma pequena diferença, de pouco mais de 0,5mm, foi detectada, com o valor mais alto sendo registrado na estação do INMET. Esta diferença pode ser atribuída a diversos fatores que incluem diferenças na exposição do pluviômetro e a dificuldade inerente de se mensurar a variável chuva de maneira uniforme mesmo quando a exposição de dois pluviômetros é idêntica (LANZA; VUERICH, 2009). Vale ressaltar que o pluviômetro da Estação Mesomóvel fica instalado no solo; de todas os instrumentos desta estação, é o de instalação e exposição menos adequadas.

Para melhor comparar o comportamento das variáveis entre as duas estações no momento da ocorrência do fenômeno convectivo, analisa-se a figura 3.5. Nela tem-se a uma visão ampliada das mesmas séries temporais em torno do horário da passagem da pequena tempestade convectiva sobre Santa Maria. É possível detectar pelos dados da Estação Mesomóvel um ligeiro aumento de pressão de pouco menos de 2hPa (Figura 3.5a) entre 22:50Z e 23:08Z, em concordância com a ocorrência de rajadas de vento de sudoeste (Figuras 3.5b e 3.5c). Este comportamento parece consistente com o de uma pequena mesoalta acompanhada da frente de rajada. A estação do INMET também registra um pequeno aumento de pressão, como melhor evidenciado pelo “domo” de pressão em torno das 00:00Z de 16/12 na figura 3.5a. Entretanto, fica claro que a taxa real de aumento de pressão (dp/dt) é mal representada na estação do INMET, uma vez que o aumento de quase 2hPa ocorreu em cerca de 20min enquanto que a amostragem pelo INMET requer três pontos (referentes a duas horas) para representar o mesmo aumento.

Em termos de temperatura potencial (Figura 3.5d), detectou-se uma queda de cerca de

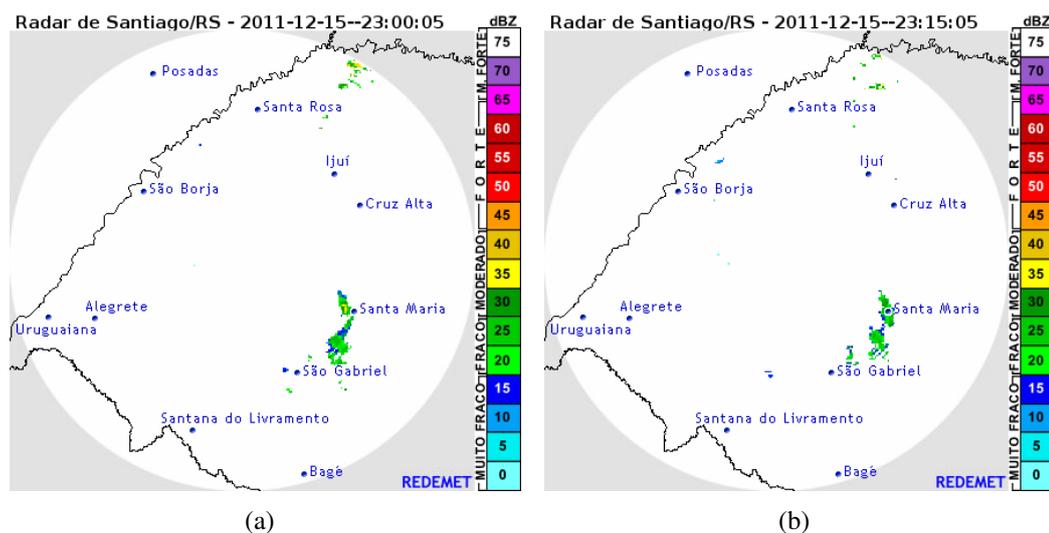


Figura 3.4: Radar meteorológico de Santiago/RS: CAPPis em 5500m do campo de refletividade em um raio de 250km de distância do radar para o dia 15/12/2011. Imagens válidas às: (a) 23:00Z, e (b) 23:15Z. Vide na barra indicativa a convenção de cores empregada para o campo de refletividade. Fonte das imagens: Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (www.redemet.aer.mil.br).

4K em torno do horário da ocorrência da precipitação (Figura 3.5f). É importante salientar que o ciclo diurno não foi removido da série temporal, e que a tempestade passou pela UFSM no período em que a marcha diurna de θ já se encontrava em declínio. Entretanto, de volta à figura 3.3d, fica claro que, no momento da passagem da célula convectiva, a taxa de declínio em θ tornou-se abrupta por um curto período de tempo, o que confirma que este padrão representa a passagem de uma piscina de ar frio pela UFSM.

A Estação Mesomóvel indica que a queda mais acentuada em θ se deu poucos minutos antes do início da precipitação, e com atraso em relação ao início do aumento da pressão atmosférica. Tal comportamento é impossível de ser detectado nos dados do INMET. Trabalhos anteriores, como Wakimoto (1982), indicam que um aumento de pressão precede a queda de temperatura na passagem de uma frente de rajada e associa esta evolução a uma contribuição não-hidrostática na perturbação da pressão. Não há como testar esta hipótese neste trabalho devido à indisponibilidade de informações a respeito da distribuição vertical da flutuabilidade (isto é, de densidade do ar) logo acima da Estação Mesomóvel, para permitir a avaliação da contribuição separada dos efeitos hidrostáticos e não hidrostáticos no momento do aumento da pressão.

A comparação entre estações também é importante na caracterização da taxa real de precipitação (Figura 3.5f), que foi de cerca 3,0mm em um espaço de 10 minutos como medido pela Estação Mesomóvel mas que, pelos dados do INMET, seria impossível de se avaliar.

Um aumento da temperatura do ponto de orvalho foi observada em média nas duas estações durante a passagem da tempestade (Figura 3.5e), destoando do que **geralmente** é registrado na passagem de piscinas de ar frio (resfriamento acompanhado de secamento; p.ex., Longo, Silva Dias e Moreira (2002), Engerer, Stensrud e Coniglio (2008); vale ressaltar en-

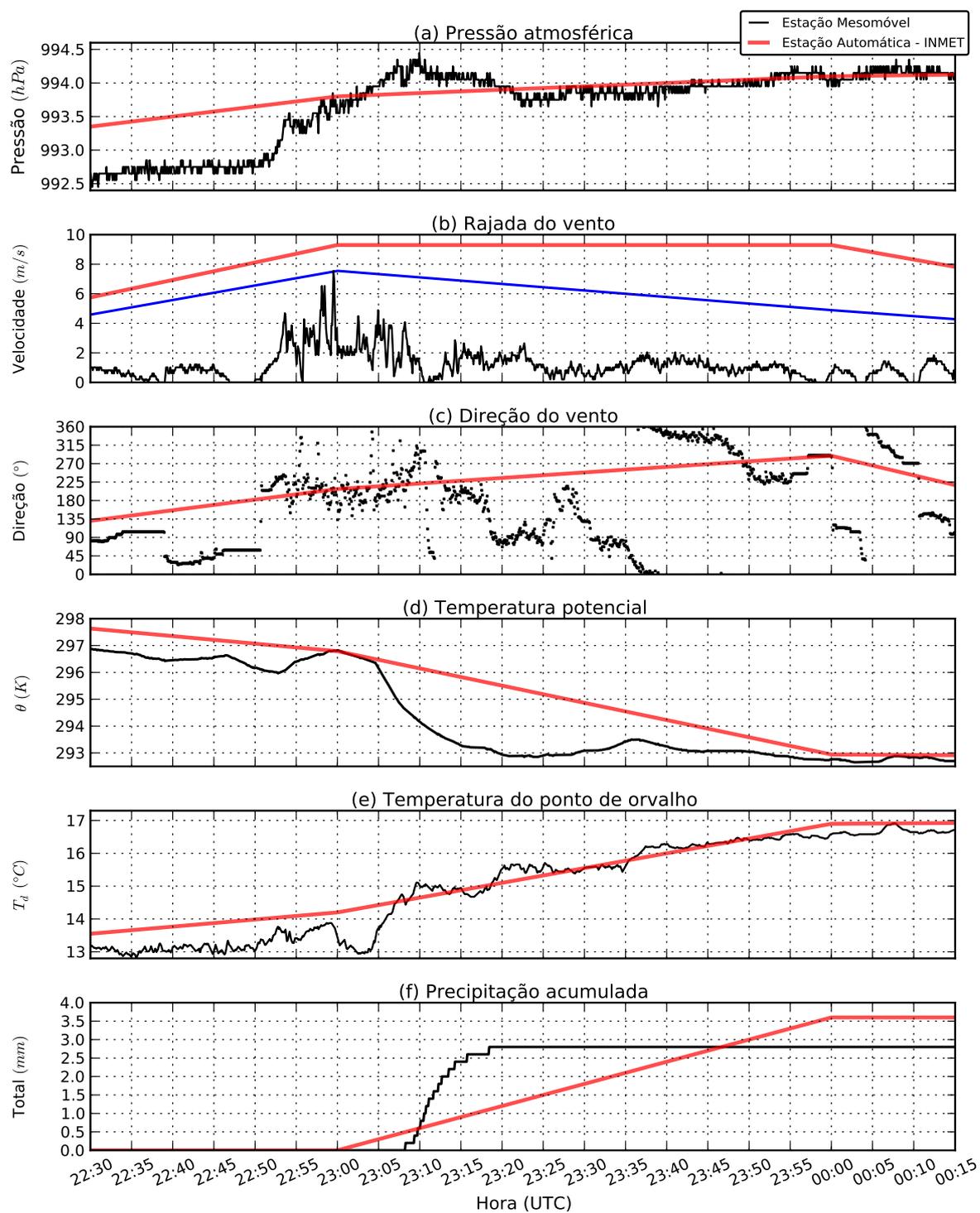


Figura 3.5: Igual à figura 3.3, mas fazendo uma ampliação entre as 22:30Z de 15/12/2011 e 00:15Z de 16/12/2011, em torno do horário da passagem da célula convectiva sobre Santa Maria/RS.

tretanto que a maioria dos trabalhos observacionais sobre piscinas de ar frio trata de sistemas convectivos de mesoescala (SCMs), não de pequenas tempestades isoladas). Em comparação com a estação do INMET, a Estação Mesomóvel registrou alguns detalhes interessantes. Depois de um período com valor estável em 13°C , um pequeno aumento de Td , de pouco menos de 1°C , foi observado junto com o início das rajadas de vento entre 22:51Z e 23:00Z - antes do início da precipitação. Isto foi seguido de uma queda de 1°C em Td , entre 23:00Z e 23:05Z, quando as rajadas estavam mais intensas e ainda antecedendo a chuva. Um aumento mais abrupto de Td coincidiu com a queda mais acentuada da temperatura potencial momentos antes do início da chuva. Este comportamento entre 22:51Z e 23:05Z, não detectável pela estação do INMET, **parece** indicar um processo de transição turbulenta entre a massa de ar de influxo e de efluxo da tempestade, mas não há como afirmar isto de maneira conclusiva.

Finalmente, chama atenção uma maior discrepância na intensidade da rajada de vento entre as duas estações no horário entre 23:00Z de 15/12 e 00:00Z de 16/12 (Figura 3.5b). Neste intervalo, dentro do qual ocorre o início da chuva e a maior queda na temperatura potencial, a Estação Mesomóvel não registrou nenhuma rajada acima de 5m/s , enquanto a estação do INMET registrou pouco mais de 9m/s . Esta diferença de quase 5m/s é maior do que a tipicamente registrada antes da passagem da tempestade (cerca de 2m/s). Teve-se então um aumento no cisalhamento vertical do vento na camada superficial quando da passagem da frente de rajada.

Concluído este experimento de verificação (e de outros dois não descritos aqui) da Estação Mesomóvel, a próxima etapa naturalmente foi iniciar a campanha em modo de interceptação de tempestades.

3.2 Experimento de interceptação de tempestades: 03 de fevereiro de 2012

3.2.1 Análise e previsão do tempo

Nos primeiros dias de fevereiro de 2012 foram observados alguns dias consecutivos com condições favoráveis à ocorrência de tempestades de final de tarde sobre o RS. As figuras 3.6 e 3.7 mostram campos de previsão de 18h do modelo GFS-NCEP válidos às 18Z do dia 3 de fevereiro de 2012 para um domínio que inclui a região da Bacia do Prata - vide as legendas das figuras para uma descrição detalhada dos campos que compõem cada painel. Esta foi uma das previsões numéricas examinadas na manhã do dia 03/02/2012 pela equipe responsável pela operação da Estação Mesomóvel.

Em superfície (Figura 3.6a) é possível ver (a previsão de) um gradiente horizontal de pressão orientado na direção zonal com a Alta do Atlântico Sul no leste do domínio e pressões

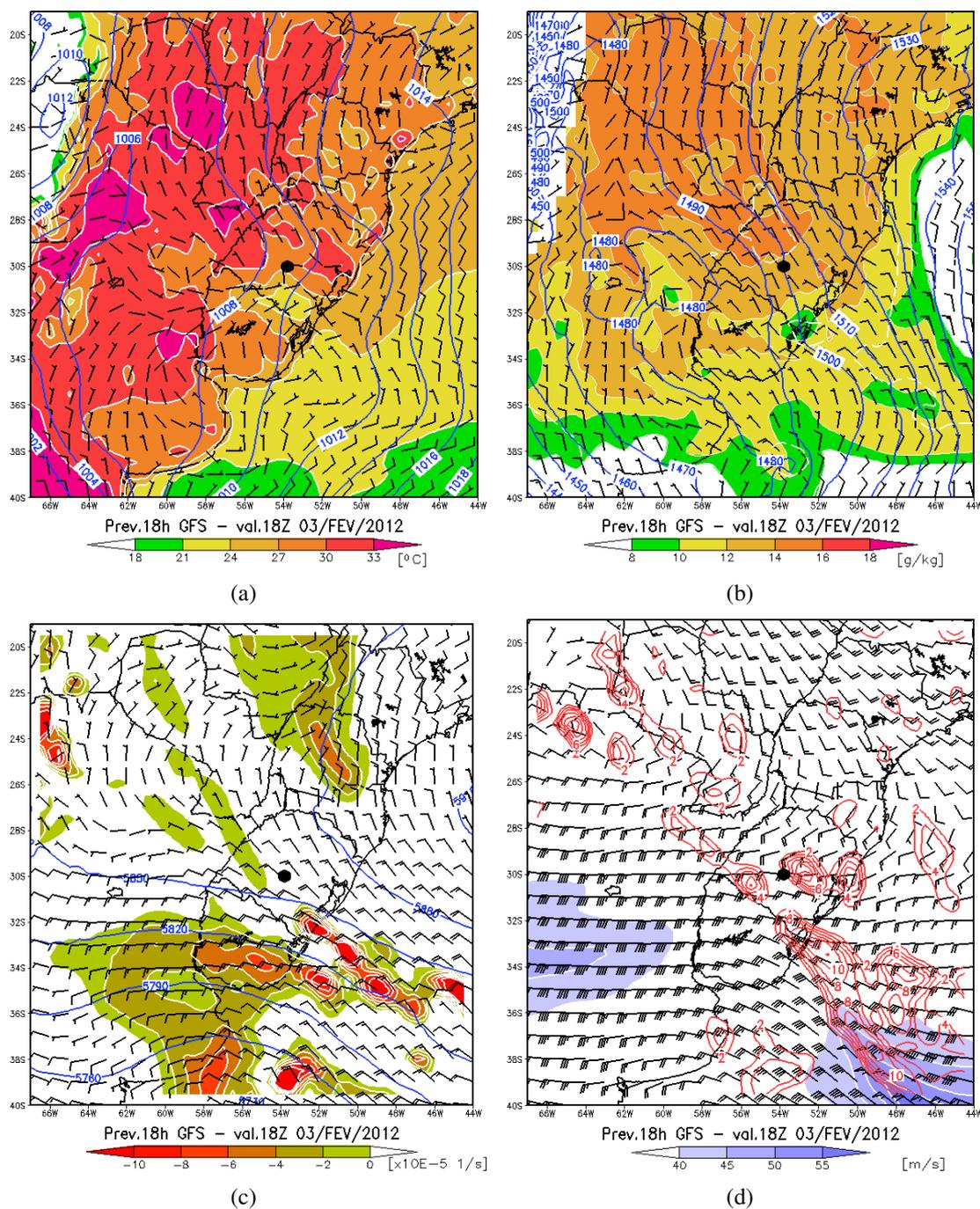


Figura 3.6: Previsão numérica de horizonte de 18h do modelo GFS-NCEP válida às 18Z de 03/02/2012 para a Bacia do Prata. (a) pressão atmosférica ao nível do mar (isóbaras azuis, a cada 2 hPa), vento a 10m (barbelas, em m/s), e temperatura do ar a 2m, acima de 18°C (hachurado colorido, a cada 3°C); (b) 850hPa: altura geopotencial (isóipsas azuis, a cada 30mgp), vento (barbelas, em m/s), e umidade específica do ar, acima de 8g/kg (hachurado colorido, a cada 2g/kg); a linha tracejada branca envolve as regiões onde a magnitude do vento é maior ou igual a 10m/s . (c) 500hPa: altura geopotencial (isóipsas azuis, a cada 30mgp), vento (barbelas, em m/s), e vorticidade relativa ciclônica (hachurado colorido, a cada $1 \times 10^{-5} \text{ 1/s}$); (d) 200hPa: vento (barbelas, em m/s), magnitude do vento, acima de 40m/s (hachurado colorido, a cada 5m/s), e divergência positiva (isolinhas vermelhas, a cada $1 \times 10^{-5} \text{ 1/s}$).

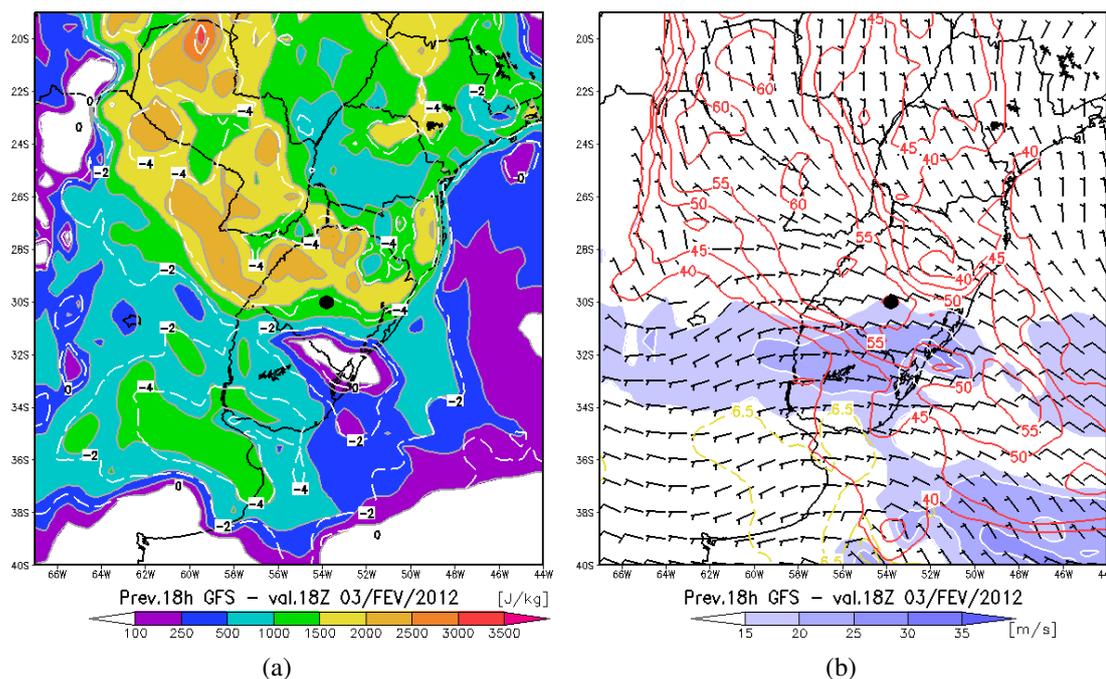


Figura 3.7: Igual à figura 3.6, mas para: (a) CAPE de superfície, acima de 100J/kg (hachurado colorido, em J/kg), e índice de levantamento negativo para uma parcela de superfície (isolinhas brancas tracejadas, a cada 2°C); (b) magnitude do cisalhamento vertical do vento entre superfície e 6km de altura, acima de 15m/s (hachurado colorido, a cada 5m/s), *lapse rate* entre $700 - 500\text{hPa}$, menor ou igual a $-6,5^\circ\text{C/km}$ (isolinhas amarelas tracejadas, a cada $0,5^\circ\text{C/km}$), e água precipitável, maior ou igual a 40mm (isolinhas vermelhas, a cada 5mm).

mais baixas sobre a Argentina. Sobre o RS um ligeiro cavado na direção zonal era previsto, sugerindo a presença de um setor com convergência em baixos níveis na região central do RS que mereceu atenção; de fato, a direção do vento prevista a 10m mostra uma mudança de NO sobre o norte do RS para NE no sul do RS, caracterizando o giro ciclônico ao longo do cavado curto. A temperatura do ar prevista passava dos 30°C para a maior parte do estado. Mais ao sul, fora da costa do Uruguai, outro ligeiro cavado era previsto, com o vento em superfície mostrando um giro ciclônico mais evidente.

Em 850hPa (Figura 3.6b) um gradiente da altura geopotencial também era indicado entre o Anticiclone do Atlântico Sul e o setor de baixas alturas geopotenciais sobre a Argentina. Este campo de massa direcionava um escoamento de NO em 850hPa com cerca de 10m/s desde o sul do Paraguai até o centro do RS. Importante advecção de umidade era prevista associada a este escoamento de NO, com a umidade específica em 850hPa acima de 12g/kg em quase todo o RS, e ultrapassando os 14g/kg no noroeste do estado.

A figura 3.6c mostra a previsão para a média troposfera, com a passagem de um cavado em 500hPa ao sul do RS, sem afetar diretamente o estado. Este cavado possivelmente seria o responsável por induzir o ligeiro cavado e giro ciclônico do vento em superfície previsto a leste da costa do Uruguai, enquanto que o cavado sobre o RS teria como principal forçante o intenso aquecimento diurno no estado. Em concordância com isto, é interessante notar que entre a superfície e 500hPa (Figuras 3.6a, 3.6b e 3.6c) a previsão era de pouco cisalhamento

vertical do vento, tanto direcional quanto de magnitude, especialmente sobre a metade norte do RS, indicando baixa baroclinia típica de meio de verão sobre o RS.

Em $200hPa$ (Figura 3.6d) a previsão mostrava a Alta da Bolívia sobre o extremo norte da Argentina, com a corrente de jato de oeste bastante zonal posicionada sobre o centro da Argentina, ao sul de $30^{\circ}S$. Uma forte difluência e divergência era prevista desde o extremo sul do RS até o Atlântico, a leste do cavado em $500hPa$. Este padrão divergente é uma resposta à geração de convecção pelo modelo numérico naquele setor. Um pouco mais ao norte, sobre o centro RS, é possível observar também a previsão de divergência e difluência com caráter mais isolado. Isto indica a representação pelo modelo da presença de atividade convectiva sobre o RS, esta dissociada do cavado em $500hPa$, ou seja, sugerindo o predomínio da forçante termodinâmica associada ao forte aquecimento e umedecimento na baixa troposfera mas sem a presença de um sistema frontal.

A figura 3.7a mostra os campos previstos de CAPE e índice de levantamento (LI). Na metade norte do RS valores de CAPE acima de $1500J/kg$ e de LI abaixo de $-4^{\circ}C$ eram previstos. No extremo sul do estado o consumo de CAPE pela atividade convectiva em andamento naquele setor ficou evidente. Finalmente, a figura 3.7b indica a previsão de altos valores de água precipitável (isolinhas vermelhas), acima de $50mm$ na maior parte do RS. Em termos de cisalhamento do vento entre a superfície e $6km$ (sombreado azul) os valores mais acentuados estariam limitados ao sul do RS e Uruguai, estando de acordo com a discussão anterior. O deslocamento esperado das tempestades, por sua vez, previa o movimento das células sobre o centro do RS com sendo de ONO em torno de $10m/s$. Assim sendo, assumindo como correta esta previsão, quaisquer tempestades formando-se na região O e NO do RS, onde havia bastante oferta de umidade e de instabilidade, deslocariam-se na direção de Santa Maria. Os *lapse rates* entre $700 - 500hPa$ mais intensos (isolinhas amarelas) seriam mais intensos não sobre o RS, mas mais ao sul na Bacia do Prata.

A sondagem das 12Z de Santa Maria (Figura 3.8) também foi analisada pouco antes da saída da Equipe de Campo. Nela está caracterizada uma atmosfera instável, especialmente para parcelas de ar em torno de $925hPa$ que estão na base de uma camada de mistura elevada com um escoamento quente de N-NO. Exceto por um importante secamento em torno de $700hPa$, o restante do perfil é bastante úmido. Com a previsão de temperaturas em superfície atingindo os $30^{\circ}C$ para aquela tarde, ficou evidente que valores de CAPE relativamente altos seriam confirmados.

Com base na previsão descrita acima (que também baseou-se em outros modelos numéricos e dados, não mostrados), concluiu-se que haveria condições conducentes a tempestades convectivas com deslocamento de O-NO sobre o RS. Para a Equipe de Campo, a direção alvo escolhida a partir de Santa Maria foi o oeste e sudoeste, utilizando a Rodovia RS-158 sentido Rosário do Sul. Deste modo, quaisquer tempestades que se formassem a noroeste do RS, com trajetórias previstas de NO, se deslocariam de maneira perpendicular ao deslocamento da Equipe de Campo, aumentando as oportunidades de interceptação.

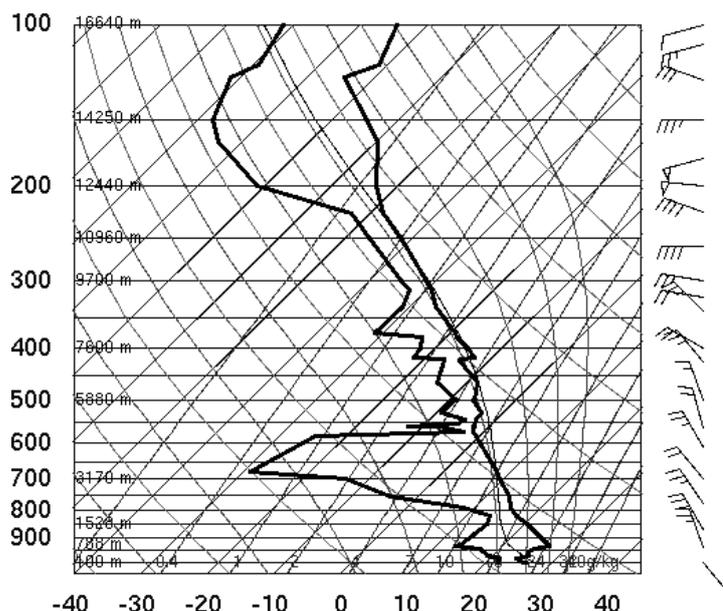


Figura 3.8: Diagrama *skew-T* da radiossondagem de Santa Maria/RS realizada às 12Z de 03/02/2012. Fonte: Departamento de Ciências Atmosféricas, *University of Wyoming* (www.weather.uwyo.edu).

3.2.2 Coleta de dados

A figura 3.9 mostra o deslocamento da Equipe de Campo entre 16h30 e 18h. Após uma tentativa frustrada de interceptação de uma célula convectiva no ponto A, a cerca de 94km de Santa Maria, a Equipe de Campo atentou para o desenvolvimento convectivo mais ao norte, optando então por retornar pela mesma estrada para NE. Neste retorno, confirmação foi obtida via *nowcasting* pela Base de que nova atividade convectiva deveria cruzar a RS-158 logo à frente da Equipe de Campo. Após identificar visualmente cortinas de chuva e uma frente de rajada em aproximação de NO, a Equipe de Campo optou por instalar a Estação Mesomóvel no ponto B, a cerca de 21km a sudoeste de Santa Maria, onde a coleta de dados foi realizada à beira da rodovia (conforme figura 2.1).



Figura 3.9: Mapa indicando o caminho percorrido pela Equipe de Campo na interceptação de tempestades realizada na tarde do dia 3 de fevereiro de 2012. O ponto B indica o local da coleta de dados analisada nesta seção. Ver texto para detalhes.

A figura 3.10 mostra as séries temporais correspondentes, com início às 17:52Z e término às 19:29Z do dia 03/02/2012. A frequência de amostragem foi de $\frac{1}{3}Hz$. Duas frentes

de rajada foram registradas pela Estação Mesomóvel neste período, como indicado pela figura 3.10b: uma logo após a instalação da estação, entre aproximadamente 17:52Z e 18:02Z, com velocidade máxima de $12,0m/s$; e outra cerca de $60min$ depois, entre aproximadamente 18:54Z e 19:10Z, com velocidade máxima de $10,2m/s$. Em ambos os casos a direção predominante das rajadas foi de norte, mas com variações turbulentas entre 315° (N-NO) e 30° (N-NE) (Figura 3.10b). Naturalmente, as frentes de rajada, separadas por $60min$, estiveram associadas à passagem de duas células convectivas distintas sobre o ponto de instalação da Estação Mesomóvel. Isto ficou evidente pela inspeção visual em tempo real por parte da Equipe de Campo e pela sequência de imagens de refletividade do radar meteorológico de Santiago/RS ilustrada na figura 3.11 na forma de CAPPIS (*constant altitude plan position indicator*) no nível de $5500m$ de altura. Nas imagens, as passagens das duas células - com deslocamento de NO - sobre a Estação Mesomóvel ocorrem entre 17:45Z e 18:30Z (Figuras 3.11a, 3.11b e 3.11c) e entre 18:45Z e 19:15Z (Figuras 3.11d, 3.11e e 3.11f), respectivamente.

Ainda em termos de direção do vento (Figura 3.10b) é interessante perceber a oscilação ocorrida entre 18:05Z e 18:40Z. Esta maior variabilidade na direção do vento é condizente com a presença de ventos mais fracos, abaixo de $5m/s$, registrados no intervalo entre as duas frentes de rajada. É possível conjecturar que neste regime de baixa velocidade a medida de vento pela Estação Mesomóvel estivesse mais suscetível à influência da turbulência gerada pela passagem de veículos na rodovia. Com a aproximação da segunda frente de rajada, após as 18:50Z, a direção voltou a se apresentar como predominantemente de norte até finalmente mudar de maneira brusca para sul por volta das 19:20Z, após a passagem da segunda tempestade.

Pelas séries de pressão (Figura 3.10a) e de temperatura potencial (Figura 3.10d), percebe-se uma boa correlação entre a ocorrência das rajadas mais intensas e a detecção de um aumento de pressão e de uma queda na temperatura potencial, o que é consoante com o modelo conceitual de uma mesoalta e piscina de ar frio acompanhando a frente de rajada (Capítulo 1). Contudo, não é possível afirmar de quanto foi o aumento de pressão atmosférica na passagem da primeira mesoalta porque no momento da instalação da Estação Mesomóvel a pressão já se encontrava em plena ascensão, antes mesmo do registro das rajadas mais intensas - comparar os primeiros $5min$ das respectivas séries nas figuras 3.10a e 3.10b.

Por outro lado, uma queda na temperatura potencial de cerca de $10K$ ocorreu entre 17:54Z e 18:05Z (Figura 3.10d). Este resultado é semelhante à mediana (ao percentil 75%) encontrada(o) por Engerer, Stensrud e Coniglio (2008) para a queda de θ em piscinas de ar frio durante o estágio inicial (maduro) de desenvolvimento de SCMs na América do Norte. A tempestade convectiva interceptada estava em seu estágio maduro, como pode ser avaliado pelo campo de refletividade do radar de Santiago (3.11.b), mas a comparação com os resultados de Engerer, Stensrud e Coniglio (2008) é, ao menos em parte, comprometida pelo fato da tempestade interceptada não ser um SCM.

De forma semelhante ao ocorrido no episódio de 15/12/2011 descrito anteriormente, a maior queda de θ ocorre com atraso em relação ao início do aumento da pressão atmosférica.

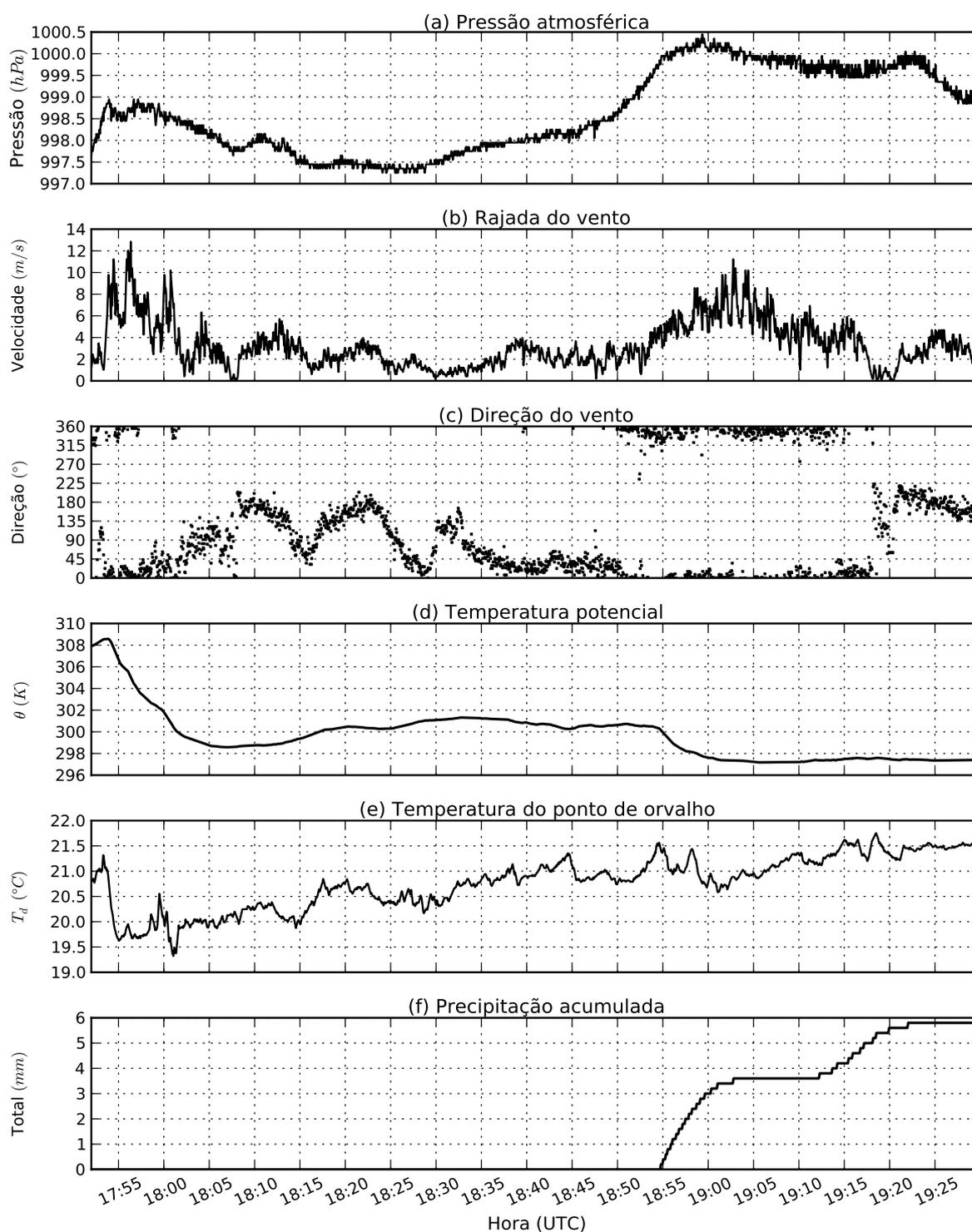


Figura 3.10: Séries temporais no período entre 17:52Z e 19:29Z de 03/02/2012 referente à coleta de dados em modo de interceptação realizada no ponto B indicado na figura 3.9 ($29^{\circ}45'52,5''S$; $54^{\circ}03'7,36''O$), localizado a 21km a sudoeste de Santa Maria/RS. Frequência de amostragem de $\frac{1}{3}Hz$.

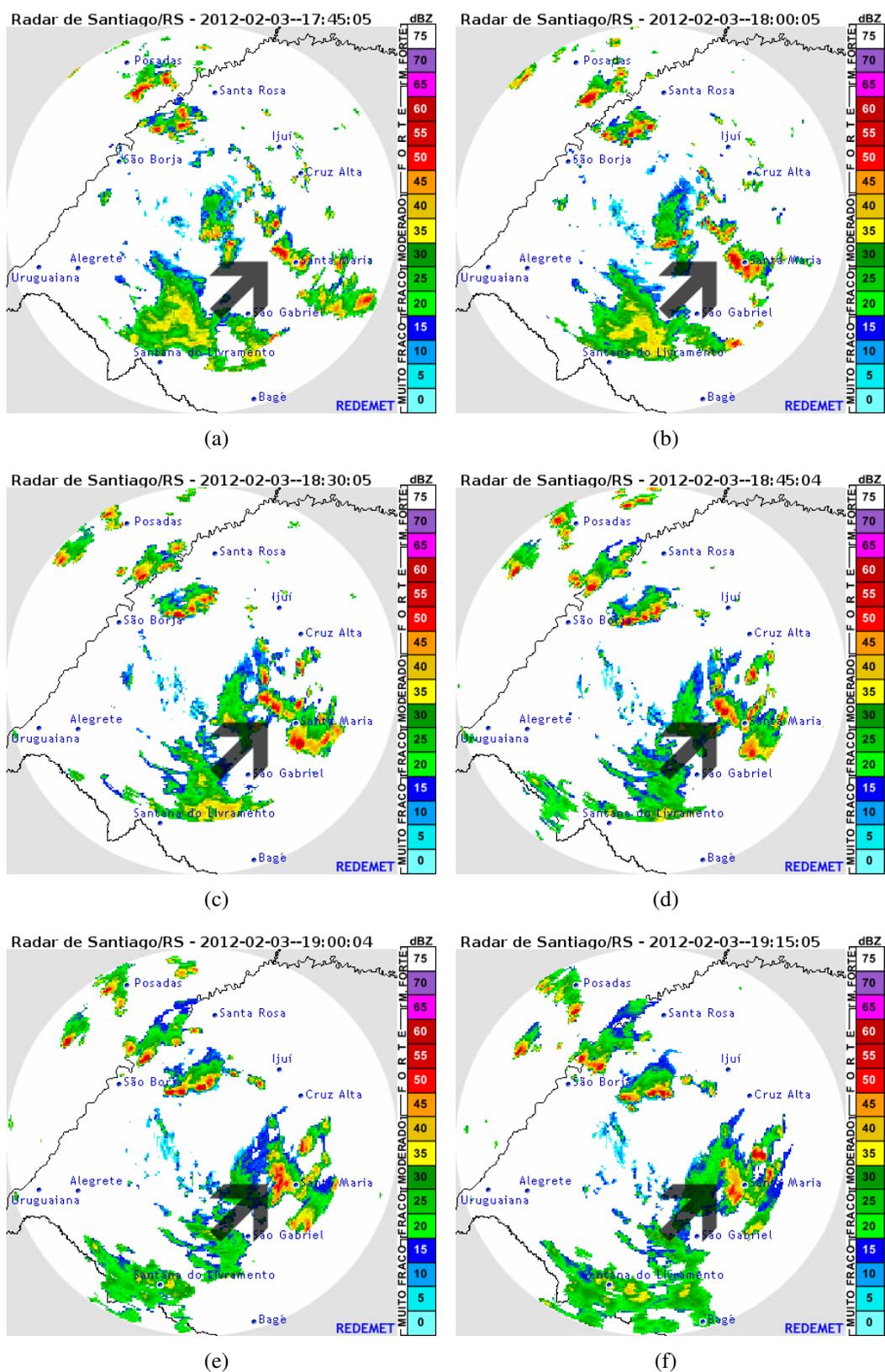


Figura 3.11: Igual à figura 3.4 mas para o dia 03/02/2012. Imagens válidas às: (a) 17:45Z, (b) 18:00Z, (c) 18:30Z, (d) 18:45Z, (e) 19:00Z, e (f) 19:15Z. A extremidade da seta indica a localização da Estação Meso-móvel durante a coleta de dados. Fonte das imagens: Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (www.redemet.aer.mil.br).

A temperatura potencial se estabiliza em torno de $301K$ entre as duas frentes de rajada consecutivas, representando o estabelecimento do ar modificado pela passagem da primeira piscina de ar frio. Com a chegada da segunda frente de rajada uma nova queda de θ , agora de apenas $3K$, é detectada entre 18:55Z e 19:00Z - o que seria uma “piscina de ar frio em relação à outra piscina de ar frio”.

Em termos de temperatura do ponto de orvalho (Figura 3.10e), uma queda de $2^{\circ}C$ foi detectada no momento das primeiras rajadas pouco antes das 17:55Z, quando a queda em θ também se inicia. Com a alta frequência de amostragem é possível observar uma diferença no comportamento entre estas duas variáveis entre 17:55Z e 17:59Z quando Td experimenta um ligeiro aumento enquanto θ cai. Logo em seguida, pouco antes das 18:00Z, uma nova queda em Td é observada, agora de $1^{\circ}C$. Esta queda coincide com a ocorrência de rajadas de cerca de $10m/s$ e uma taxa de queda de θ um pouco mais acentuada. Apesar das variações turbulentas, a tendência **média** de Td após a passagem da primeira frente de rajada é de um aumento monotônico, perfazendo uma variação de pouco mais de $2^{\circ}C$ entre os valores extremos.

A figura 3.10a indica que na passagem da segunda frente de rajada houve um aumento de pressão de $2,5hPa$ relativo ao valor estável de $997,5hPa$ registrado durante o regime de ventos fracos. Mais uma vez, o aumento de pressão precedeu a queda de θ (Figura 3.10d). Ao contrário da primeira frente de rajada, a segunda foi acompanhada de chuva (Figura 3.10f) - entretanto, é importante mencionar que, na passagem da primeira frente, a Equipe de Campo confirmou a passagem de uma “cortina” de chuva ao norte do local de medição.

Uma precipitação moderada, de $3mm$, acumulou-se entre 18:55Z e 19:00Z, com a taxa enfraquecendo nos minutos seguintes. Novo acúmulo de chuva, de pouco mais de $2mm$, ocorreu entre 19:13Z e 19:23Z, com caráter mais estratiforme e ventos enfraquecendo. Não houve o registro de granizo.

Uma vez terminado o registro de chuva e havido o afastamento da célula convectiva, o experimento foi encerrado às 19:29Z.

3.3 Experimento de intercomparação de estações: 29 e 30 de maio de 2012

3.3.1 Análise e previsão do tempo

Ao longo do dia 29 de maio de 2012 as condições atmosféricas em escala sinótica mostravam-se favoráveis ao desenvolvimento de atividade convectiva sobre a região central do RS entre o final da tarde e início da noite. Desta vez a aproximação de um sistema frontal seria o responsável pelo desenvolvimento de tempestades. Para discussão foi selecionada a previsão de 21h do modelo GFS-NCEP válida às 21Z do dia 29 de maio de 2012 (Figuras 3.12 e 3.13).

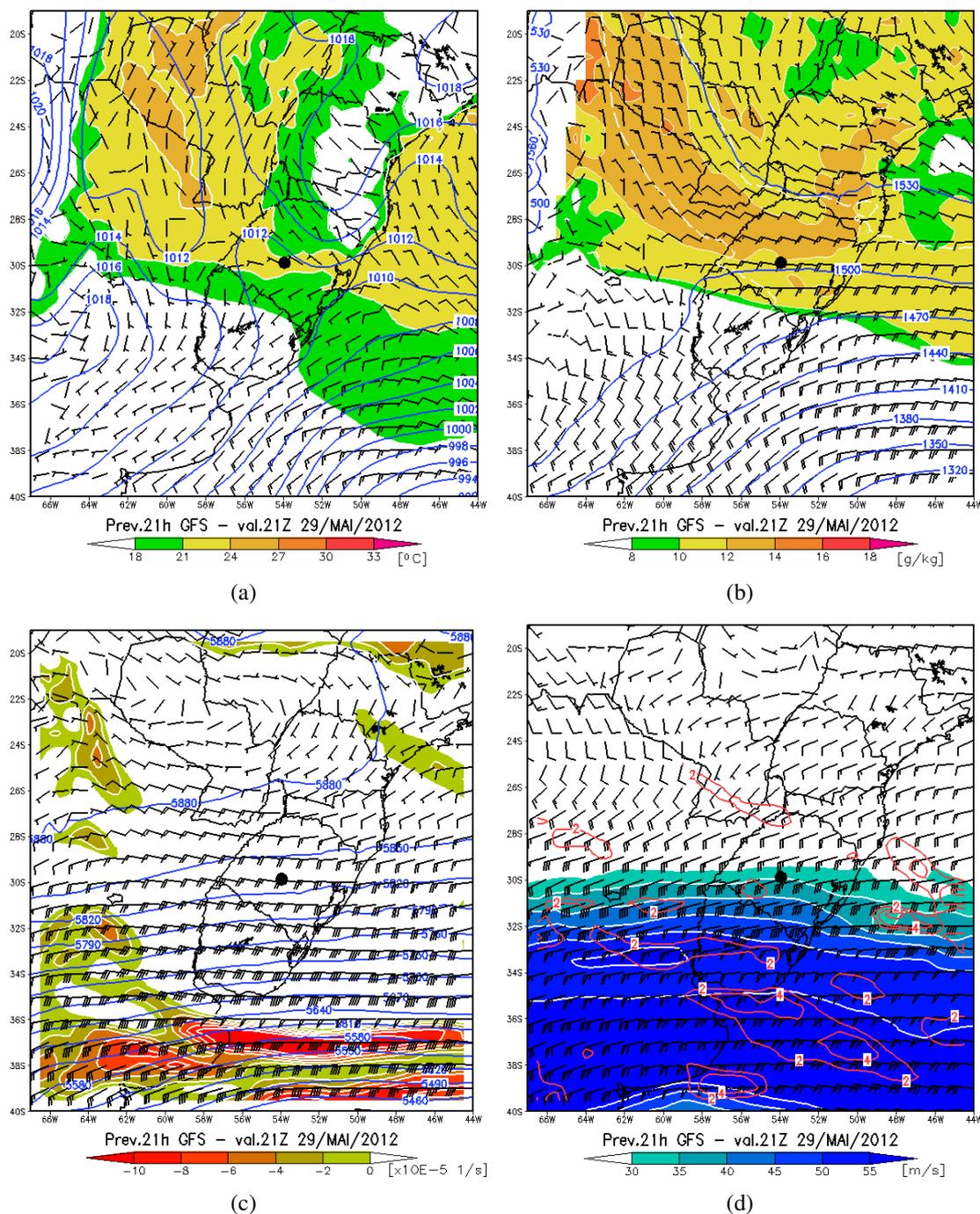


Figura 3.12: Igual à figura 3.6, mas para a previsão numérica de horizonte de 21h válida às 21Z de 29/05/2012.

A figura 3.12a mostra que em superfície era prevista a passagem de um cavado frontal associado a um ciclone extratropical (este localizado fora do domínio da figura, no Atlântico Sul) sobre o RS. Combinado com um cavado invertido sobre o norte da Argentina este padrão formaria um ponto de colo no campo de pressão ao nível do mar. Como consequência disto, um campo de deformação com o eixo de contração perpendicular às isotermas caracterizava o padrão frontogenético previsto sobre o nordeste da Argentina e RS. Estando a previsão correta, a frente fria passaria pelo centro do RS após as 21Z.

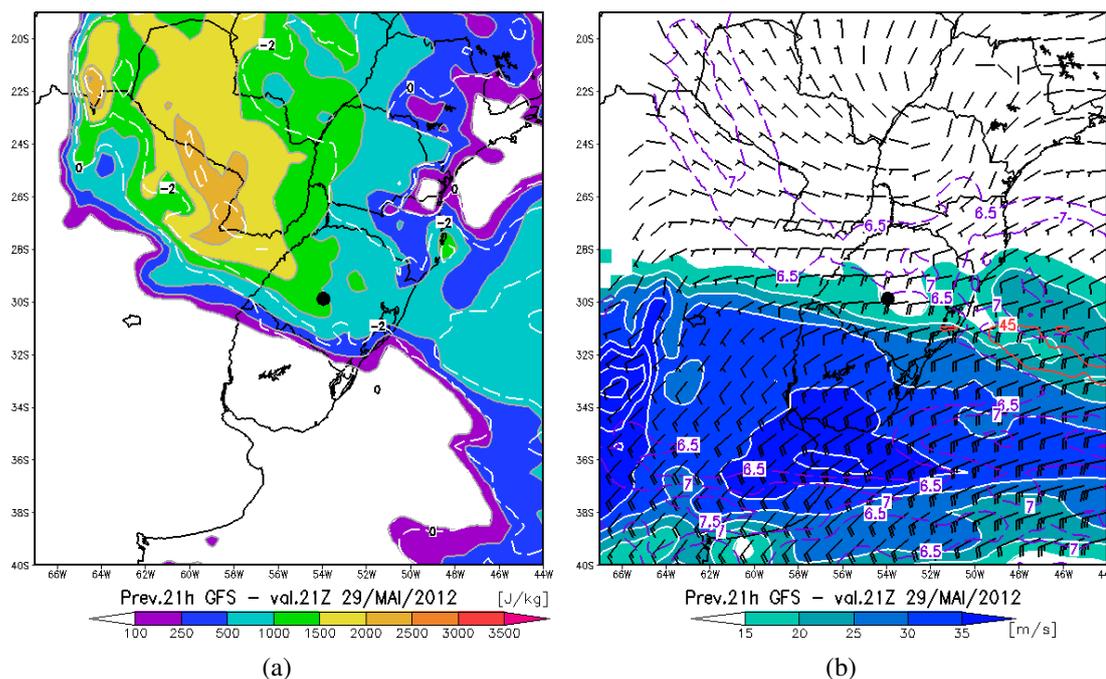


Figura 3.13: Igual à figura 3.7, mas para a previsão numérica de horizonte de 21h válida às 21Z de 29/05/2012.

Em $850hPa$ (Figura 3.12b) o campo de deformação correspondente também é perceptível entre o norte-nordeste argentino e a fronteira Brasil-Uruguaí. O cavado frontal em $850hPa$ estaria no norte do Uruguaí. Sobre o RS prevaleceria um escoamento úmido variando entre de leste e de leste-noroeste, ou seja, ainda no setor quente do sistema baroclínico. Não é possível caracterizar um jato de baixos níveis na previsão em $850hPa$, mas um escoamento da ordem de $15m/s$ estava presente neste campo.

A figura 3.12c ilustra a previsão em $500hPa$. Um cavado de grande comprimento, mas com algumas ondas curtas embebidas, era previsto deslocando-se sobre a saída da Bacia do Prata, ao sul de $30^\circ S$. Este padrão era associado à passagem do ciclone extratropical cujo centro já se encontrava corrente-abaxio, a SE do domínio mostrado. O escoamento previsto era predominantemente zonal em $500hPa$ sobre o RS. Ou seja, combinando-se o nível de superfície, $850hPa$ e $500hPa$, a previsão indicava pouco cisalhamento direcional do vento no RS; a magnitude do cisalhamento entretanto seria mais intensa do que nos dois episódios analisados anteriormente - i.e., mais baroclinia presente neste caso.

Em $200hPa$ (Figura 3.12d) a corrente de jato prevista mostrava-se bastante zonal ao sul de $28^\circ S$, e com o RS distante dos quadrantes de entrada e saída do núcleo do jato (*jet streak*). Entretanto, no lado norte da corrente de jato, no setor quente, a solução numérica apresentava alguns pontos de difluência e núcleos de divergência (ver isolinhas vermelhas), indicando a resposta dinâmica em altos níveis à ocorrência de precipitação convectiva, não mostrada. Soluções de outros modelos numéricos, não ilustradas aqui, também caracterizavam configuração semelhante.

Em termos de CAPE e LI, a figura 3.13a mostra a presença da massa de ar instável

sobre o RS, com valores moderados de CAPE (acima de $500J/kg$) previstos na maior parte do estado, e com LI também ligeiramente negativo. Como mencionado antes, o cisalhamento vertical do vento previsto no RS (Figura 3.13b) seria maior do que nos dois casos anteriores, associado desta vez a uma forçante sinótica mais significativa. Pelo mesmo motivo, os *lapse rates* previstos na camada entre $700 - 500hPa$ (linhas tracejadas amarelas) também mostravam-se mais altos na Bacia do Prata. O deslocamento esperado das tempestades, por sua vez, mostrava forte componente de oeste, praticamente zonal, sobre o RS (barbelas). Assim, aguardava-se que tempestades formando-se no oeste gaúcho - onde previa-se oferta de umidade, CAPE mais elevado e um cavado em superfície - deslocariam-se para o centro do estado. Finalmente, em termos de água precipitável (isolinhas vermelhas), uma faixa de valores mais altos era prevista no centro do RS, mas sem apresentar valores tão significativos quanto nas duas situações anteriores. Entretanto, este evento foi o que registrou a precipitação mais intensa, como será visto a seguir.

Com a presença da forçante frontal, o que aumentaria a probabilidade de *todo* o setor central do RS registrar precipitação convectiva, optou-se por instalar a Estação Mesomóvel no campus da UFSM, ao lado da estação automática do INMET (vide figura 3.1), para permitir a comparação dos dois registros durante a passagem de uma frente fria.

3.3.2 Coleta de dados: Análise geral

A figura 3.14 mostra as séries temporais das variáveis coletadas nas estações Mesomóvel (linhas pretas, e também azul no caso da figura 3.14b) e automática do INMET de Santa Maria (linhas vermelhas) para o período entre 15:00Z de 19/05 e 15:00Z de 30/05/2012. A frequência de amostragem foi de $0,2Hz$ - i.e., 1 registro a cada 5s.

Uma inspeção geral do comportamento das variáveis permite identificar padrões consistentes com a passagem de uma frente fria sobre Santa Maria. É possível destacar a passagem do cavado em superfície na madrugada do dia 30/05 (Figura 3.14a) seguida do aumento da pressão atmosférica ao longo do mesmo dia. Comparando-se as primeiras e as últimas horas da série temporal na figura 3.14b, fica clara também a mudança de 180° na direção do vento, mudando entre de N para de S. A temperatura potencial e a temperatura do ponto de orvalho (Figuras 3.14d e 3.14e, respectivamente) mostram, ambas, uma acentuada tendência de queda durante o período de 24h examinado, ressaltando a transição entre as duas massas de ar distintas. E, como esperado, a precipitação se deu **durante** a transição entre as massas de ar (Figura 3.14f).

O que mais destacou este evento foi o total pluviométrico, de $121,4mm/130,6mm$ (Estação Mesomóvel / automática INMET) em um intervalo de 12h, entre as 21:00 Z de 29/05 e 09:00 Z de 30/05. Dentro deste período uma longa sequência de tempestades convectivas (*trailing convective cells*) passou pela cidade de Santa Maria com deslocamento de oeste-

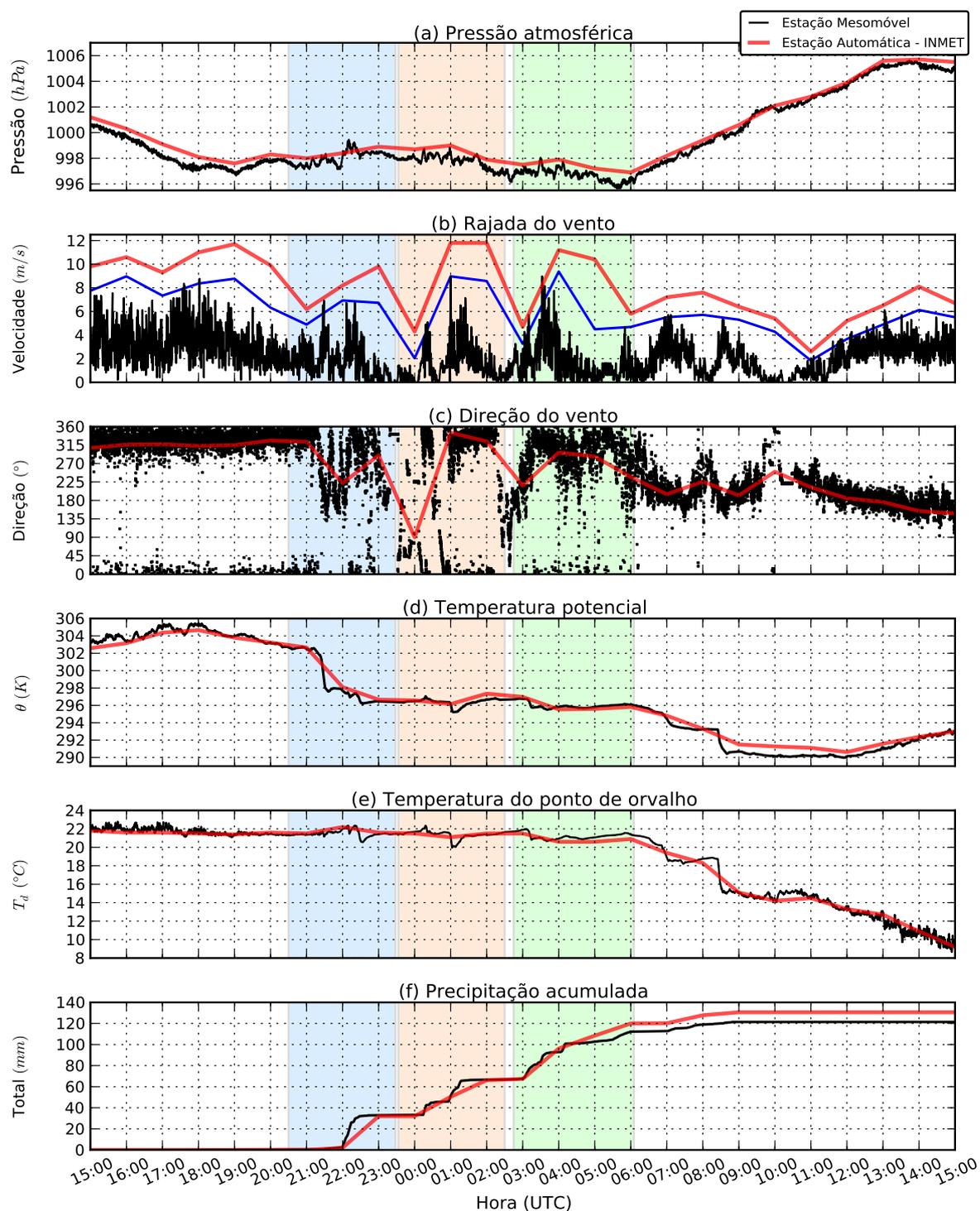


Figura 3.14: Igual à figura 3.3, mas referentes ao período entre 15:00Z de 29/05 e 15:00Z de 30/05/2012. As três faixas coloridas indicam intervalos em que as séries temporais são examinadas com mais detalhes. Vide texto.

sudoeste - como previsto (Figura 3.13b) - explicando o alto acumulado de precipitação (p.ex., Doswell, Brooks e Maddox (1996)). A figura 3.15 ilustra este padrão com uma sequência de imagens horárias dos CAPPs de 5500m do campo de refletividade do radar de Santiago entre as 22:00Z de 29/05 e as 03:00Z de 30/05/2012, cobrindo a primeira metade do período de precipitação. Diversos pontos de inundação ocorreram na cidade de Santa Maria durante este evento.

As séries temporais de temperatura potencial (Figura 3.14d) e de precipitação (Figura 3.14f) mostram, respectivamente, séries de “degraus” de queda de θ e de aumento na acumulação de chuva, ambos associados à passagem consecutiva de células convectivas. Estes “degraus” ficam melhor caracterizados nos dados da Estação Mesomóvel do que na estação do INMET, assim como os períodos intercalados de rajadas de vento mais fortes observadas durante o mesmo intervalo (Figura 3.14b). Outro resultado interessante que só é perceptível pela medição da Estação Mesomóvel é no comportamento da pressão atmosférica (Figura 3.14a): entre as 21:00Z de 29/05 e 06:00Z de 30/05 a série se apresentou mais ruidosa do que nos horários adjacentes. Este foi o período de atividade convectiva mais frequente sobre a estação, de modo que a variabilidade de alta frequência observada na pressão neste intervalo deve estar associada às perturbações (hidrostáticas e também não-hidrostáticas) induzidas pela circulação de escala de tempestade.

A diferença mais significativa entre as estações, entretanto, ocorreu no total pluviométrico, de cerca de 9 mm ao final do evento, como citado acima. Isto pode ser melhor avaliado quando o comportamento das variáveis meteorológicas nos instantes das passagens das tempestades sobre o campus da UFSM for examinado de maneira “ampliada”. Três intervalos são selecionados para esta ampliação, por serem os de registro de maiores taxas de precipitação. Intervalo 1: entre 20:30Z e 23:30Z de 29/05 (Figura 3.16; destacado em azul na figura 3.14); intervalo 2: entre 23:30Z de 29/05 e 02:30Z de 30/05 (Figura 3.17; destacado em vermelho na figura 3.14); intervalo 3: entre 02:45Z e 06:00Z de 30/05/2012 (Figura 3.18; destacado em verde na figura 3.14).

3.3.3 Coleta de dados: análise do intervalo 1, entre 20:30Z e 23:30Z de 29/05/2012.

Neste episódio, a primeira ocorrência de precipitação foi de chuva fraca, acumulando menos de 4mm entre 21:00Z e 22:00Z de 29/05, como mostrado na figura 3.16f. Observe que apenas pela análise da série da Estação Mesomóvel é possível caracterizar a natureza relativamente contínua desta chuva fraca, sugerindo que tratou-se do setor estratiforme de uma célula convectiva; os campos de refletividade do radar de Santiago válidos entre 21:00Z e 21:45Z, não mostrados, confirmam que o setor de maior refletividade da tempestade passou logo ao sul de Santa Maria.

Ainda assim, entre 21:00Z e 22:00Z as duas estações registraram algumas rajadas de

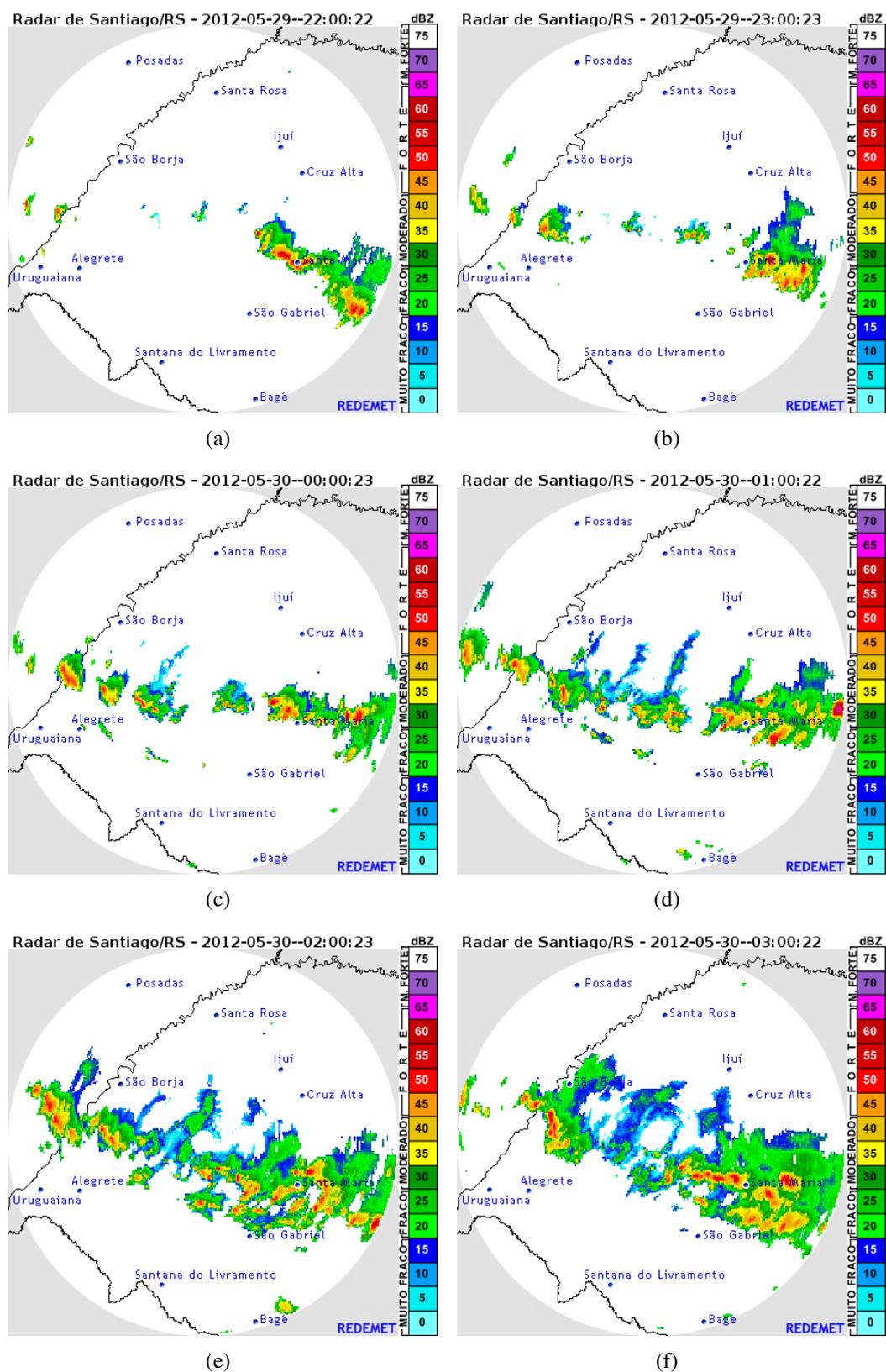


Figura 3.15: Igual à figura 3.4 mas para os dias 29 e 30/05/2012. Imagens válidas às: (a) 22:00Z, e (b) 23:00Z de 29/05; e (c) 00:00Z, (d) 01:00Z, (e) 02:00Z, e (f) 03:00Z de 30/05. As tempestades deslocam-se predominantemente de O-SO. Fonte das imagens: Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (www.redemet.aer.mil.br).

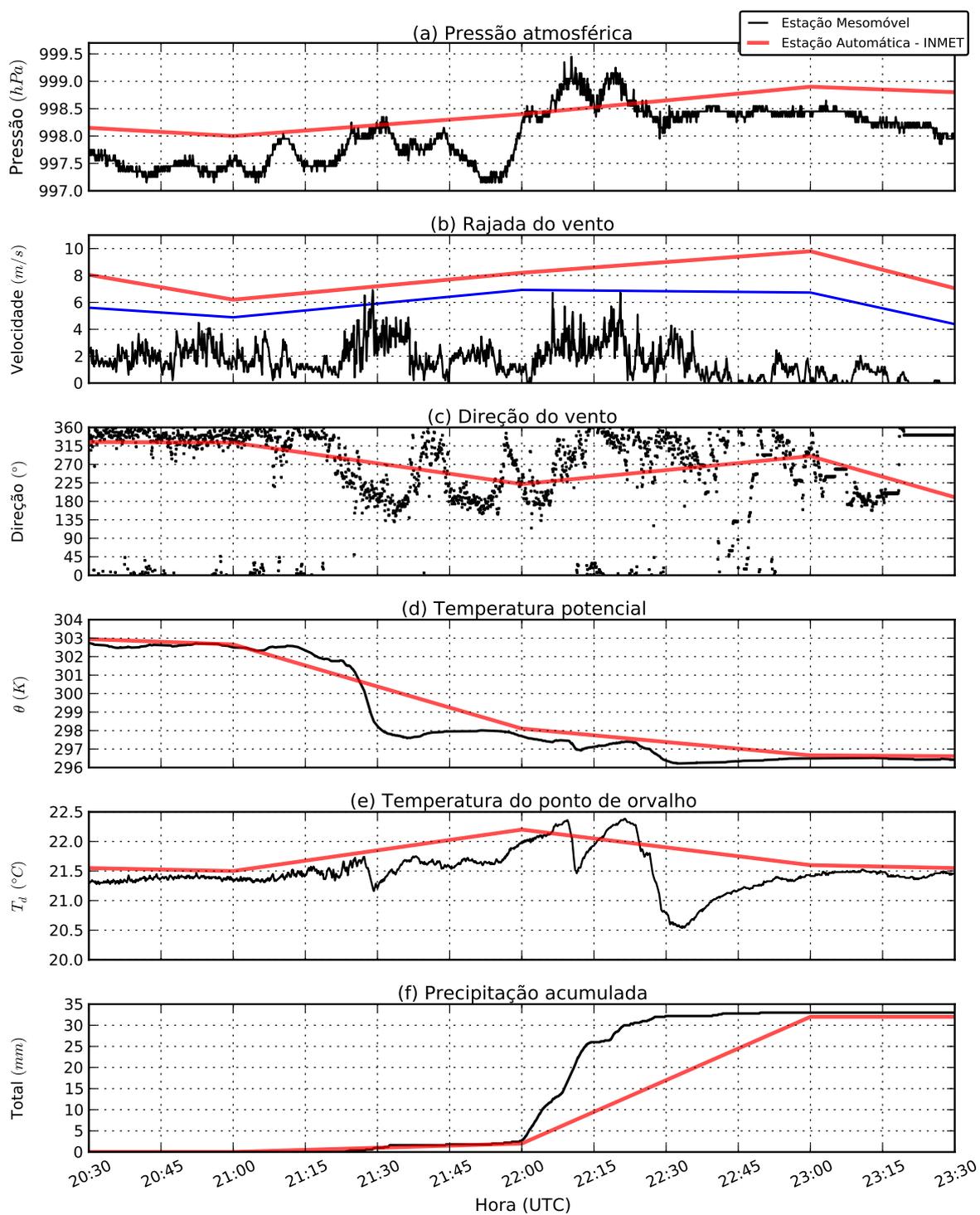


Figura 3.16: Igual à figura 3.3, mas referentes ao período entre 20:30Z e 23:30Z de 29/05/2012.

vento chegando a $7m/s$ ($8m/s$) (Estação Mesomóvel (automática INMET); Figura 3.16d) e uma queda na temperatura potencial da ordem de $5K$. Pela Estação Mesomóvel, e somente através dela, é possível afirmar que as rajadas deste horário foram de sul (Figura 3.16b), o que é consistente com a passagem do núcleo convectivo da célula pelo sul de Santa Maria. Um modesto aumento de pressão (de menos de $1hPa$; figura 3.16a), e um pequena perturbação em Td (queda de menos de $1^{\circ}C$; figura 3.16e) foram registradas pela Estação Mesomóvel durante a queda em θ pouco antes das 21:30Z. Estes resultados combinados condizem com a passagem, sobre o campus da UFSM, de uma circulação atmosférica induzida pela convecção cujo núcleo encontrava-se na vizinhanças mas não exatamente sobre o bairro de Camobi, onde fica a Universidade.

A figura 3.16f mostra que os maiores acúmulo e taxa de precipitação ocorreram logo a seguir, entre 22:00Z e 22:30Z, com a passagem de uma nova tempestade, mas agora com seu núcleo convectivo em cima de Santa Maria (ver figura 3.15a). Começando às 22:00Z, mais de $20mm$ acumularam-se em apenas 15 minutos, seguidos de $5mm$ adicionais até as 22:30Z, caracterizando uma chuva torrencial. Esta taxa de precipitação torna-se suavizada quando examinada através do relato horário da estação do INMET; de qualquer forma, o total pluviométrico registrado pela duas estações até este momento (23:00Z) era muito parecido, com diferença de $1mm$.

Na pressão atmosférica (Figura 3.16a), um aumento de pouco mais de $2hPa$ em $15min$ iniciou-se às 21:55Z (i.e., $5min$ antes do início da chuva mais intensa), sendo bem correlacionado com a ocorrência de outra modesta frente de rajada sobre o local (Figura 3.16b). Pela figura 3.16c vê-se que durante estas rajadas, entre 22:05Z e 22:20Z, a direção do vento mudou monotonicamente de sul para norte passando por oeste, o que parece condizente com o deslocamento de O-SO da célula. Observe que esta análise só é possível através dos dados em alta frequência da Estação Mesomóvel.

Interessantemente, nenhuma das estações registrou uma queda acentuada de θ entre 22:00Z e 23:00Z (Figura 3.16d). De maneira semelhante ao observado no episódio de 03/02/2012, a passagem da piscina de ar frio anterior modificou a camada superficial de modo que o gradiente de θ , comum entre o influxo e efluxo de ar de uma tempestade, foi muito enfraquecido. A temperatura do ponto de orvalho (Figura 3.16e), por sua vez, mostrou, nos dados da Estação Mesomóvel, variações de pouco mais de $0,5^{\circ}C$ durante o período de rajadas de vento e chuva intensa. Uma queda maior de Td , de cerca de $2^{\circ}C$, ocorreu ao final do registro da chuva entre 22:25Z e 22:35Z. Ao final da passagem da tempestade, entretanto, Td volta ao patamar em que se encontrava antes das 21:00Z. Ou seja, a passagem das duas células convectivas perturbou o campo de Td mas não o alterou realmente, o que significa que a passagem da frente fria ainda não havia ocorrido até aquele instante.

3.3.4 Coleta de dados: análise do intervalo 2, entre 23:30Z de 29/05 e 02:30Z de 30/05.

Este intervalo foi selecionado porque ressalta muito bem a perturbação sofrida pelas variáveis atmosféricas em superfície durante a atividade convectiva, perturbação esta que só pode ser percebida na amostragem em alta frequência. Pelas séries da Estação Mesomóvel, indicadas pelas linhas pretas na figura 3.17, percebe-se que seus primeiros 30min e seus últimos 30min se caracterizam pela prevalescência de condições de “calmaria” (ventos muito fracos ou nulos, e com grande variabilidade de direção), onde as variáveis escalares apresentam-se aproximadamente estáveis (i.e., com tendência estável e variância pequena), e sem registro de chuva.

Em contraste, entre 00:00Z e 02:00Z de 30/05, as variáveis apresentam perturbações de pequena amplitude em suas séries, associadas à passagem de mais duas tempestades por Santa Maria (Figuras 3.15c, 3.15d e 3.15e). A passagem das duas células convectivas é distinguível, por exemplo, na série temporal da rajada de vento (Figura 3.17b) onde há a ocorrência de duas situações com rajadas de vento, entre 00:15Z e 00:25Z (rajadas fracas), e entre 00:55Z e 01:30Z (rajada máxima de 9m/s (12m/s) na Estação Mesomóvel (estação do INMET)). Em ambos os casos a direção das rajadas foi de N-NO (Figura 3.17c). Na série temporal de chuva (Figura 3.17f) também fica evidente a ocorrência de chuva forte entre aproximadamente 00:15Z e 00:30Z, e entre 00:55Z e 01:20Z. Deve-se ressaltar também a ótima concordância entre as duas estações ao final deste intervalo em termos de total pluviométrico.

Na pressão atmosférica (Figura 3.17a) um aumento de aproximadamente 1hPa começa cerca de cinco minutos antes do início da primeira chuva deste intervalo analisado. É interessante que nos 60min seguintes uma oscilação aparentemente periódica se estabelece, com amplitude de 0,5hPa e período variando entre 5min e 12min. Sem realizar um processamento do sinal não é possível afirmar de maneira conclusiva se este comportamento representa a captura de uma onda de gravidade - com o sensor da Estação Mesomóvel funcionando como um microbarógrafo (HAUF et al., 1996) - mas esta hipótese será examinada em trabalhos e experimentos futuros.

Ao contrário do caso de 15/12/2011, as series temporais de θ e Td (Figuras 3.17d e 3.17e, respectivamente) estão altamente correlacionadas, com destaque para a queda de cerca de 1,5K e 1,5°C respectivamente experimentada pela duas variáveis em torno do evento de chuva às 01:00Z. Após a passagem das células convectivas deste intervalo as duas variáveis voltam aos mesmos valores observados no início do intervalo, mais uma vez indicando que a passagem da frente fria ainda não havia ocorrido até então.

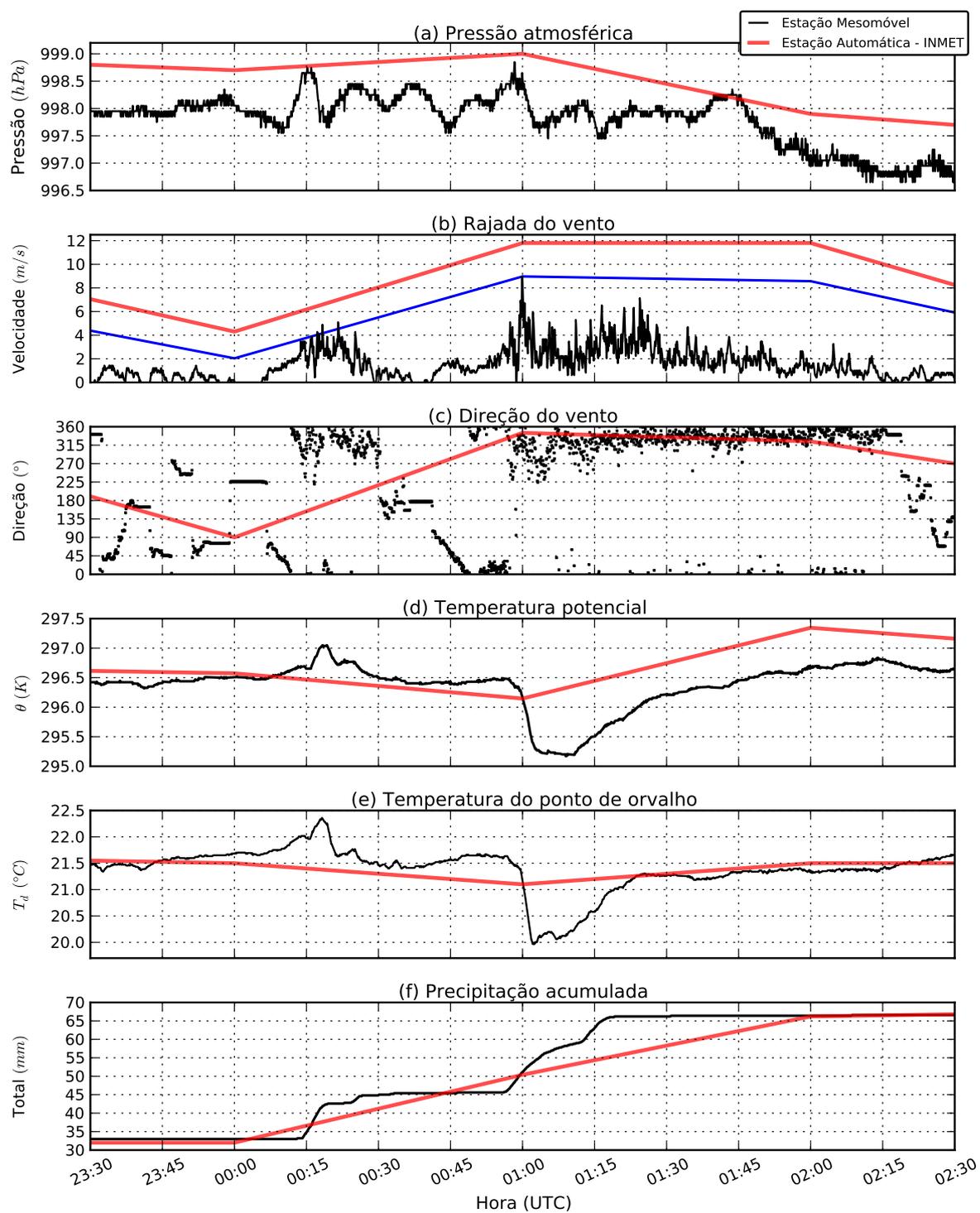


Figura 3.17: Igual à figura 3.3, mas referentes ao período entre 23:30Z de 29/05 e 02:30Z de 30/05/2012.

3.3.5 Coleta de dados: análise do intervalo 3, entre 02:45Z e 06:00Z de 30/05/2012.

Durante este terceiro intervalo de tempo novas tempestades convectivas atingiram Santa Maria, como pode ser evidenciado pelo campo de refletividade do radar de Santiago na figura 3.15f e pelas séries temporais da figura 3.18 - as variáveis apresentam comportamento semelhante ao discutido para o intervalo 2 quando da passagem das tempestades. No final do intervalo 3 o eixo do cavado passa por Santa Maria, sendo o instante de menor pressão registrada pelas duas estações - $995,6hPa$ entre 05:30Z e 05:45Z de 30/05 na Estação Mesomóvel (Figura 3.18a).

Também é no intervalo 3 quando a diferença na medição de precipitação entre as duas estações se torna significativa. Na figura 3.18f vê-se que no horário 03:00Z de 30/05 as duas estações ainda apresentavam mesma leitura de precipitação acumulada. Às 04:00Z, entretanto, surge uma diferença de cerca de $4mm$ a mais para a estação do INMET: dentro destes $60min$, enquanto a Estação Mesomóvel registrou um acumulado de $24,7mm$, a estação do INMET registrou $28,6mm$. Na hora seguinte, entre 04:00Z e 05:00Z, a diferença aumentou, com a Estação Mesomóvel registrando uma precipitação adicional de $10,2mm$ e a estação do INMET $12,2mm$.

A diferença seguiu acumulando-se até atingir $9,2mm$ ao final dos episódios de chuvas às 09:00Z (i.e., 3h após o intervalo 3), com $121,4mm$ para a Estação Mesomóvel e $130,4mm$ para a automática do INMET. Uma hipótese para o surgimento da diferença das medidas e de seu efeito acumulativo a partir do intervalo 3 é a ocorrência de uma rajada de vento que possa ter alterado o ângulo de exposição do pluviômetro da Estação Mesomóvel, instalado pouco acima do solo. A figura 3.18b mostra que entre 03:00Z e 04:00Z ocorreu uma tempestade com rajada máxima de $9m/s$ na altura do anemômetro da Estação Mesomóvel (cerca de $2m$). Entretanto, mais próximo do solo esta rajada certamente foi mais fraca. Parece improvável que ventos abaixo de $9m/s$ sejam capazes de alterar o ângulo de exposição do pluviômetro da Mesomóvel, que é ancorado ao solo. Outra hipótese é a de entrada de algum detrito transportado pelo vento no pluviômetro da Estação Mesomóvel. Contudo, estas hipóteses não puderam ser verificadas.

De volta à figura 3.14, logo após as 06:00Z de 30/05 observa-se nas duas estações meteorológicas que: (i) a pressão atmosférica aumentou de maneira contínua; (ii) a direção do vento passou a ser predominantemente de SO e, depois, de S; (iii) tanto θ quanto Td experimentaram uma queda contínua, incluindo-se alguns “degraus” de queda. Este comportamento combinado indica que a frente fria passou por Santa Maria logo após o final do intervalo 3 estudado acima - i.e., logo após as 06:00Z.

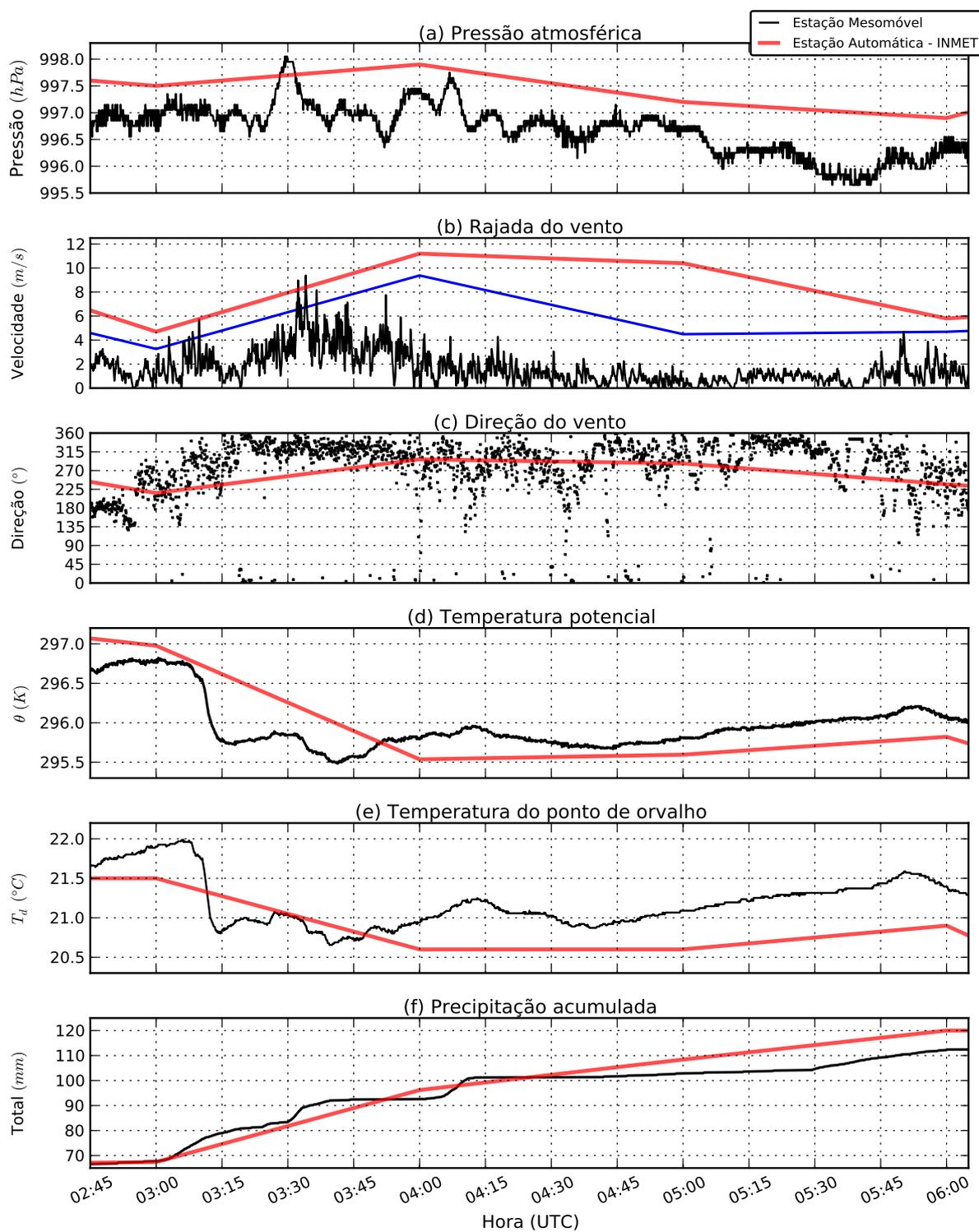


Figura 3.18: Igual à figura 3.3, mas referentes ao período entre 02:45Z e 06:05Z de 30/05/2012.

4 CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS

4.1 Principais conclusões

Neste trabalho foi testado o conceito de medições atmosféricas realizadas com uma estação meteorológica móvel de superfície, portátil, e de rápida montagem e instalação. Esta estação, chamada de Mesomóvel, foi concebida para a coleta de dados com frequência adequada para amostrar a evolução de circulações atmosféricas de escala convectiva, tipicamente de pequena extensão espacial e curta duração. Foi testada também uma estratégia coordenada de análise e previsão de tempo, tanto em curto prazo quanto em *nowcasting*, apropriada para o apoio de um experimento de campo que consiste da interceptação de tempestades utilizando a Estação Mesomóvel.

Os resultados obtidos mostraram a viabilidade da Estação Mesomóvel como uma ferramenta científica de baixo custo para a observação meteorológica de tempestades convectivas. Com uma despesa menor que R\$ 10.000,00 foi possível montar todo o conjunto que compõe a Estação Mesomóvel. Considerando que a unidade montada trata-se de um protótipo, é natural que esta despesa caia com as próximas unidades.

Ficou comprovado neste trabalho o sucesso da portabilidade da Estação Mesomóvel em veículos de pequeno tamanho. Sua estrutura é leve (10kg) e modular, o que permite seu rápido transporte por uma pequena equipe de pessoas para a trajetória de uma tempestade em andamento sobre uma localidade desprovida de estação meteorológica da rede operacional. Por ser uma unidade tática de observação, a Mesomóvel é provavelmente a estação meteorológica de instalação mais rápida em operação no país, necessitando tipicamente de 10 minutos para sua total operacionalização uma vez identificado o sítio de instalação.

Em termos práticos, a instalação da Mesomóvel poder ser feita por uma única pessoa, ainda que nos experimentos de interceptação de tempestades realizados neste estudo concluiu-se que uma equipe de três pessoas é o ideal para a montagem da Mesomóvel.

Testes comparativos em campo mostraram que a Estação Mesomóvel representa a evolução de fenômenos atmosféricos de escala sinótica - como a passagem de frentes e cavados - tão bem quanto uma estação automática da rede do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Ao mesmo tempo, apresenta também a capacidade de amostrar processos de frequência mais alta característicos da escala meso- γ , podendo-se citar frentes de rajada, piscinas de ar frio, mesoaltas e altas taxas de precipitação convectiva. Estes fenômenos de alta frequência não são amostrados adequadamente pelas estações da rede operacional.

Neste contexto, destacam-se algumas perturbações registradas pela Estação Mesomóvel quando da passagem de fenômenos de origem convectiva sobre ela. As **taxas** de preci-

pitação convectiva detectadas pela Mesomóvel mostraram-se bem mais acentuadas do que as taxas indicadas pelos dados horários da estação do INMET. O mesmo é verdade para a taxa de variação no tempo das demais variáveis, como pressão atmosférica e temperatura potencial, durante a passagem de mesoaltas e piscinas de ar frio. Além disto, muitas variáveis que, na amostragem em baixa frequência da estação do INMET aparentam-se diretamente correlacionadas, na alta frequência apresentam diferenças de fase de curta duração. Por exemplo, na passagem de uma piscina de ar frio (queda de θ) é natural esperar um aumento da pressão atmosférica via resposta hidrostática; entretanto, pela Estação Mesomóvel algumas perturbações de pressão precederam em alguns minutos as perturbações em θ em situações de piscina de ar frio. Isto sugere que processos não-hidrostáticos estiveram envolvidos na perturbação do campo de pressão e/ou que a pressão em superfície respondeu hidrostáticamente a variações na distribuição vertical de massa sobre o ponto de observação. Estas variações podem ocorrer acima do solo e portanto não necessariamente afetam o campo de temperatura potencial em superfície.

A Estação Mesomóvel também mostrou-se muito útil na detecção da direção e do horário exato de ocorrência das rajadas de vento, o que é improvável de acontecer pela estação do INMET. Isto é fundamental na caracterização do instante inicial e da duração de frentes de rajada. Por exemplo, no evento de 03/02/2012 a Mesomóvel detectou uma situação em que duas frentes de rajada **distintas** e de curta duração ocorreram dentro de um intervalo de cerca de 60min; naquela mesma situação uma estação operacional do INMET registraria a ocorrência como sendo **um único** episódio de frente da rajada. Este resultado tem grande impacto em Meteorologia de Mesoescala uma vez que naquela ocasião foram duas tempestades distintas que passaram pela estação Mesomóvel no período de 60min. Por outro lado, deve-se ter em mente que as medições de velocidade do vento realizadas com a Mesomóvel serão, na maioria das vezes, subestimativas em comparação com medições feitas a 10m de altura.

Esta pesquisa demonstrou que é factível realizar no Brasil a interceptação de tempestades convectivas para fins científicos. Um total de 3 tempestades foram registradas com sucesso com a Estação Mesomóvel em modo de interceptação no estado do Rio Grande do Sul durante o verão de 2012. Além do elemento observacional/instrumental, a previsão de tempestades em modo operacional representou uma componente fundamental para o sucesso desta investigação. Durante a campanha de interceptação a previsão de tempo nos horizontes de muito curto prazo e *nowcasting*, ainda pouco difundida no Brasil, foi bastante exercitada. Concluiu-se que, apesar de limitações importantes (a serem citadas abaixo), é possível realizar esta tarefa de maneira satisfatória no Brasil no apoio às atividades de interceptação de tempestades, requerendo contudo um boa coordenação e comunicação entre os previsores/*nowcasters* na Base e a Equipe de Campo.

Algumas dificuldades encontradas na atividade de interceptação de tempestades foram: (a) uma malha viária insuficiente para a interceptação adequada das células convectivas isoladas - um certo número de tempestades não pôde ser monitorado devido à ausência de estradas;

(b) a baixa qualidade das estradas, geralmente em pista única e com buracos, o que reduz consideravelmente a velocidade de deslocamento da Equipe de Campo; além disto, a falta de acostamento impediu em algumas ocasiões a seleção do ponto mais adequado para a instalação da Mesomóvel em relação ao deslocamento da tempestade; (c) falta de uma cobertura adequada de telefonia celular em pontos distantes de cidades, o que impedia o contato entre a Equipe de Campo e a Base durante o *nowcasting*; (d) atualização lenta das imagens de refletividade dos radares meteorológicos, de modo que a Equipe de Campo em diversas situações precisava tomar decisões baseadas apenas no registro visual; ocasiões ocorreram em que, por causa da não operação dos radares meteorológicos, a interceptação não foi sequer deflagrada apesar das condições favoráveis a tempestades.

4.2 Trabalhos futuros e recomendações

- Na continuação deste trabalho, a análise das séries temporais deverá incluir uma abordagem mais quantitativa, com o uso de ferramentas estatísticas e matemáticas que ajudem a processar o sinal meteorológico. Neste contexto, a filtragem do ciclo diurno, por exemplo, ajudará a destacar melhor as perturbações de escala convectiva medidas pela Estação Mesomóvel.
- Nos meses de novembro e dezembro de 2012, a Estação Mesomóvel fará parte do sistema observacional do Projeto CHUVA (Cloud processes of the main precipitation systems in Brazil: A contribution to cloud resolving modeling and to the GPM (Global Precipitation Measurement)) durante sua campanha no estado do Rio Grande do Sul. As observações em alta frequência realizadas pela Mesomóvel nos setores mais intensos das tempestades poderão contribuir na caracterização da atividade convectiva (taxas de precipitação, piscinas de ar frio, mesoaltas, frentes de rajada, mesobaixas, etc.). Estas informações *in situ* serão relevantes para a comparação com dados advindos dos sistemas de sensoriamento remoto a serem instalados na região, como o radar meteorológico banda X. Além disto, poderão ser úteis na validação de simulações numéricas em alta resolução. Com a presença de um radar meteorológico de rápida atualização dedicado à campanha do CHUVA, a atividade de *nowcasting* ganhará mais eficiência, aumentando as oportunidades de interceptação.
- Existe a intenção de se montar outras unidades Mesomóvel nos próximos anos. O intuito é experimentar a instalação de uma pequena rede de Estações Mesomóvel em modo de interceptação, buscando-se monitorar simultaneamente diferentes setores de uma mesma tempestade. No futuro espera-se que o conjunto de medições realizadas por estações tipo Mesomóvel venham compor um importante banco de dados “climatológico” a respeito

de circulações de escala convectiva no Brasil. Estes dados também poderão ser utilizados para assimilação em simulações numéricas em alta resolução.

- Sugere-se para as futuras unidades Mesomóvel que um sistema integrado de sensores, do tipo *all-in-one*, seja empregado de modo a diminuir o número de módulos de sensores. Com isto, o tamanho e o peso do conjunto serão reduzidos ainda mais, e também será solucionado o problema da instalação do pluviômetro.

Apêndice A – Resfriamento latente

Da definição de temperatura potencial à partir da equação de Poisson para processos adiabáticos:

$$\theta = T \cdot \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{R_d}{c_p}} \quad (\text{A.1})$$

Aplicando o logaritmo:

$$\ln(\theta) = \ln(T) + \frac{R_d}{c_p} \cdot \ln\left(\frac{p_0}{p}\right) \quad (\text{A.2})$$

$$\ln(\theta) = \ln(T) + \frac{R_d}{c_p} \cdot \ln(p_0) - \frac{R_d}{c_p} \cdot \ln(p) \quad (\text{A.3})$$

Aplicando o operador diferencial em (A.3):

$$d\ln(\theta) = d\ln(T) - \frac{R_d}{c_p} \cdot d\ln(p) \quad (\text{A.4})$$

Multiplicando (A.4) por c_p :

$$c_p \cdot d\ln(\theta) = c_p \cdot d\ln(T) - R_d \cdot d\ln(p) = c_p \cdot \frac{dT}{T} - R_d \cdot \frac{dp}{p} \quad (\text{A.5})$$

A Primeira Lei da Termodinâmica pode ser expressa como:

$$dq = c_p \cdot dT - \alpha \cdot dp \quad (\text{A.6})$$

Resolvendo para $c_p \cdot dT$ e substituindo em (A.5):

$$c_p \cdot \frac{d\theta}{\theta} = \frac{dq}{T} + \frac{\alpha}{T} dp - R_d \cdot \frac{dp}{p} \quad (\text{A.7})$$

Da Equação de Estado:

$$p\alpha = R_d T \Rightarrow \frac{\alpha}{T} = \frac{R_d}{p} \quad (\text{A.8})$$

Substituindo (A.8) em (A.7):

$$c_p \cdot \frac{d\theta}{\theta} = \frac{dq}{T} + R_d \cdot \frac{dp}{p} - R_d \cdot \frac{dp}{p} \quad (\text{A.9})$$

$$c_p \cdot \frac{d\theta}{\theta} = \frac{dq}{T} \quad (\text{A.10})$$

Resolvendo (A.10) para $d\theta$:

$$d\theta = \frac{\theta}{c_p \cdot T} dq \quad (\text{A.11})$$

A variação de energia devido à mudança de fase de é dada por:

$$dq = l \cdot dr_h \quad (\text{A.12})$$

, sendo: dq a variação de energia (J), l o calor latente de vaporização (l_v), fusão (l_f) ou sublimação (l_s) e dr_h é a massa de hidrometeoro evaporada, derretida ou sublimada (i.e., dr_h é negativo).

Substituindo (A.12) em (A.11):

$$d\theta = \frac{\theta}{T} \frac{l}{c_p} dr_h \quad (\text{A.13})$$

, sendo: $d\theta$ a variação de temperatura potencial, T a temperatura absoluta, c_p o calor específico do ar a pressão constante.

Apêndice B – Corrente de densidade

Primeiro deve-se calcular a perturbação na superfície do fluido mais denso, em $x = -\infty$. Para isso usamos a equação hidrostática usando a aproximação de Boussinesq:

$$\alpha_0 \cdot \frac{\partial p'}{\partial z} = B \quad (\text{B.1})$$

, sendo α_0 o volume específico (constante) caracterizando as condições médias do sistema.

Integrando em $x = -\infty$ de $z = 0$ a $z = H$:

$$\int_{p'(0)}^{p'(H)} \alpha_0 \cdot \frac{\partial p'}{\partial z} dz = \int_0^H B dz \quad (\text{B.2})$$

$$\alpha_0 p'(H) - \alpha_0 p'(0) = BH \quad (\text{B.3})$$

Sendo $B = -g \frac{\rho'}{\bar{\rho}} = -g \frac{\rho - \bar{\rho}}{\bar{\rho}}$, (B.3) fica:

$$\alpha_0 p'(H) - \alpha_0 p'(0) = -gH \frac{\rho - \bar{\rho}}{\bar{\rho}} \quad (\text{B.4})$$

$$\alpha_0 p'(0) = \alpha_0 p'(H) + gH \frac{\rho - \bar{\rho}}{\bar{\rho}}; \text{ em } x = -\infty \quad (\text{B.5})$$

Para obter uma expressão para a velocidade de deslocamento de uma corrente de densidade, utiliza-se a equação do momento, assumindo deslocamento unidirecional (na direção x), que o fluido é invíscido, aplicando a aproximação de Boussinesq e condições estacionárias (sistema de referência movendo-se juntamente com a corrente de densidade), e pode-se obter:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + \alpha_0 \frac{\partial p'}{\partial x} = 0 \quad (\text{B.6})$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} u^2 + \alpha_0 p' \right) = 0 \quad (\text{B.7})$$

Integrando (B.7) de $-\infty$ a ∞

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} u^2 + \alpha_0 p'(x) \right) dx = 0 \quad (\text{B.8})$$

$$\frac{1}{2} u(x)^2 \Big|_{-\infty}^{\infty} - \alpha_0 p'(x) \Big|_{-\infty}^{\infty} \quad (\text{B.9})$$

$$\frac{1}{2} u(\infty)^2 - \frac{1}{2} u(-\infty)^2 + \alpha_0 p'(\infty) - \alpha_0 p'(-\infty) \quad (\text{B.10})$$

Em $x = \infty$, $u = -c$, sendo c a velocidade de avanço da corrente de densidade. Em

$x = -\infty, u = 0$. Usando também $\alpha_0 p'(-\infty)$ obtido em B.5, B.10 pode ser escrita como:

$$\frac{1}{2}c^2 - \alpha_0 p'(H) - gH \frac{\rho - \bar{\rho}}{\bar{\rho}} \quad (\text{B.11})$$

Resolvendo (B.11) para c :

$$c = \sqrt{2\alpha_0 p'(H) + 2gH \frac{\rho - \bar{\rho}}{\bar{\rho}}} \quad (\text{B.12})$$

No caso em que a perturbação no campo de pressão na superfície da corrente de densidade seja nula ou desprezível, de tal forma que $p'(H) = 0$, (B.12) pode ser simplificada como:

$$c = \sqrt{2gH \frac{\rho - \bar{\rho}}{\bar{\rho}}} \quad (\text{B.13})$$

A equação (B.13) é a velocidade da corrente de densidade e frequentemente é parametrizada da seguinte forma:

$$c = k \cdot \sqrt{gH \frac{\rho - \bar{\rho}}{\bar{\rho}}} \quad (\text{B.14})$$

Embora a equação (B.14) sugira que $k = \sqrt{2}$, em um fluido real, frequentemente, $p'(H) \neq 0$. Por isso k tende a se aproximar de 1, variando tipicamente entre 0,7 e 1,3 (MARKOWSKI; RICHARDSON, 2010).

Apêndice C – Perturbação no campo de pressão devido a variação vertical da flutuabilidade

Da equação do momento, adotando a aproximação de Boussinesq:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \nabla p' + B \hat{k} \quad (\text{C.1})$$

Multiplicando (C.1) por $\bar{\rho}$:

$$\bar{\rho} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \bar{\rho} \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} = -\nabla p' + \bar{\rho} B \hat{k} \quad (\text{C.2})$$

Sendo a densidade do estado básico constante, (C.2) pode ser escrita como:

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \vec{V})}{\partial t} + \bar{\rho} \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} = -\nabla p' + \bar{\rho} B \hat{k} \quad (\text{C.3})$$

Tomando o divergente tridimensional em (C.3) e rearranjando, obtém-se:

$$\frac{\partial(\nabla \cdot \bar{\rho} \vec{V})}{\partial t} = -\nabla^2 p' + \frac{\partial(\bar{\rho} B)}{\partial z} - \nabla \cdot (\bar{\rho} \vec{V} \cdot \nabla \vec{V}) \quad (\text{C.4})$$

A equação de conservação de massa na forma inelástica informa que a divergência de massa é igual a zero:

$$\nabla \cdot (\bar{\rho} \vec{V}) = 0 \quad (\text{C.5})$$

Usando (C.5) em (C.4), obtém-se:

$$\nabla^2 p' = \frac{\partial(\bar{\rho} B)}{\partial z} - \nabla \cdot (\bar{\rho} \vec{V} \cdot \nabla \vec{V}) \quad (\text{C.6})$$

De (C.6), observa-se que perturbação total de pressão é a soma de duas pressões parciais, uma devido à perturbações térmicas ($\frac{\partial(\bar{\rho} B)}{\partial z}$) e outra devido à perturbações dinâmicas ($-\nabla \cdot (\bar{\rho} \vec{V} \cdot \nabla \vec{V})$):

$$\nabla^2 p' = \nabla^2 p'_B + \nabla^2 p'_D \quad (\text{C.7})$$

, sendo $\nabla^2 p'_B$ e $\nabla^2 p'_D$ definidos como:

$$\nabla^2 p'_B \equiv \frac{\partial(\bar{\rho} B)}{\partial z} \quad (\text{C.8})$$

$$\nabla^2 p'_D \equiv -\nabla \cdot (\bar{\rho} \vec{V} \cdot \nabla \vec{V}) \quad (\text{C.9})$$

Avaliando apenas a componente devido à perturbações térmicas ($\nabla^2 p'_B$), pode-se ob-

servar a seguinte relação de proporcionalidade:

$$p'_B \propto -\frac{\partial(\bar{\rho}B)}{\partial z} \quad (\text{C.10})$$

, sendo p'_B a perturbação no campo de pressão induzida pela variação da flutuabilidade (B) e a densidade do estado básico ($\bar{\rho}$).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERGOT, T.; HELLO, G.; JOLY, A.; MALARDEL, S. Adaptive observations: A feasibility study. **Monthly Weather Review**, v. 127, n. 5, p. 743–765, 1999.

BLUESTEIN, H. B. Surface meteorological observations in severe thunderstorms. part ii: Field experiments with TOTO. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v. 22, p. 919–930, 1983.

_____. A history of severe-storm-intercept field programs. **Weather and forecasting**, v. 14, n. 4, p. 558–577, 1999.

BLUESTEIN, H. B.; WAKIMOTO, R. M. Mobile radar observations of severe convective storms. **American Meteorological Society Monograph**, R. M. Wakimoto e R. C. Srivastava (Editores), v. 30, n. 52, p. 105–136, 2003.

BROCK, F. V.; CRAWFORD, K. C.; ELLIOTT, R. L.; CUPERUS, G. W.; STADLER, S. J.; JOHNSON, H. L.; EILTS, M. D. The oklahoma mesonet: a technical overview. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 12, p. 5, 1995.

BROCK, F. V.; LESINS, G.; WALKO, R. Measurement of pressure and air temperature near severe thunderstorms: An inexpensive and portable instrument. In: **Extended Abstracts, Sixth Symp. on Meteorological Observations and Instrumentation, New Orleans, LA-USA, Amer. Meteor. Soc.** [S.l.: s.n.], 1987. p. 320–323.

BROOKS, H. E. Ingredients-based forecasting. **Atmospheric Convection: Research and Operational Forecasting Aspects**, D. B. Giaiotti, R. Steinacker, F. Stel (Eds.), SpringerWein, v. 475, p. 134–140, 2007.

BROOKS, H. E.; LEE, J. W.; CRAVEN, J. P. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data. **Atmospheric Research**, Elsevier, v. 67, p. 73–94, 2003.

CORFIDI, S. F. Cold pools and mcs propagation: Forecasting the motion of downwind-developing mcscs. **Weather and Forecasting**, v. 18, n. 6, p. 997–1017, 2003.

CUSTODIO, D. M.; MARQUERI, G.; ILHA, M. Interceptação de uma tempestade convectiva usando uma estação meteorológica portátil de superfície. **XVII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Gramado, RS, Brasil, p. em mídia digital, 2012.

DAVIES-JONES, R.; TRAPP, R. J.; BLUESTEIN, H. B. Tornadoes and tornadic storms. **Severe Convective Storms**, C. A. Doswell III (Editor), American Meteorological Society Monograph, v. 28, n. 50, p. 167–221, 2001.

DAWSON II, D. T.; XUE, M. Comparison of evaporation and cold pool development between single-moment and multimoment bulk microphysics schemes in idealized simulations of tornadic thunderstorms. **Monthly Weather Review**, American Meteorological Society, v. 138, p. 1152–1171, 2010.

DOSWELL, C. A. **Severe convective storms**. [S.l.]: American Meteorological Society, 2001. (Meteorological monographs). ISBN 9781878220417.

DOSWELL, C. A.; BROOKS, H. E.; MADDOX, R. A. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology. **Weather and Forecasting**, Boston, MA: American Meteorological Society, c1986-, v. 11, n. 4, p. 560–581, 1996.

ENGERER, N. A.; STENSRUD, D. J.; CONIGLIO, M. C. Surface characteristics of observed cold pools. **Monthly Weather Review**, v. 136, n. 12, p. 4839–4849, 2008.

FIEBRICH, C. A.; CRAWFORD, K. C. The impact of unique meteorological phenomena detected by the oklahoma mesonet and ars micronet on automated quality control. **Bulletin of the American Meteorological Society**, American Meteorological Society, v. 82, n. 10, p. 2173–2187, 2001.

FRANKLIN, J. L.; BLACK, M. L.; VALDE, K. Gps dropwindsonde wind profiles in hurricanes and their operational implications. **Weather and forecasting**, v. 18, n. 1, p. 32–44, 2003.

FUJITA, T. Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 38, p. 1511–1534, 1981.

GONÇALVES, J. E.; MAGGIOTTO, S. R.; DIAS, N. L. C.; MALHEIROS, A. L.; NASCIMENTO, E. L. Veículo aéreo não tripulado para perfilamento atmosférico em alta resolução. **XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Florianópolis, SC, Brasil, p. em mídia digital, 2006.

HAUF, T.; FINKE, U.; NEISSER, J.; BULL, G.; STANGENBERG, J. G. A ground-based network for atmospheric pressure fluctuations. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 13, p. 1001, 1996.

HOLLAND, G. J.; WEBSTER, P. J.; CURRY, J. A.; TYRELL, G.; GAUNTLETT, D.; BRETT, G.; BECKER, J.; HOAG, R.; VAGLIENTI, W. The aerosonde robotic aircraft: A new paradigm for environmental observations. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 82, n. 5, p. 889–902, 1998.

HOUZE, R. A. **Cloud dynamics**. [S.l.]: Academic Press, 1993. (International geophysics series). ISBN 9780123568816.

IBGE. **Estados@**: Rio Grande do Sul. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, 2002. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=rs>>. Acesso em: 07/2011.

JOHNSON, R.; HAMILTON, P. The relationship of surface pressure features to the precipitation and airflow structure of an intense midlatitude squall line. **Monthly Weather Review**, v. 116, n. 7, p. 1444–1473, 1988.

JOHNSON, R. H. Surface mesohighs and mesolows. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 82, p. 13–31, 2001.

KIDDER, S. Q.; VONDER HAAR, T. H. **Satellite meteorology: an introduction**. [S.l.]: Academic Press, 1995. (International Geophysics). ISBN 9780124064300.

LANGLAND, R. H.; TOTH, Z.; GELARO, R.; SZUNYOGH, I.; SHAPIRO, M. A.; MAJUMDAR, S. J.; MORSS, R. E.; ROHALY, G. D.; VELDEN, C.; BOND, N. et al. The north pacific experiment (norpex-98): Targeted observations for improved north american weather forecasts. **Bulletin of the American Meteorological Society**, American Meteorological Society, v. 80, n. 7, p. 1363–1384, 1999.

LANZA, L. G.; VUERICH, E. The wmo field intercomparison of rain intensity gauges. **Atmospheric Research**, v. 94, n. 4, p. 534 – 543, 2009.

LEE, J.; SAMARAS, T.; YOUNG, C. Pressure measurements at the ground in an f-4 tornado. In: **Proceedings of the 22nd Conference on Severe Local Storms**. [S.l.: s.n.], 2004.

LONGO, M.; SILVA DIAS, M. A. F.; MOREIRA, D. S. Análise das características termodinâmicas de frentes de rajada associadas a sistemas convectivos de mesoescala em rondônia durante a campanha wetamc/lba. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 17, n. 1, p. 103–112, 2002.

MAGGIOTTO, S. R.; DIAS, N. L.; VISSOTTO, S.; PREVEDELLO, C. L.; NASCIMENTO, E. L. Diretrizes para redes automáticas e telemétricas de superfície. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 4, p. 225–240, 2007.

MARKOWSKI, P.; RICHARDSON, Y. **Mesoscale Meteorology in Midlatitudes**. [S.l.]: Wiley-Blackwell, 2010. 407 p. (Advancing Weather and Climate Science). ISBN 9780470742136.

MARKOWSKI, P. M. Mobile mesonet observations on 3 may 1999. **Weather and forecasting**, v. 17, n. 3, p. 430–444, 2002.

MARKOWSKI, P. M.; STRAKA, J. M.; RASMUSSEN, E. N. Direct surface thermodynamic observations within the rear-flank downdrafts of nontornadic and tornadic supercells. **Monthly Weather Review**, American Meteorological Society, v. 130, p. 1692–1721, 2002.

NASCIMENTO, E. L.; CALVETTI, L. The detection of mesoscale features with an automated regional surface observing network in brazil. **Preprints, 8th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography**, Foz do Iguaçu, Brasil, American Meteorological Society, p. em mídia digital, 2006.

OLIVEIRA, E. M.; NASCIMENTO, E. L. Análise de um VCAN e de sua influência na formação de tempestades de granizo no sul do brasil em dezembro de 2011. **XVII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Gramado, RS, Brasil, p. em mídia digital, 2012.

ORLANSKI, I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 56, n. 5, p. 527–534, 1975.

RASMUSSEN, E. N.; DAVIES-JONES, R.; JR, C. A. D.; CARR, F. H.; EILTS, M. D.; MACGORMAN, D. R.; STRAKA, J. M. Verification of the origins of rotation in tornadoes experiment: Vortex. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 75, p. 995–1006, 1994.

REINHART, A. E.; WEISS, C. C.; DOWELL, D. C. Verification of supercell cold pools in high-resolution wrf simulations using sticknet insitu data. **Preprints, 25th Conference on Severe Local Storms**, p. paper 8A.5, 2010.

RINEHART, R. E. **Radar for meteorologists**. [S.l.]: Rinehart Pub, 1997. ISBN 9780965800204.

SCHROEDER, J. L.; BURGETT, W. S.; HAYNIE, K. B.; SONMEZ, I.; SKWIRA, G. D.; DOGGETT, A. L.; LIPE, J. W. The west texas mesonet: A technical overview. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 22, n. 2, p. 211–222, 2005.

SCHROEDER, J. L.; WEISS, C. C. Integrating research and education through measurement and analysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, American Meteorological Society, v. 89, n. 6, p. 793–798, 2008.

SCHWARTZ, C. S.; KAIN, J. S.; WEISS, S. J.; XUE, M.; BRIGHT, D. R.; KONG, F.; THOMAS, K. W.; LEVIT, J. J.; CONIGLIO, M. C. Next-day convection-allowing wrf model guidance: A second look at 2-km versus 4-km grid spacing. **Monthly Weather Review**, v. 137, n. 10, p. 3351–3372, 2009.

SILVA DIAS, M. A. F. Storms in brazil. **Hazards and Disasters Series, Storms**, R. Pielke Sr. e R. Pielke Jr (Eds), v. 2, p. 207–219, 1999.

SKINNER, P. S. Observations of the surface boundary structure within supercell thunderstorms. Texas Tech University, 2012.

SKINNER, P. S.; WEISS, C. C.; SCHROEDER, J. L.; WICKER, L. J.; BIGGERSTAFF, M. I. Observations of the surface boundary structure within the 23 may, 2007 perryton, texas supercell. **Monthly Weather Review**, 2011.

STENSRUD, D. J.; MANIKIN, G. S.; ROGERS, E.; MITCHELL, K. E. Importance of cold pools to ncep mesoscale eta model forecasts. **Weather and Forecasting**, v. 14, p. 650–670, 1999.

STRAKA, J. M.; RASMUSSEN, E. N.; FREDRICKSON, S. E. A mobile mesonet for finescale meteorological observations. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 13, p. 921, 1996.

VELASCO, I.; FRITSCH, J. M. Mesoscale convective complexes in the americas. **Journal of Geophysical Research**, American Geophysical Union, v. 92, n. D8, p. 9591–9613, 1987.

WAKIMOTO, R. M. The life cycle of thunderstorm gust fronts as viewed with doppler radar and rawinsonde data. **Monthly Weather Review**, v. 110, p. 1060–1082, 1982.

_____. **Convectively-driven high wind events**. In: **Severe Convective Storms**, C. A. Doswell III (organizador), American Meteorological Society, p. 255–298, 2001.

WEISS, C. C.; SCHROEDER, J. L. The 2007 and 2008 mobile experiment: Development and testing of the ttu sticknet platforms. In: **24th Conference on Severe Local Storms**. [S.l.: s.n.], 2008.

_____. Sticknet—a new portable, rapidly-deployable, surface observation system. In: **24th Conference on IIPS**. [S.l.: s.n.], 2008.

WILSON, J. W.; MUELLER, C. K. Nowcasts of thunderstorm initiation and evolution. **Weather and forecasting**, v. 8, n. 1, p. 113–131, 1993.

WINN, W.; HUNYADY, S.; AULICH, G. Pressure at the ground in a large tornado. **Journal of geophysical research**, American Geophysical Union, v. 104, n. D18, p. 22067–22, 1999.

WMO. **Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, WMO-8** . World Meteorological Organization, Geneva, 2006.