



Universidade de São Paulo  
Pós-Graduação em Meteorologia  
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas  
Departamento de Ciências Atmosféricas

Aluno: **Fabício Daniel dos Santos Silva**

Orientador: **Dr. Augusto José Pereira Filho**

**Análise Objetiva Estatística da Precipitação Estimada com Radar e  
medida por uma Rede Telemétrica**

São Paulo

2006

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

FABRÍCIO DANIEL DOS SANTOS SILVA

**Análise Objetiva Estatística da Precipitação Estimada com Radar e  
medida por uma Rede Telemétrica**

Dissertação desenvolvida como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Meteorologia junto ao Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Augusto José Pereira Filho

São Paulo

2006

## DEDICATÓRIA

A toda minha família que acreditou e confiou em mim, em especial a minha irmã  
Maria Goretti, pelo esforço em sempre investir em meus estudos.

## **AGRADECIMENTOS**

- Ao meu orientador, professor Augusto José Pereira Filho, por toda a paciência, ajuda e amizade.
- A CAPES, pela bolsa de estudos a mim concedida.
- Aos novos amigos que pude fazer e conviver por todo o tempo de mestrado, Anderson, Jonatan, Guilherme, Fabiana e tantos outros.
- Ao meu grande amigo Rinaldo.
- Um agradecimento especial a Ricardo Hallak, pela amizade e pela sempre presente ajuda em muitas das etapas de desenvolvimento do trabalho.

## RESUMO

O objetivo deste estudo foi a integração de dados de precipitação obtidos pela rede telemétrica da Bacia do Alto Tiete (BAT) e pelas estimativas de precipitação do Radar Meteorológico de São Paulo (RSP), por meio de uma Análise Objetiva Estatística (ANOBES). Para isto, campos de precipitação do RSP foram analisados e cinco tipos de sistemas precipitantes foram identificados, convecção isolada (CI), brisa marinha (BM), linhas de instabilidade (LI), bandas dispersas (BD) e frentes frias (FF). Posteriormente, uma comparação pontual entre precipitação medida pela telemetria e estimada com o radar foi realizada e, mostrou haver, na maioria dos casos, um viés positivo do RSP. Em seguida, obteve-se a estrutura espacial da correlação do erro dos campos de precipitação do RSP. Há diferenças significativas entre as correlações do erro espacial dos diferentes tipos de sistemas precipitantes. Essas foram utilizadas no esquema da ANOBES. Devido a baixa densidade da rede telemétrica na BAT, apenas três áreas com densidade maior de pluviômetros foram selecionadas para aplicação da ANOBES, para três eventos de cada tipo de sistema. A ANOBES reduziu eficientemente as diferenças dos campos de chuva do RSP em relação à rede telemétrica, principalmente para eventos de CI, FF e BD. A ANOBES foi limitada nos casos de BM e LI por apresentarem baixa correlação espacial.

## ABSTRACT

The objective of this study was to integrate precipitation measurements from the Alto Tietê Basin (BAT) raingauge telemetric network and respective estimates of the São Paulo Weather Radar (RSP) through a statistical objective analysis scheme (ANOBES). Thus, precipitation fields of the RSP were analyzed and divided into five precipitation types, namely, isolated convection (CI), sea breeze (BM), squall line (LI), disperse bands (BD) and cold fronts (FF). Later, point measurements and estimates of precipitation were compared and the results indicate a positive bias towards RSP rainfall estimates. Afterwards, RSP precipitation estimates were used to obtain the isotropic background error correlation field of each precipitation type described above. Significantly different background correlation fields were obtained for each precipitation type. They were used to integrate radar and raingauge fields through ANOBES. Since the raingauge telemetric network is sparse, the analysis concentrated over three sub-areas with better raingauge density. Three events of each precipitation types were used to evaluate the performance of the ANOBES. It efficiently reduced differences in the precipitation fields between the RSP and the raingauge telemetric network for CI, FF and BD rainfall types. Limited results were obtained for BM and LI ones since they have lower background correlation fields.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 Esquema de transmissão e recepção de energia por uma gota. O pulso é transmitido à velocidade da luz,  $c$ . Decorrido um tempo  $t$  entre a emissão e recepção do sinal, a distancia até a gota é expressa em  $d=ct/2$ .....08
- Figura 2.2 Esquema do volume iluminado pelo feixe do radar com volume  $V$  .....09
- Figura 2.3 Esquema de varredura do radar meteorológico para uma dada elevação  $\phi$  em relação ao horizonte .....12
- Figura 2.4 Ilustração de um PPI (a) e um CAPPI (b).....12
- Figura 2.5 Esquema da operação do Sistema de Alerta às Inundações de São Paulo (SAISP).Fonte:FCTH.....14
- Figura 2.6 (a) Área de cobertura do radar meteorológico de São Paulo (Raio de 240 km) com destaques para a Bacia do Alto Tietê (BAT) e a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), e (b) rede telemétrica na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), (PereiraFilho, 2004).....15
- Figura 2.7 Localização dos postos tele-pluviométricos na coordenada do Radar Meteorológico de São Paulo (RSP).Coordenadas horizontais estão no sentido oeste-leste e verticais no sentido norte-sul. O quadriculado representa pixels de 2 km x 2 km.....17
- Figura 2.8 Número total de mapas de taxa de chuva disponíveis para análise, para cada mês.....19



Figura 2.9 Mapa de taxa de precipitação obtido com o RSP entre 14:30 HL e 16:00 HL em 06/02/1999 que ilustra um evento de convecção isolada. Contornos geográficos, latitudes e longitudes estão indicados. Escala de cores indicam intensidades ( $\text{mmh}^{-1}$ ) .....	20
Figura 2.10 Similar a Fig 2.9, exceto para Brisa Marítima.....	21
Figura 2.11 Similar a Fig 2.9, exceto para Linha de Instabilidade.....	21
Figura 2.12. Similar a Fig 2.12, exceto para Bandas Dispersas.....	22
Figura 2.13. Similar a Fig 2.9, exceto para Frentes Frias.....	22
Figura 3.1 Campos de taxa de precipitação obtidos com o radar meteorológico de São Paulo. <b>(a)</b> convecção isolada e <b>(b)</b> convecção devido à brisa marítima. Horários (UTC) e datas indicados. Escala de cores indica de intensidade de precipitação ( $\text{mm h}^{-1}$ ).....	35
Figura 3.2 Análogo à Figura 3.1, exceto para <b>(a)</b> linha de instabilidade na retaguarda de um sistema frontal e, <b>(b)</b> linha de instabilidade isolada.....	35
Figura 3.3 Análogo à Figura 3.1, exceto para um episódio de ZCAS com <b>(a)</b> bandas dispersas com convecção e, <b>(b)</b> , estratiforme.....	36
Figura 3.4 Análogo à Figura 3.1, exceto para duas frentes frias <b>(a)</b> com precipitação estratiforme e, <b>(b)</b> , convectiva.....	36
Figura 3.5 Frequências mensais de eventos convectivos e estratiformes.....	38
Figura 3.6 Frequências mensais dos diferentes tipos de sistemas de precipitação .....	39

Figura 3.7 Coeficientes de correlação espacial médios estimados de acumulações de precipitação com o radar meteorológico de São Paulo para píxeis de 2km × 2 km, para o caso de Convecção Isolada. Os intervalos de tempo das acumulações são indicados, bem como a curva polinomial que melhor ajusta os dados.....	47
Figura 3.8 Idêntica à figura 3.7, mas para os casos de Brisa Marítima .....	47
Figura 3.9 Idêntica à figura 3.7, mas para os casos de Linhas de Instabilidade.....	48
Figura 3.10 Idêntica à figura 3.7, mas para os casos de Bandas Dispersas.....	48
Figura 3.11 Idêntica à figura 3.7, mas para os casos de Fretes Frias.....	49
Figura 3.12 Áreas da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê onde será avaliada a integração de dados da ANOBES.....	54
Figura 3.13 Distribuição da precipitação média horária medida pelos pluviômetros, estimadas pelo radar e corrigida pela ANOBES, para o dia 16/02/2000, para o intervalo de 60 minutos de acumulação.....	56
Figura 3.14 Campos de precipitação acumulada em 60 minutos no dia 16/02/2000 estimada com o <b>(1)</b> Radar – coluna da esquerda; <b>(2)</b> ANOBES – coluna do meio e <b>(3)</b> campo diferença entre ANOBES e Radar – coluna da direita. Retângulos azul, vermelho e cinza indicam as áreas de maior densidade de postos pluviométricos.....	56
Figura 3.15 Idem a Figura 3.13, mas para 120 minutos de acumulação.....	58
Figura 3.16 Idem a Figura 3.14, mas para intervalos de acumulação de 120 minutos, entre as 20:00 e as 24:00 horas.....	59

Figura 3.17. Similar a Figura 3.13, exceto para 25/11/2000.....	60
Figura 3.18. Similar à Figura 3.14, exceto para 25/11/2000.....	61
Figura 3.19. Similar a Figura 3.18, mas para 120 minutos de acumulação.....	62
Figura 3.20 Idem a Figura 3.18, mas para 120 minutos de acumulação nos horários indicados.....	62
Figura 3.21 Similar a Figura 3.17, exceto para 26/01/2000.....	63
Figura 3.22 Similar a Figura 3.14, exceto para 26/01/2000.....	64
Figura 3.23 Similar a Fig 3.13, exceto para 08/01/2000.....	66
Figura 3.24 Similar à Figura 3.14, exceto para 08/01/2000.....	67
Figura 3.25 Similar a Figura 3.13, exceto para 05/12/1999.....	68
Figura 3.26 Similar a Figura 3.14, exceto para 05/12/1999.....	69
Figura 3.27 Similar a Figura 3.13, exceto para 09/03/1999.....	70
Figura 3.28 Similar a Figura 3.14, exceto para 09/03/1999.....	70
Figura 3.29 Similar a Figura 3.13, exceto para 09/02/1999.....	72
Figura 3.30 Similar a Figura 3.14, exceto para 09/02/1999.....	72
Figura 3.31 Similar a Figura 3.13, exceto para 14/01/2000.....	73
Figura 3.32 Similar a Figura 3.14, exceto para 14/01/2000.....	73
Figura 3.33 Similar a Figura 3.13, exceto para 26/02/1999.....	74

Figura 3.34 Similar a Figura 3.14, exceto para 26/02/1999.....	74
Figura 3.35 Similar a Figura 3.13, exceto para 02, 03 e 04/01/2000.....	76
Figura 3.36 Similar a Figura 3.14, exceto para 02/01/2000.....	78
Figura 3.37 Similar a Figura 3.14, exceto para 03/01/2000.....	78
Figura 3.38 Similar a Figura 3.14, exceto para 03/01/2000.....	79
Figura 3.39 Similar a Figura 3.14, exceto para 04/01/2000.....	79
Figura 3.40 Similar a Figura 3.13, exceto para 15/07/2000.....	81
Figura 3.41 Similar a Figura 3.14, exceto para 15/07/2000.....	81
Figura 3.42 Similar a Figura 3.13, exceto para 01/09/2000.....	83
Figura 3.43 Similar a Figura 3.14, exceto para 01/09/2000.....	83
Figura 3.44 Similar a Figura 3.13, exceto para 06/05/1999.....	85
Figura 3.45 Similar a Figura 3.14, exceto para 06/05/1999.....	85
Figura 3.46 Gráficos de regressão linear para a precipitação média obtida pela ANOBES e radar, para os casos de CI, BM, LI, BD e FF para 60 minutos de acumulação. As linhas tracejadas referem-se a regressão linear para cada sistema e a contínua seria o ajuste ideal.....	88
Figura 3.47 Análoga a Fig 3.46, exceto para 120 minutos de acumulação.....	89

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Relações Z-R encontradas na literatura.....	11
Tabela 2.2 Localização dos Postos Pluviométricos da rede telemétrica do Alto Tietê, em ordem, do posto 01 ao posto 27. Estão indicados da esquerda para a direita: o código do posto, longitude (m) e latitude (m), longitude e latitude (°) e coordenadas do valor do pixel na matrix (240 x 240).....	16
Tabela 3.1. Comparações entre as precipitações médias estimadas pela rede telemétrica do Alto Tietê e estimadas pelo radar meteorológico de São Paulo, para casos de CI. N é o número de estações usadas para comparação com o radar. $\Sigma Pt$ e $\Sigma Pr$ são as precipitações médias da telemetria e do radar, o viés entre os dados e os respectivos coeficientes de correlações para os intervalos de acumulação citados.....	41
Tabela 3.2 Análoga a Tabela 3.1, exceto para casos de BM.....	42
Tabela 3.3 Análoga a Tabela 3.1, exceto para casos de LI.....	42
Tabela 3.4 Análoga a Tabela 3.1, exceto para casos de BD.....	42
Tabela 3.5 Análoga a Tabela 3.1, exceto para casos de FF.....	43
Tabela 3.6 Análogo à Tab 3.1, exceto para a média de cada um dos cinco sistemas analisados.....	43
Tabela 3.7 Séries de dados do radar meteorológico de São Paulo usados para a obtenção das correlações espaciais dos sistemas. São mostradas as datas dos eventos, classificação quanto ao tipo de precipitação e ao tipo de sistema. Os números em azul indicam o total de eventos usados para cada tipo de sistema.....	45

Tabela 3.8 Coeficientes dos Polinômios das Curvas de melhor ajuste das Correlações Espaciais para sistemas do tipo Convecção Isolada.....	52
Tabela 3.9 Análoga à Tabela 3.8, exceto para Brisa Marítima.....	52
Tabela 3.10 Análoga à Tabela 3.8, exceto para Linhas de Instabilidade.....	52
Tabela 3.11 Análoga à Tabela 3.8, exceto para Frentes Frias.....	52
Tabela 3.12 Análoga à Tabela 3.8, exceto para Bandas Dispersas.....	53
Tabela 3.13 Valores de precipitação associados aos sistemas de CI, para 60 minutos de acumulação.....	86
Tabela 3.14 Análogo a Tabela 3.13, exceto para BM.....	86
Tabela 3.15 Análogo a Tabela 3.13, exceto para LI.....	87
Tabela 3.16 Análogo a Tabela 3.13, exceto para BD.....	87
Tabela 3.17 Análogo a Tabela 3.13, exceto para FF.....	87

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo.....	6
<b>2 MATERIAIS E METODOS .....</b>	<b>8</b>
2.1 O Radar Meteorológico .....	8
2.1.1 Mapas de Precipitação .....	11
2.2 Radar Meteorológico de São Paulo (RSP) .....	13
2.3 Rede Telemétrica do Alto Tietê.....	14
2.4 Classificação de Sistemas Meteorológicos na área de cobertura do Radar Meteorológico de São Paulo.....	18
2.5 Comparação entre a precipitação estimada do RSP e medida pela Rede Telemétrica do Alto Tietê.....	23
2.6 Análise Objetiva Estatística (ANOBES).....	24
2.6.1 O Esquema da ANOBES.....	25
2.6.2 Funções de Correlações Espaciais.....	29
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>32</b>
3.1 Características e descrição dos sistemas precipitantes observados.....	32
3.2 Comparações entre as precipitações estimadas pelo Radar meteorológico de São Paulo e medidas pela Rede Telemétrica do Alto Tietê.....	40
3.3 Correlações Espaciais derivadas da precipitação estimada com o Radar meteorológico de São Paulo .....	44
3.4 Aplicações da ANOBES.....	53
3.4.1 Casos de Convecção Isolada.....	55
3.4.2 Casos de Brisa Marítima .....	66
3.4.3 Casos de Linhas de Instabilidade .....	71
3.4.4 Casos de Bandas Dispersas. ....	75
3.4.5 Casos de Frentes Frias.....	80
3.5 Correlação temporal entre ANOBES, telemetria e radar para os casos estudados.....	82
<b>4 CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>91</b>
<b>5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>95</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O mais importante componente do ciclo hidrológico associado a áreas continentais é a precipitação (Ahrens, 2003). A precipitação que cai em determinada bacia hidrográfica é escoada superficialmente, infiltrada, evapotranspirada e armazenada no solo, componentes estes básicos para o balanço de água superficial.

Há uma grande preocupação com os efeitos da precipitação em áreas metropolitanas. Normalmente, a urbanização altera a cobertura e ocupação do solo, o que afeta, por sua vez, os processos naturais de escoamento da precipitação, e pode resultar em enchentes que afetam milhares de pessoas (Pereira Filho, 1998). Essa ocupação da superfície muda às características das circulações atmosféricas locais devido ao aumento de temperatura e ilhas de calor urbanas (Freitas e Silva Dias, 2005; Pereira Filho, 1999). Essas ilhas induzem precipitação de origem convectiva que tende a cair sobre as regiões mais ocupadas pelo homem como é o caso da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), o que prejudica a captação de água para os reservatórios de abastecimento (Pereira Filho et al., 2004).

A Região Metropolitana de São Paulo se insere na bacia hidrográfica do Alto Tietê, com uma área de 5.985 km<sup>2</sup> e abrange 39 municípios. A bacia ocupa apenas 2,7% do território paulista e concentra quase 50% da população do Estado. Em 2001, a população da RMSP era de aproximadamente 17,5 milhões de pessoas, 60% desta no município de São Paulo.

Em virtude das recorrentes enchentes na RMSP, estabeleceu-se em 1976 uma rede telemétrica com pluviômetros e limnígrafos (Braga e Barros, 1992). Embora tal rede tenha uma grande utilidade na obtenção de dados para análise e



previsão de precipitações, esta abrange pequenas regiões comparadas à própria RMSP. Assim, para melhorar o monitoramento da região foi instalado em 1998 um radar meteorológico em Ponte Nova (Pisani, 1995), o que permitiu uma melhoria na resolução espaço-temporal das estimativas da chuva e previsão de enchentes (Pereira Filho, 1988).

A medida de chuva por meio de pluviômetros e estimativa por radar meteorológico podem diferir significativamente (Pereira Filho, 2001). A falta de representatividade espacial e os erros devidos à exposição dos pluviômetros são as principais fontes de erro (Brock, 2001). Por outro lado, a estimativa de chuva pelo radar meteorológico é afetada pelo espectro de gotas de chuva, por granizo, banda brilhante, propagação anômala, ecos de terreno, correntes descendentes, evaporação, entre outras (Austin, 1987). Desta forma, faz-se necessário o uso de uma técnica eficaz de integração de dados de radar e pluviômetros para melhor quantificar o volume de chuva.

O radar meteorológico monitora a precipitação em um raio de alcance superior a 120 km, com resolução espaço-temporal equivalente a uma rede telemétrica com cerca de 1 pluviômetro a cada 2 km x 2 km.

O radar meteorológico banda-S do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), instalado junto ao reservatório de Ponte Nova e operado pelo Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH) é utilizado no monitoramento dos sistemas precipitantes no Leste do Estado de São Paulo. Este monitoramento é de fundamental importância para a RMSP que sofre com freqüentes inundações do Rio Tietê, que corta a região. Em geral, as enchentes ocorrem entre setembro a março (Pereira Filho 2005).

A maioria dos eventos de enchentes está associada a chuvas induzidas pela ilha de calor e a circulação da brisa marítima (Pereira Filho 1999). Há ainda os eventos devido à orografia (Blanco e Massambani 1997), sistemas convectivos de mesoescala (Silva Dias 1989), sistemas frontais (Satyamurty et al. 1990) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul – ZCAS (Rocha e Gandú 1996). Fenômenos de grande escala tais como episódios de El Niño (Gan e Rao 1991) e La Niña modulam também os regimes de precipitação na região.

Muitas ações têm sido tomadas para minimizar os efeitos das enchentes na bacia do Alto Tietê, tanto estruturais (aprofundamento do leito do rio, desassoreamento, construção de barragens e canalização), quanto o monitoramento remoto das chuvas por meio do radar meteorológico e redes telemétricas. Após as fortes chuvas ocorridas em janeiro de 1976 na RMSF, que colocaram em risco a segurança do reservatório de Guarapiranga, localizado na cabeceira do rio Pinheiros, iniciou-se a implantação de uma rede piloto de 5 postos telemétricos que, gradativamente, foi expandida até 28 postos (13 fluviométricos e 15 pluviométricos), distribuídos na bacia do rio Tietê a montante do rio Pinheiros (Pisani, 1995).

Vários estudos foram realizados para comparar a precipitação estimada por radar e redes de superfície (Zawadski 1973), sob diferentes tipos de situação sinótica e revelaram haver diferentes desvios e vieses que dependem, muitas vezes, do tipo de precipitação convectiva ou estratiforme (Smith et al, 1996).

Austin (1987) estudou vários fatores físicos que resultam em erros na estimativa de precipitação com o radar meteorológico e concluiu que para cada tipo de situação sinótica deve haver uma equação de transformação da refletividade medida ( $Z$ ) em taxa de precipitação ( $R$ ).

Steiner et al (1995) desenvolveram uma metodologia para obter o tipo de precipitação (convectivo e estratiforme). Com relação ao radar, os algoritmos separam as regiões de ecos convectivos dos estratiformes, resumindo estatisticamente a estrutura vertical dos ecos e determina as taxas de precipitação com alta resolução espacial.

Joss e Lee (1995) analisaram oito anos de dados de dois radares meteorológicos e uma rede telemétrica para quantificar o perfil vertical de refletividade e as influências da topografia e de parâmetros do radar na estimação da precipitação. A influência da topografia em torno do radar, da largura do feixe do radar e da estrutura vertical dos ecos produzem uma distribuição complexa de erros no espaço e no tempo, com erros dependentes do tipo da tempestade e da distância do radar. Os autores mostram como os erros relativos à ecos de terreno podem ser reduzidos ao se escolher adequadamente uma posição ótima em terra para a instalação do radar. Por fim propuseram um modelo físico capaz de corrigir boa parte dos erros, incluindo efeitos da banda brilhante. Os resultados das análises se mostraram bastantes satisfatórios para a região dos Alpes suíços.

Wilson e Schreiber (1986) estudaram a origem de tempestades convectivas a leste das montanhas rochosas do Colorado e observaram que o principal efeito indutor na formação destas linhas de convergência era o aquecimento superficial e a topografia. A utilização do radar meteorológico para a observação de linhas de instabilidade em formação se mostrou imprescindível para previsões com até 2 horas de antecedência.

Pereira Filho e Nakayama (2001) compararam as precipitações acumuladas estimadas com o radar meteorológico de São Paulo e medidas com uma rede de pluviômetros dentro da área de cobertura do radar durante as estações chuvosas de

1998, 1999 e 2000, e observaram que a precipitação derivada do radar tende a apresentar mais erros em chuvas estratiformes devido a superestimar precipitações acumuladas abaixo de 25 milímetros e a subestimar precipitações mais altas que este valor.

Grassoti et al (2003) compararam a precipitação medida por uma rede de pluviômetros com as estimativas de radar meteorológico e a obtida da integração de ambos. Compararam-se as acumulações de horas, dias e meses, para a área da bacia do Rio Vermelho e do Rio Illinois. Os dados integrados se mostraram melhor correlacionados com a rede telemétrica devido a remoção do viés em relação ao radar que superestimava a precipitação.

Wilson e Brandes (1998), compararam a precipitação estimada pelos radares WSR-88D (Crum e Alberty 1993; Klazura e Imy 1993) e S-Pol (Keeler et al 2000) com a medida por uma rede de pluviômetros para tempestades ocorridas no Colorado e Kansas, Estados Unidos. Foram obtidas altas correlações entre a chuva estimada com os radares e a medida com a rede de estações de superfície. Os dois radares apresentaram estimativas de precipitação com coeficientes de variação entre 0.77 e 0.96.

Apesar dos erros de medição do radar e dos pluviômetros não serem conhecidos, as estimativas de chuva com o radar meteorológico e as medições de chuva com a rede de superfície podem ser combinadas para diminuir erros (Pereira Filho e Crawford 1995). Para isso, técnicas de análise objetiva têm sido propostas para caracterizar padrões de chuva e para avaliar a média da chuva sobre uma bacia. Algumas são mais simples, outras mais complexas. A análise objetiva estatística desenvolvida por Gandin (1965) é indicada como uma boa técnica de interpolação para campos meteorológicos e é reconhecida pela Organização

Meteorológica Mundial (OMM). Esta metodologia foi aplicada com êxito para analisar campos de precipitações totais (Creutin e Obled, 1982; Bhargava e Danard, 1993).

A técnica da análise objetiva estatística foi utilizada por Pereira Filho e Crawford (1995) para acumulações de precipitação entre 15 minutos e 2 horas, de modo a reduzir erros observacionais e assim melhorar os resultados de previsões hidrológicas. Eles utilizaram uma estrutura de covariância do erro isotrópica para uma rede de medição de precipitação de alta densidade em latitudes médias, onde a componente anisotrópica da covariância do erro pode ser negligenciada, embora os sistemas de precipitação geralmente não sejam circulares e provavelmente tem uma estrutura anisotrópica. Thiébaux (1976) mostra que a anisotropia da função de covariância constitui uma significativa fonte de erros nos esquemas de interpolação em locais com poucos dados ou configurações irregulares de estações.

## **1.1 Objetivo**

Este estudo tem por objetivo avaliar as medidas de chuva da rede telemétrica e a estimada com o radar meteorológico de São Paulo, em função da taxa de precipitação, convectiva e estratiforme, e do tipo de sistema meteorológico: convecção isolada, precipitação associada a brisa marítima, linhas de instabilidade, bandas dispersas de precipitação e frentes frias.

Além disso, este estudo visa integrar os dados de precipitação do radar meteorológico de São Paulo e da rede telemétrica do Alto Tietê, de modo a melhorar as estimativas dos campos de precipitação para cada um dos cinco tipos de sistemas meteorológicos. Utiliza-se a análise objetiva estatística (Pereira Filho e Crawford 1995) para acumulações de precipitação de 15, 30, 60 e 120 minutos.

Pereira Filho e Crawford (1995) mostraram que as estimativas de chuva com o radar meteorológico e as medições de chuva com uma rede de superfície podem ser combinadas para diminuir o erro da estimativa de chuva.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 O Radar Meteorológico

Radar é um sistema eletromagnético para detecção e localização de objetos. O princípio de funcionamento do radar meteorológico consiste em emitir através de uma antena um pulso de energia eletromagnética de duração da ordem de  $\mu\text{s}$  e de comprimento de onda  $\lambda$  (cm). Geram pulsos de onda eletromagnética altamente energética para alcance a longas distâncias. Estes sinais viajam a velocidade da luz. Quando esta energia é interceptada por um alvo pequeno (por exemplo, uma gota de chuva) se dispersa em todas as direções (Figura 2.1), de forma que uma fração retorna na direção do pulso emitido pelo radar e captado por um refletor, normalmente localizado na mesma antena. A distancia deste obstáculo é determinada do tempo transcorrido entre a emissão e recepção do pulso.

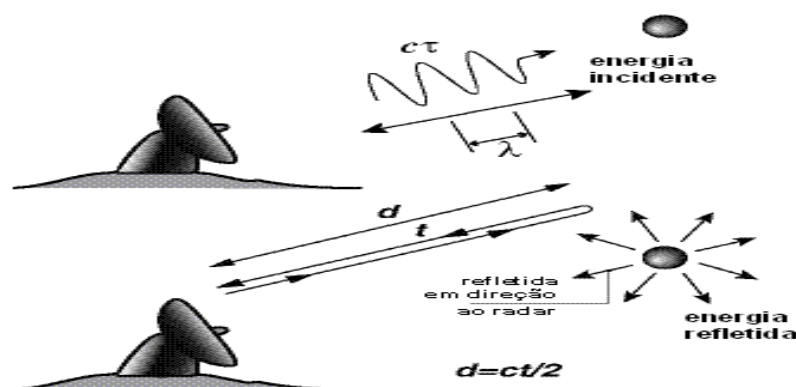


Figura 2.1 Esquema de transmissão e recepção de energia por uma gota. O pulso é transmitido à velocidade da luz,  $c$ . Decorrido um tempo  $t$  entre a emissão e recepção do sinal, a distancia até a gota é expressa em  $d = ct/2$ .

O radar mede a energia retroespalhada em sua direção pelas gotas de água situadas no interior de certo volume  $V$ , determinada pela metade da duração do pulso (Figura 2.2).

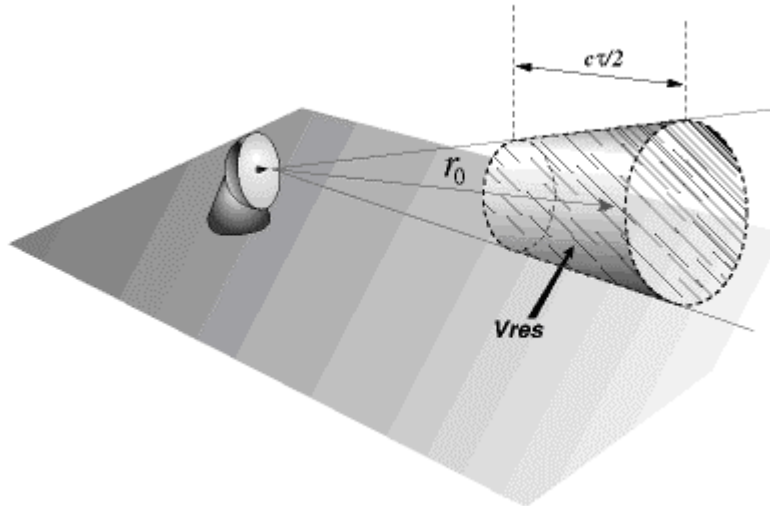


Figura 2.2 Esquema do volume iluminado pelo feixe do radar com volume  $V$ .

A energia medida pode ser expressa como:

$$\bar{P}(r_0) = \frac{C}{L^2(r_0)r_0^2} Z(r_0) \quad (1)$$

Onde  $P$  é a potência média retroespalhada pelas gotas situadas no interior do volume  $V$  a uma distância  $r_0$  do radar. A potência média resulta de  $n$  pulsos, tal que o sinal recebido seja estável;  $C$  é denominada constante do radar que agrupa uma série de características do radar, tais como o comprimento de onda, forma e largura do feixe, comprimento do pulso, potência transmitida, ganho da antena, entre outros;  $Z$  é a refletividade das gotas no volume  $V$  iluminado pelo radar.

A refletividade  $Z$  é definida como a integral dos diâmetros das gotas no interior de um volume elevadas a sexta potência:



$$Z = \int_0^{\infty} N(D) D^6 dD \quad (2)$$

onde  $N(D)$  é o número de gotas de diâmetro  $D$ .

A intensidade de chuva ( $R$ ) pode ser expressa como o fluxo de água através de uma superfície, e pode ser obtida como:

$$R = \frac{\pi}{6} \int_0^{\infty} V(D) N(D) D^3 dD \quad (3)$$

Das equações (2) e (3) pode ser obtida uma relação de transformação da taxa de precipitação (em  $\text{mm h}^{-1}$ ) em refletividade ( $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ ):

$$Z = aR^b \quad (4)$$

Em geral, os parâmetros  $a$  e  $b$  variam significativamente.

Os métodos comumente utilizados para obter-se esses dois parâmetros são:

- a) comparação de dados de chuva de postos pluviométricos com os do radar.
- b) medição direta do diâmetro das gotas de chuva por meio de um disdrômetro (Doelling et al 1998).

Há um grande número de relações  $ZR$  experimentais. Estas relações variam de acordo com o tipo de chuva e localização geográfica. A Tabela 2.1 apresenta algumas delas.

Tabela 2.1 relações Z-R encontradas na literatura.

$Z = a \times R^b$	a	b	validade
Marshall & Palmer (1948)	200	1,6	Precipitações homogêneas e eventos estratiformes
Jones (1956)	486	1,37	Precipitações convectivas
Sekhon & Srivastava (1970)	1,78	2,21	Neve
WSR-88D	300	1,4	Convecção profunda de verão
Rosenfeld	250	1,2	Sistemas convectivos tropicais

A primeira relação Z-R foi obtida por Marshall & Palmer (1948), para sistemas estratiformes de latitudes médias.

### 2.1.1 Mapas de precipitação

Mapas horizontais de precipitação são obtidos da refletividade do radar ou da taxa de chuva estimada a partir desta em um determinado elemento de área (denominado de pixel).

O radar meteorológico executa um movimento de rotação e elevação de modo a varrer a troposfera em azimute e elevação, respectivamente (Fig 2.3).

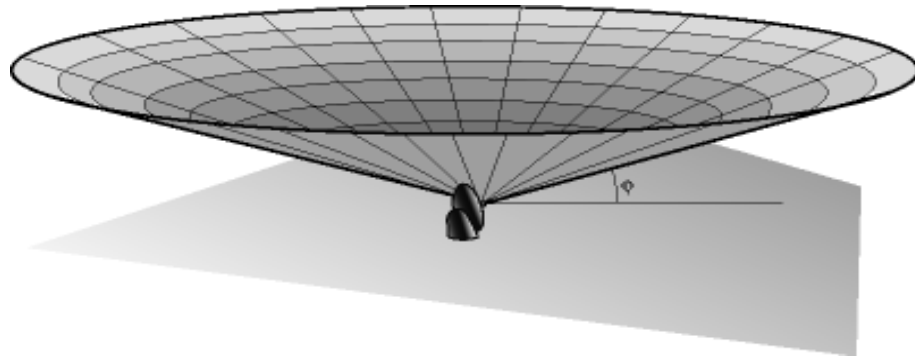


Figura 2.3 Esquema de varredura do radar meteorológico para uma dada elevação  $\phi$  em relação ao horizonte.

Estas medições de refletividade em coordenadas esféricas é processada para gerar mapas horizontais de chuva:

**a)** PPI, Plan Position Indicator, correspondente a refletividade numa da elevação projetada num plano horizontal (Fig 2.4a).

**b)** CAPPI, Constant Altitude Plan Position Indicator, a refletividade num plano a uma altitude constante é obtida por meio de segmentos de diversas elevações mais próximas da altitude de interpolação (Fig 2.4b).

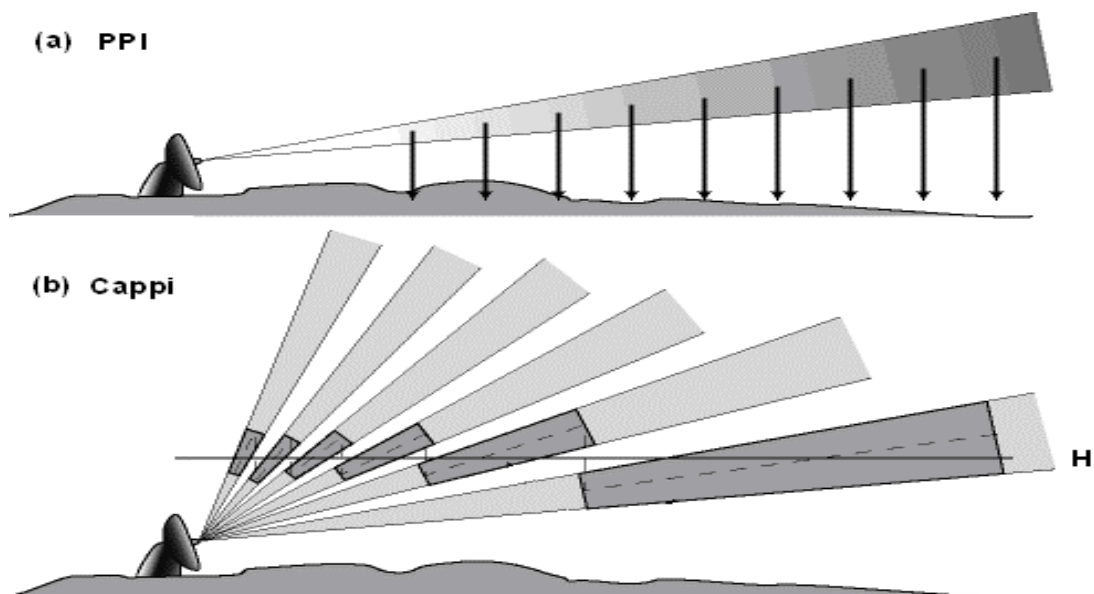


Figura 2.4 Ilustração de um PPI (a) e CAPPI (b).

## 2.2 Radar Meteorológico de São Paulo

O Radar Meteorológico de São Paulo (RSP) opera com comprimento de onda de 10 cm, o que o classifica como um radar banda S e fornece entre outros produtos mapas de taxa de precipitação a cada 5 minutos, com resolução espacial de 2 km × 2 km. O radar meteorológico de São Paulo cobre uma área circular de 240 km e abrange boa parte do litoral paulista, sul de Minas Gerais, Vale do Paraíba e sul do Rio de Janeiro (Fig 2.6a).

O RSP está instalado nas seguintes coordenadas:

latitude: (23° 36' 00" S); x = 400,80 km

longitude: (45° 58' 20" W); y = 7.389,70 km

altitude: z = 916 metros (DATUM IGG)

O RSP é formado por vários componentes, tais como: antena (refletor), redoma, pedestal, transmissor, receptor, vídeo digitalizador e sistema processador Pisani (1995). O RSP permite monitorar a evolução espaço-temporal da chuva sobre as bacias hidrográficas da região leste do Estado de São Paulo. Trata-se de uma importante ferramenta destinada a previsão de chuva a curtíssimo prazo para a previsão hidrológica até 3 horas a frente.

O RSP envia seus dados para um microcomputador na central de operação no CTH na Cidade Universitária em São Paulo. Este sistema está interligado com as diversas redes telemétricas do DAEE (Alto Tietê- Pinheiros). Os dados do RSP e da

rede telemétrica são distribuídos para a prefeitura de São Paulo (Fig 2.5), para a ELETROPAULO, para o DAEE e para a imprensa (Pisani, 1995).

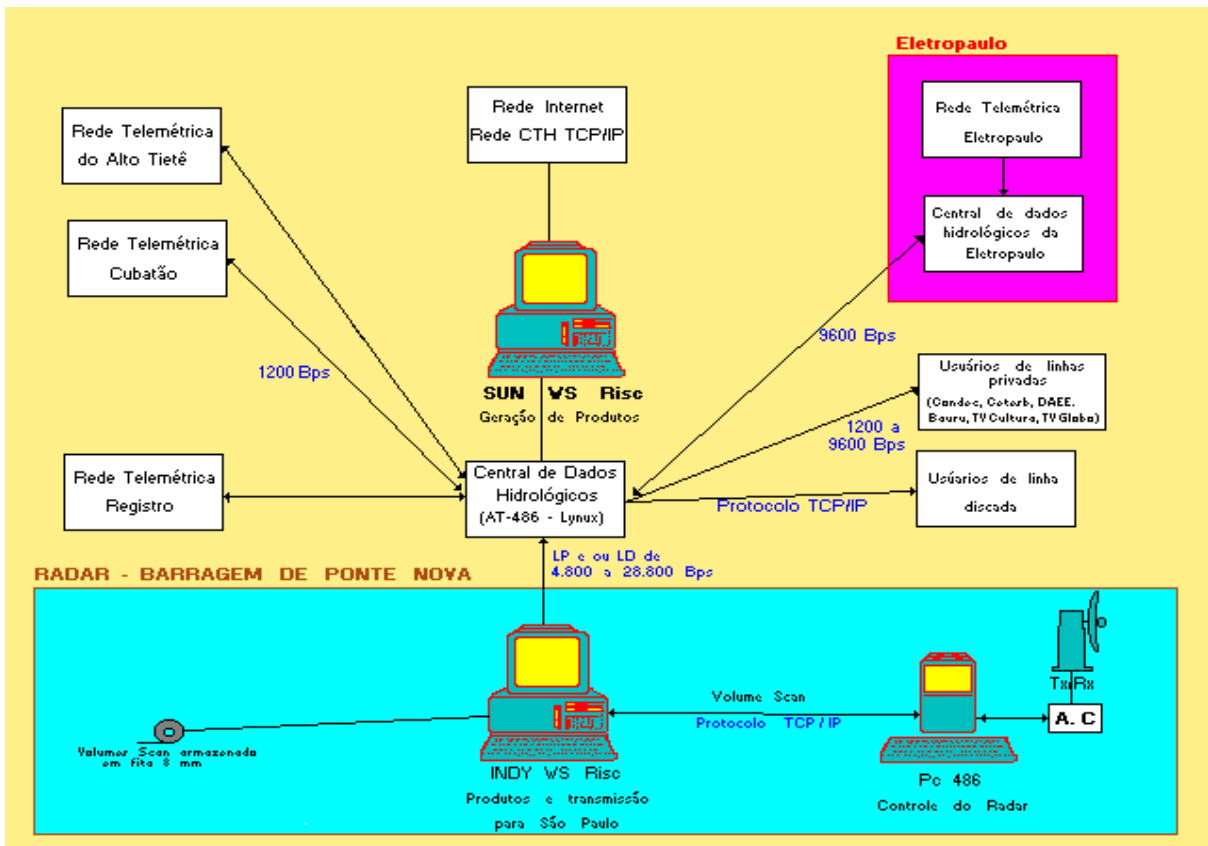


Figura 2.5 Esquema da operação do Sistema de Alerta às Inundações de São Paulo (SAISP). Fonte: FCTH.

Para o radar meteorológico de São Paulo é utilizada a relação de Marshal-Palmer (1948),  $Z = 200R^{1,6}$ .

### 2.3 Rede Telemétrica do Alto Tietê

O sistema de alerta de inundações da bacia do Alto Tietê conta com uma rede telemétrica (Braga e Barros, 1992), com medições de precipitação em 27 pontos (Fig 2.6b), a cada 10 minutos por meio de pluviômetros do tipo basculante.

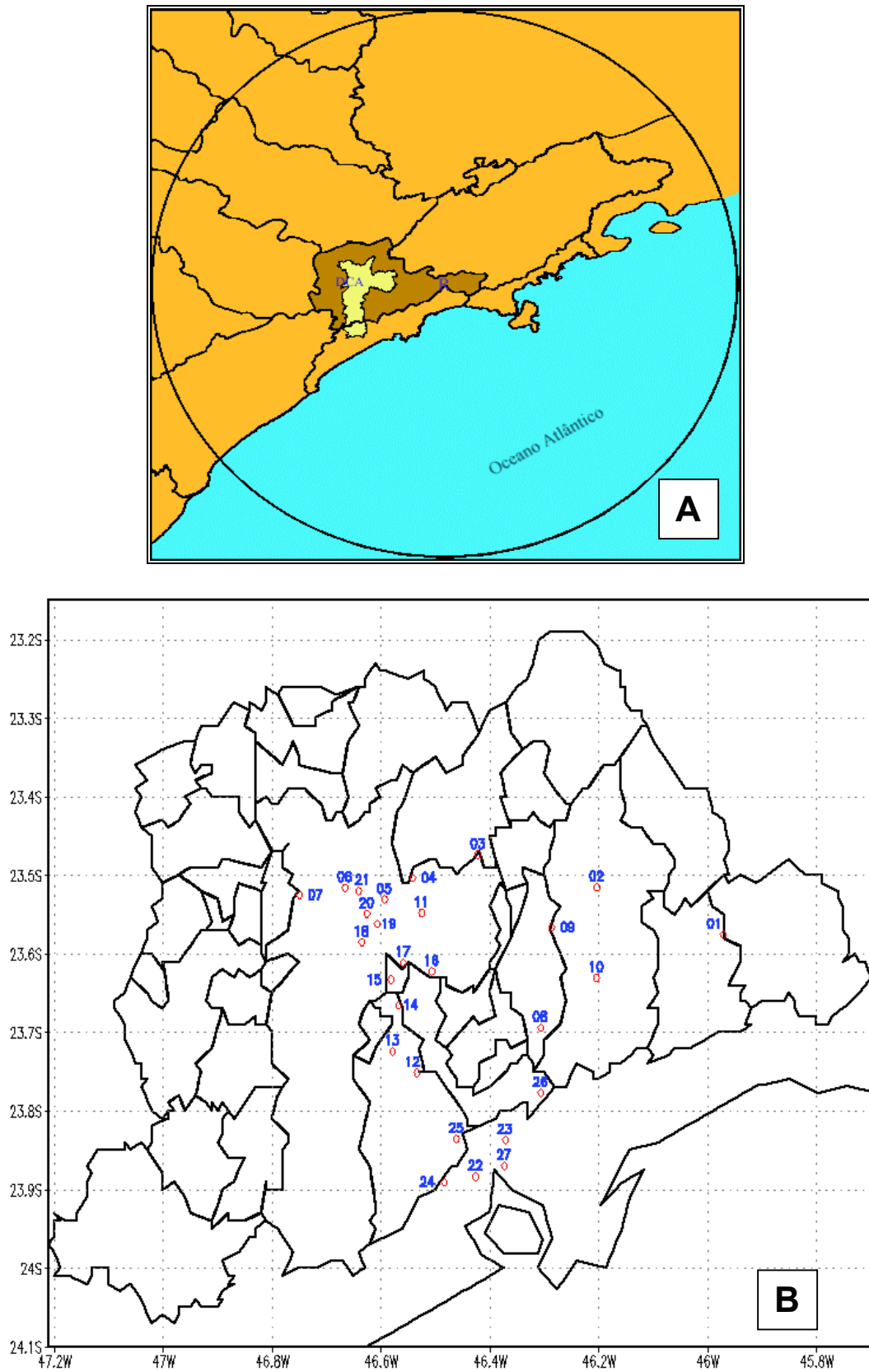


Figura 2.6 (a) Área de cobertura do radar meteorológico de São Paulo (Raio de 240 km) com destaques para a Bacia do Alto Tietê (BAT) e a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), e (b) rede telemétrica na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), (Pereira Filho, 2004).

Há falhas nas séries de dados, alguns postos não possuem séries de dados completas. O mesmo ocorre com os dados do RSP devido à manutenção do equipamento, por falha técnica e manutenção preventiva. Os dados da rede telemétrica são fornecidos no formato ASCII. A Tabela 2.2 mostra a localização, em coordenadas planas e geográficas, dos postos da rede telemétrica do Alto Tietê, também da coordenada do RSP.

Tabela 2.2 Localização dos Postos Pluviométricos da rede telemétrica do Alto Tietê, em ordem, do posto 01 ao posto 27. Estão indicados da esquerda para a direita: o código do posto, longitude (m) e latitude (m), longitude e latitude (°) e coordenadas do valor do pixel na matrix (240 x 240).

Posto	Long. (X)	Lat. (Y)	Long. (°)	Lat. (°)	Pixel (X)	Pixel (Y)
PPNOVA	400.800	7.392.450	-45.9721	-23.5753	120	119
PESTAL	377.090	7.398.950	-46.2039	-23.5149	105	115
PMIGUE	354.750	7.403.350	-46.4222	-23.4734	89	112
PPENHA	342.520	7.399.950	-46.5423	-23.5029	81	113
PBELEM	337.300	7.396.860	-46.5938	-23.5303	79	116
PLIMAO	329.860	7.398.400	-46.6664	-23.5156	73	115
PMOVEL	321.300	7.397.290	-46.7504	-23.5248	68	116
PSERTA	366.700	7.379.080	-46.3074	-23.6936	97	128
PTAIAC	368.650	7.393.200	-46.2870	-23.5662	99	119
PJUNDI	377.150	7.386.150	-46.2044	-23.6305	105	123
PARICA	344.250	7.394.990	-46.5259	-23.5479	83	117
PRGRND	343.600	7.372.490	-46.5346	-23.7510	83	132
PIMIGR	339.000	7.375.450	-46.5794	-23.7238	80	131
PRUDGE	340.100	7.381.950	-46.5679	-23.6652	80	125
PMENIN	338.600	7.385.540	-46.5822	-23.6327	79	124
PORATO	346.250	7.386.800	-46.5071	-23.6220	85	123
PPROSP	340.900	7.387.950	-46.5594	-23.6111	81	121
PMARIA	333.070	7.390.770	-46.6359	-23.5849	76	120
PCOMGA	335.880	7.393.380	-46.6080	-23.5616	77	119
PBOMRT	333.990	7.394.780	-46.6264	-23.5488	75	115
P25CUB	332.430	7.397.990	-46.6414	-23.5196	89	141
P05ULT	354.750	7.357.980	-46.4267	-23.8831	93	139
P20COT	360.250	7.363.180	-46.3722	-23.8366	87	143
P15APE	348.870	7.357.100	-46.4845	-23.8905	88	139
P10PAR	351.130	7.363.240	-46.4617	-23.8352	99	133
P05PER	366.820	7.369.900	-46.3071	-23.7765	91	140
P05COS	360.100	7.359.520	-46.3740	-23.8696	93	141

A Fig 2.7 mostra a localização dos postos telemétricos na matriz de pixels do RSP na região que será utilizada neste estudo para obter-se a análise objetiva estatística (ANOBES) da chuva.

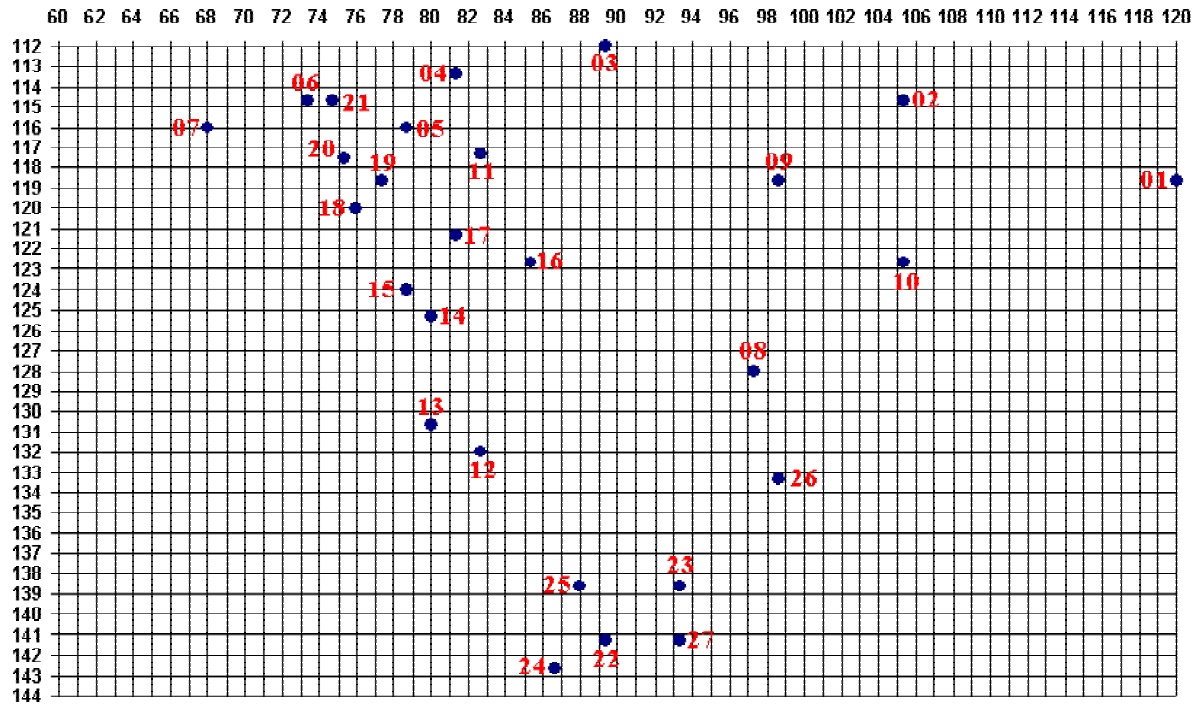


Figura 2.7 Localização dos postos tele-pluviométricos na coordenada do RSP. Coordenadas horizontais estão no sentido oeste-leste e verticais no sentido norte-sul. O quadriculado representa pixels de 2 km x 2 km.



## **2.4 Classificação dos Sistemas Meteorológicos na área de cobertura do Radar Meteorológico de São Paulo**

Utilizou-se neste estudo campos de precipitação a um nível de altura constante, de 3 km, com resolução espacial de 4 km<sup>2</sup> e resolução temporal de 5 minutos.

Estes campos permitiram classificar a precipitação em convectiva e estratiforme, como também identificar cinco tipos de sistemas precipitantes que atuam durante todo o ano no leste do Estado de São Paulo, dentro da área de cobertura do RSP.

Os dados binários do RSP foram tratados e convertidos em campos de precipitação por meio de programas em linguagem fortran, shell scripts e gerados campos de precipitação com o software GrADS.

Foram selecionados 145.194 campos de precipitação num total de 827 dias, entre 1998 e 2003. Cada evento foi analisado por meio da animação dos campos de taxa de precipitação de cada um dos eventos de chuva a fim de identificar e caracterizar os sistemas meteorológicos. Avaliou-se a direção de propagação dos sistemas, sentido de deslocamento, horários de início e dissipação dos mesmos, de modo a diferenciar os sistemas precipitantes entre si. De acordo com o ciclo anual de precipitação na região, a maior quantidade de mapas disponíveis ocorreu nos meses de verão e, o menor no inverno (Fig 2.8).

Inicialmente, os eventos foram classificados de acordo com as intensidades de precipitação; em Convectivos (C) e Estratiformes (E). Posteriormente, os sistemas foram classificados quanto à sua morfologia, em cinco tipos; Convecção

Isolada (CI), precipitação associada a Brisa Marítima (BM), Linhas de Instabilidade (LI), Bandas Dispersas de precipitação (BD) e Frentes Frias (FF).

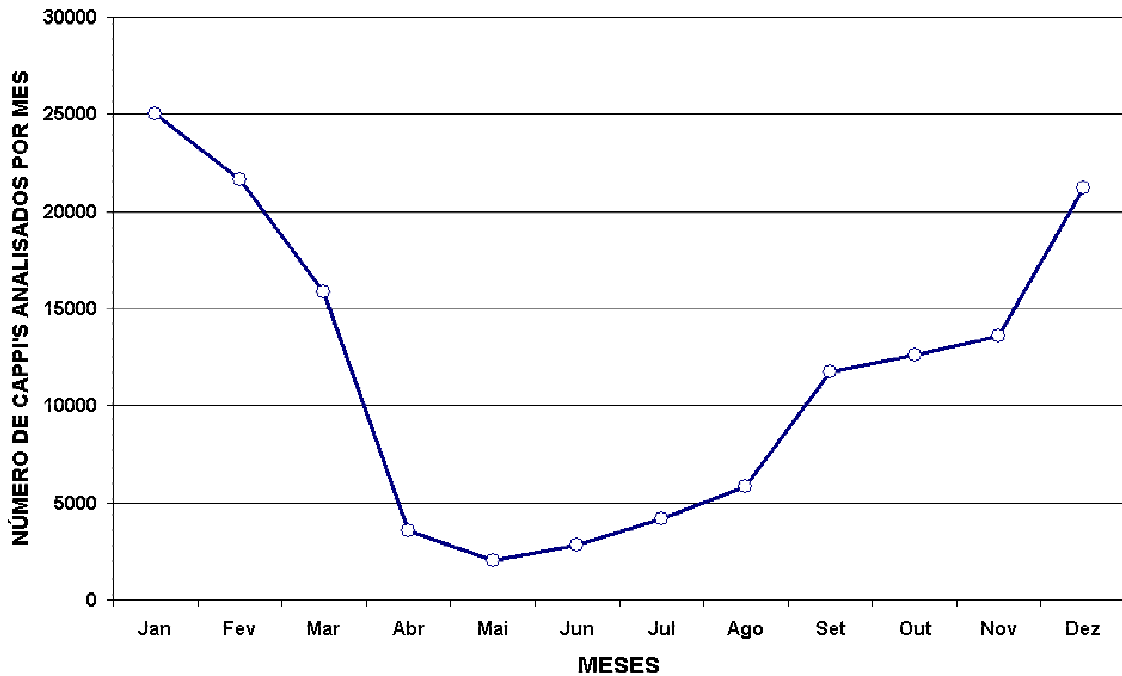


Figura 2.8 Número total de mapas de taxa de chuva disponíveis para análise, para cada mês.

Mapas de taxa de precipitação para cada tipo de sistema acima são mostrados nas Figuras 2.9 a 2.13. A Figura 2.9 mostra um exemplo de CI, para o dia 06 de fevereiro de 1999, as 14:30 HL e as 16:00 HL. Nota-se a distribuição das células convectivas isoladas e sua evolução temporal. A Figura 2.10 mostra um caso de precipitação associada a BM no dia 02 de fevereiro de 1999, entre as 14:00 HL e as 16:00 HL. Nota-se a formação de células convectivas paralelas à costa e a propagação para leste. A Figura 2.11 mostra um caso de LI do dia 10 de outubro de 2000, entre as 20:00 HL e as 22:00 HL, com organização da linha a partir de células intensas com propagação de oeste para leste, nota-se células convectivas intensas em sua dianteira e áreas de precipitação estratiforme na retaguarda. A Figura 2.12 ilustra um caso de BD para o dia 02 de janeiro de 2000, associada a um evento de

ZCAS. Observa-se a persistência de uma extensa área de precipitação no leste do Estado de São Paulo e Sul de Minas Gerais, entre as 11:15 HL e 19:20 HL, com propagação de Noroeste para Sudeste. Por fim, a Figura 2.13 mostra a passagem de uma FF ocorrida no dia 06 de maio de 1999, entre as 15:50 HL e as 20:00 HL, constituída de uma região estratiforme e células convectivas em sua dianteira, com propagação de Sudoeste para Nordeste.

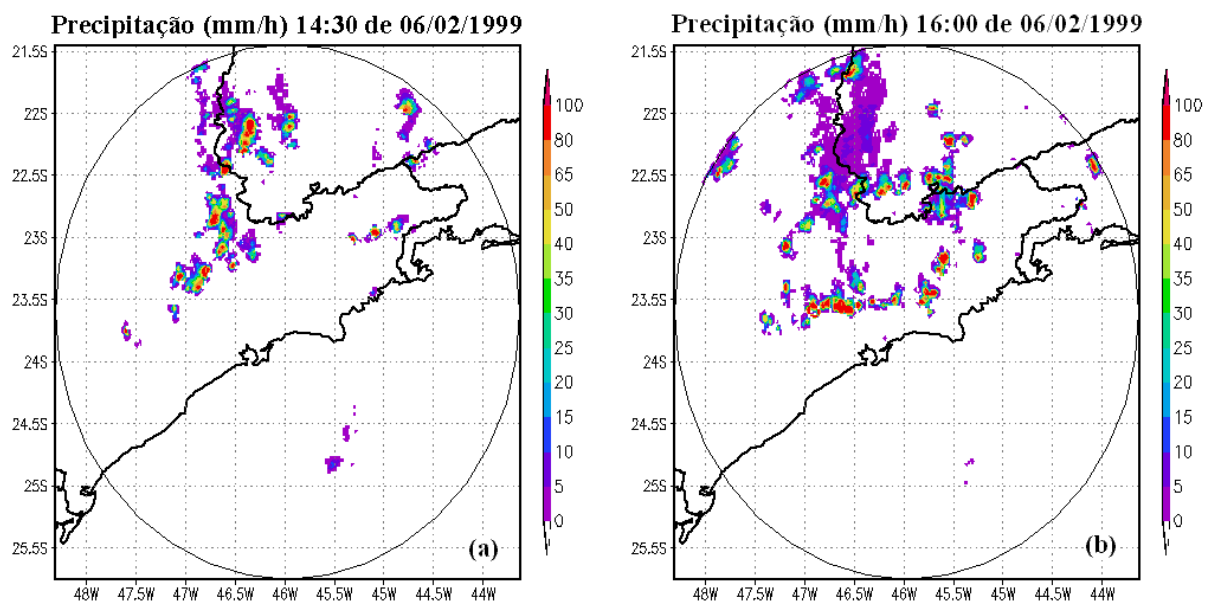


Figura 2.9 Mapa de taxa de precipitação obtido com o RSP entre 14:30 HL e 16:00 HL em 06/02/1999 que ilustra um evento de convecção isolada. Contornos geográficos, latitudes e longitudes estão indicados. Escala de cores indicam intensidades ( $\text{mm h}^{-1}$ ).

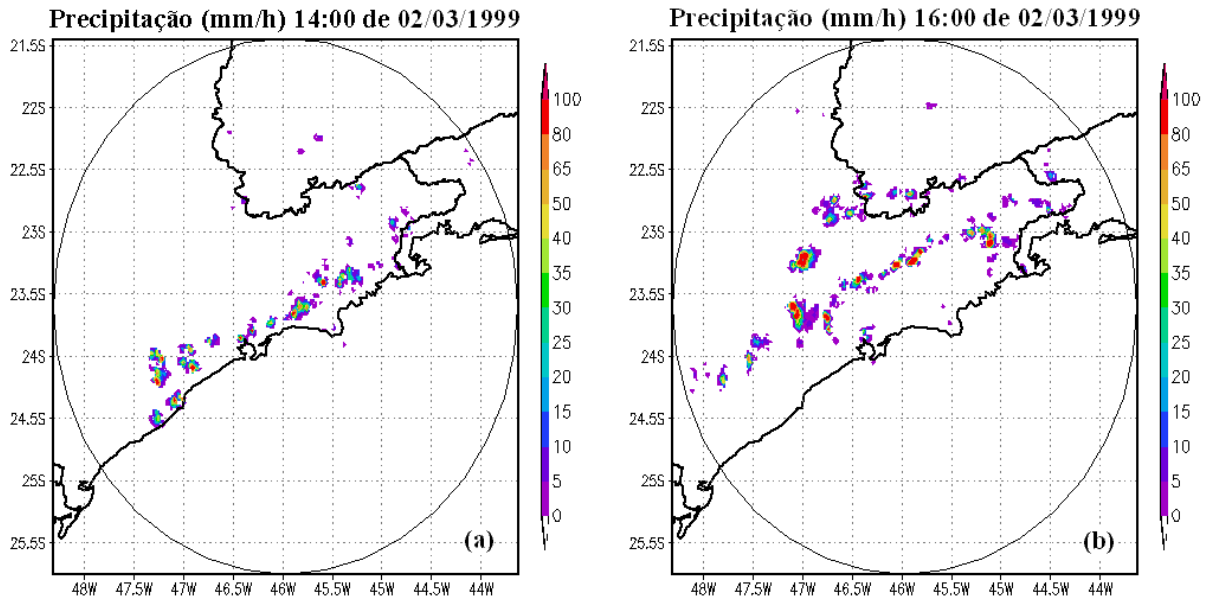


Figura 2.10 Similar a Fig 2.9, exceto para Brisa Marítima.

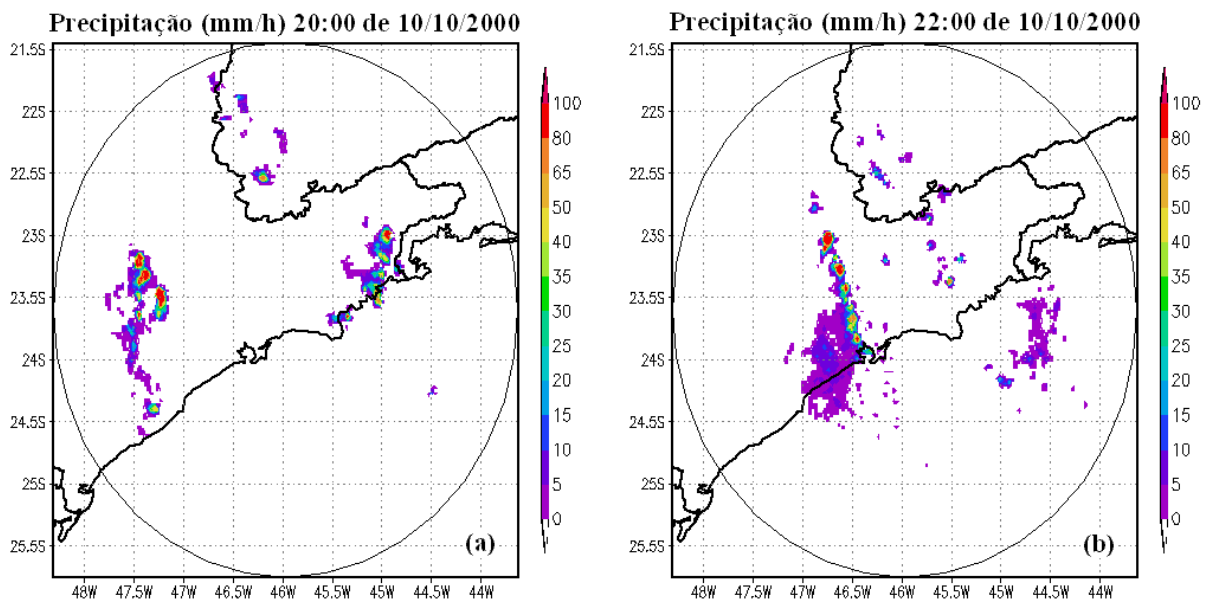


Figura 2.11 Similar a Fig 2.9, exceto para Linha de Instabilidade.

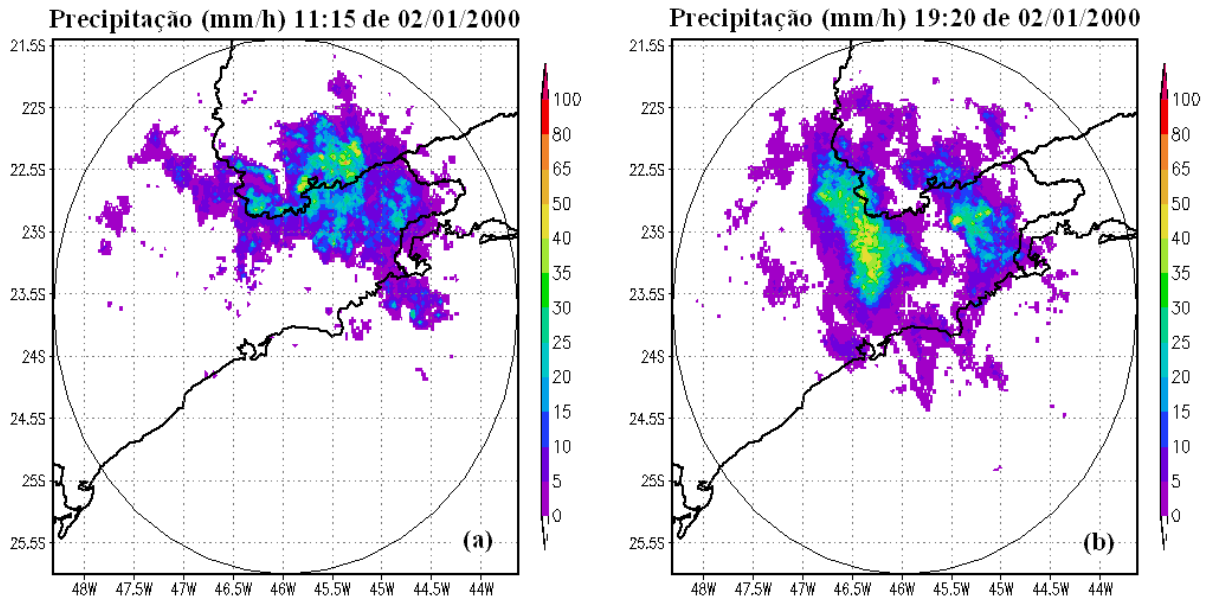


Figura 2.12 Similar a Fig 2.9, exceto para Bandas Dispersas.

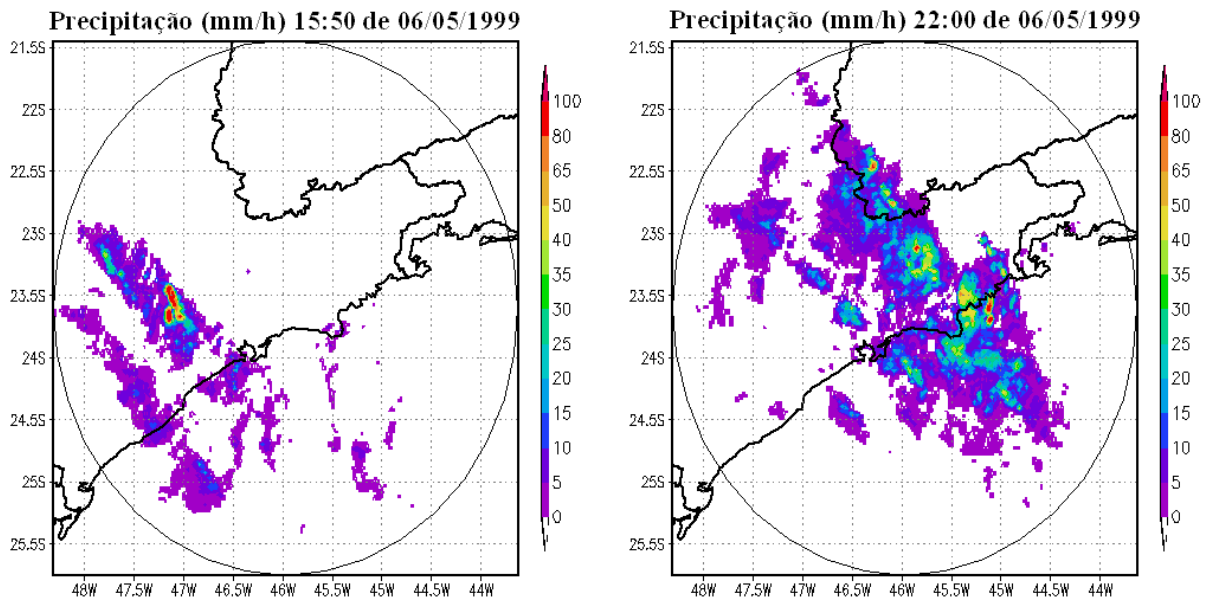


Figura 2.13 Similar a Fig 2.9, exceto para Frente Fria.

Todos os mapas foram utilizados para a classificação dos sistemas, conforme acima. Em geral sistemas com taxas de precipitação menores que  $20 \text{ mm h}^{-1}$  foram classificados como estratiformes e, convectivos, acima de  $20 \text{ mm h}^{-1}$ .

## 2.5 Comparação entre a precipitação estimada do RSP e medida pela Rede Telemétrica do Alto Tietê

Acumulações de precipitações (mm) a cada 10 minutos foram obtidas de campos da taxa de precipitação com resolução temporal de 5 minutos. Para comparação com as respectivas acumulações de chuva de 10 minutos da rede telemétrica do Alto Tietê. Utilizaram-se apenas os dados calculados do RSP e rede telemétrica (Fig 2.6). A precipitação diária foi também estimada para verificação da consistência entre os dados do RSP e rede telemétrica.

Para estimar o viés do radar, utilizou-se nesta comparação o índice proposto por Wilson e Brandes (1979) e Klazura e Kelly (1995):

$$RP = \frac{\sum_{i=1}^N P_i^r}{\sum_{i=1}^N P_i^p} \quad (5)$$

A equação (5) permite identificar o viés médio entre a precipitação acumulada diária estimada com o radar e medida pelos pluviômetros.

Estimou-se também o coeficiente de correlação de Pearson para acumulações de 10, 30 e 60 minutos de acordo com:

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{\left[ n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] * \left[ n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right]}} \quad (6)$$

onde, n = número de pares de medidas radar-pluviômetro;

$x_i$  = medidas de precipitação obtidas por pluviômetro;

$y_i$  = medidas de precipitação obtidas por radar.

Entretanto, um coeficiente de correlação alto não garante relação entre os dados, mas pode-se analisar estes dados por meio da Eq. 6 pois os dados são independentes.

## **2.6 Análise Objetiva Estatística (ANOBES)**

Tanto as estimativas do radar quanto as medidas de precipitação da rede telemétrica apresentam erros (Pereira e Nakayama, 2001). As medidas feitas por pluviômetros subestimam as taxas de chuva, especialmente no final do espectro da precipitação (Legates e DeLiberty 1993). Já os radares meteorológicos amostram um volume variável da atmosfera para determinar as estimativas da precipitação nesta área. Estas estimativas são afetadas por diversas fontes comuns de erros observacionais: calibração eletrônica, a relação Z-R, a atenuação da precipitação, o efeito da escala, banda brilhante, propagação anômala, efeitos de terreno, e a estratégia de amostragem usada pelo radar (Austin 1987).

O impacto de erros de calibração pode ser minimizado por procedimentos de manutenção dos equipamentos e um rigoroso controle de qualidade dos dados. Nesta seção apresenta-se uma metodologia para minimizar os erros da análise por meio da integração de estimativas de precipitação do RSP as medidas da rede telemétrica da bacia hidrográfica do Alto Tietê, pela técnica denominada Análise Objetiva Estatística – ANOBES (Pereira Filho et al, 1998).

A precipitação analisada num dado ponto de grade é obtida da adição entre a precipitação estimada pelo radar no ponto de grade (background) e a soma do produto dos pesos das diferenças entre as precipitações medidas (observadas) e as estimadas pelo radar, respectivamente. O erro da variância é definido pela soma

dos quadrados das diferenças entre o valor observado (ou estimado) e o valor verdadeiro (que é desconhecido). Assim, os pesos das análises são derivados da variância do erro da estimativa de precipitação do radar (variância do erro de fundo ou de background). As propriedades estatísticas dos sistemas precipitantes são incorporadas nas análises tais que a variância do erro da análise é menor do que a variância mínima do erro da observação.

### 2.6.1 O Esquema da ANOBES

A técnica da ANOBES é um esquema muito eficiente de interpolação (Gandin 1963; WMO 1970; Crawford 1979; Creutin e Obled 1982; Krajewski 1987; Bhargava e Danard 1994) que efetivamente reduz a variância do erro de análise. A equação da ANOBES é dada por (Pereira Filho et al, 1998):

$$P_a(x_i, y_i) = P_r(x_i, y_i) + \sum_{k=1}^K w_{ik} [P_p(x_k, y_k) - P_r(x_k, y_k)] \quad (7)$$

onde,

$P_a(x_i, y_i)$  = precipitação analisada (mm) no ponto de grade  $i$  ;

$P_r(x_i, y_i)$  = precipitação estimada pelo radar (mm) no ponto de grade  $i$  ;

$P_p(x_k, y_k)$  = medida da precipitação do pluviômetro (mm) para uma estação em um ponto  $k$  ;

$P_r(x_k, y_k)$  = precipitação estimada pelo radar (mm) para uma estação em um ponto  $k$ ;

$w_{ik}$  = peso a posteriori;

$K$  = número de pluviômetros, e  $(x, y)$  = coordenadas (km).



Definindo-se  $t(x_i, y_i)$  e  $t(x_k, y_k)$  como os valores verdadeiros de  $P$  para os pontos de grade  $i$  e  $k$ , respectivamente, e subtraindo  $t(x_i, y_i)$  de ambos os lados da Equação (7) temos:

$$a_i - t_i = b_i - t_i + \sum_{k=1}^K w_{ik} (o_k - b_k) \quad (8)$$

onde,  $a_i = P_a(x_i, y_i)$ ,  $b_i = P_r(x_i, y_i)$ ,  $o_k = P_g(x_k, y_k)$ ,  $b_k = P_r(x_k, y_k)$ ,  $t_i = t(x_i, y_i)$ , e  $t_k = t(x_k, y_k)$ .

Define-se ainda:

$a_i - t_i =$  erro da análise,

$b_i - t_i =$  erro de fundo (background),

$a_i - b_i =$  incremento de análise ou correção, e

$o_k - b_k =$  incremento da observação.

Supõe-se que as variáveis  $b_i$ ,  $b_k$ , e  $o_k$  não tem viés ou foram removidos, tal que:

$$\langle b_i - t_i \rangle = \langle b_k - t_k \rangle = \langle o_k - t_k \rangle = 0 \quad (9)$$

onde  $\langle c \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} c^* p(c) dc$  é um operador, e  $p(c) =$  função densidade de probabilidade de

$c$ .

Esta suposição, que implica na análise sem viés, não será satisfeita se a precipitação for subestimada, especialmente para baixas e altas taxas de precipitação (Legates e DeLiberty, 1993). O vento e evaporação também contribuem para subestimar a precipitação (Groisman e Legate 1994). Adicionalmente, os erros das estimativas de chuva com o radar meteorológico são espacialmente dependentes. Há inúmeras fontes de erro tais como relações Z-R inadequadas e

banda brilhante (Smith et al 1996), que podem ser muito maiores que os erros de calibração do radar meteorológico. Assim, os resultados da análise podem apresentar viés se a Eq (9) não for satisfeita.

O objetivo do esquema de SOA é minimizar a variância do erro da análise, definida como:

$$E_a^2 = \langle (a_i - t_i)^2 \rangle \quad (10)$$

Elevando-se ao quadrado ambos os lados da Equação (8) e examinando o valor esperado, pode-se mostrar que:

$$E_a^2 = \langle (b_i - t_i)^2 \rangle + 2 \sum_{n=1}^N W_{ik} \langle (o_k - b_k)(b_i - t_i) \rangle + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K W_{ik} W_{il} \langle (o_k - b_k)(o_l - b_l) \rangle \quad (11)$$

A variância esperada do erro da análise não é conhecida e tem de ser estimada pelo termo da direita da Eq (11). O primeiro termo do lado direito é a variância prevista do erro do fundo (background); os segundos e terceiros termos são as covariâncias entre o erro de fundo e o incremento da observação, e as covariâncias entre os incrementos da observação nos pontos k e l (termo dependente da distância), respectivamente. A variância prevista do erro da análise é minimizada diferenciando-se a Eq (11) em relação aos pesos,  $W_{ik}$  :

$$\frac{\partial E_a^2}{\partial W_{ik}} = 2 \langle (o_k - b_k)(b_i - t_i) \rangle + 2 \sum_{l=1}^K W_{il} \langle (o_k - b_k)(o_l - b_l) \rangle \quad (12)$$

Igualando-se (12) a zero, tem-se:

$$\sum_{l=1}^K W_{il} \langle (o_k - b_k)(o_l - b_l) \rangle = - \langle (o_k - b_k)(b_i - t_i) \rangle \quad (13)$$

O termo do lado direito de Eq (13) pode ser expandido:

$$\langle (o_k - b_k)(b_i - t_i) \rangle = \langle (o_k - t_k)(b_i - t_i) \rangle - \langle (b_k - t_k)(b_i - t_i) \rangle \quad (14)$$

Em geral, observações e erros de fundo (background) não são correlacionados, o que cancela o primeiro termo da direita em (14). Similarmente, o lado esquerdo da Equação (13) pode ser expandido:

$$\langle (o_k - b_k)(o_l - b_l) \rangle = \langle (o_k - t_k)(o_l - t_l) \rangle + \langle (b_k - t_k)(b_l - t_l) \rangle \quad (15)$$

Os dois termos do lado direito da Equação (15) são a covariância do erro de background e da observação, respectivamente. Substituindo-se as Equações (14) e (15) em (13), tem-se:

$$\sum_{l=1}^K w_{il} [\langle (o_k - t_k)(o_l - t_l) \rangle + \langle (b_k - t_k)(b_l - t_l) \rangle] = \langle (b_k - t_k)(b_i - t_i) \rangle \quad (16)$$

que pode ser usado para determinar os pesos a posteriori. Ambas as Equações (7) e (16) constituem uma forma genérica do esquema de ANOBES. Conseqüentemente, quando estes pesos são usados na Equação (7),  $P_a(x_i, y_i)$  tem variância mínima estimada para  $P_t(x_i, y_i)$  - o valor verdadeiro de  $P$  para o ponto de grade  $i$ . Quando os termos da Equação (16) são estimados acuradamente, este esquema é denominado interpolação ótima.

As equações (11) e (16) podem ser manipuladas para produzir uma forma normalizada do esquema da ANOBES (Pereira Filho et al, 1998). A equação (16) pode ser escrita na forma:

$$\sum_{l=1}^K W_l (\rho_{kl} + \varepsilon_k^2) = \rho_{ki} \quad 1 \leq k \leq K, \quad (17)$$

onde:

$\rho_{kl}$  = correlação espacial do erro de fundo para as estações  $k$  e  $l$ ;

$\rho_{ki}$  = correlação espacial do erro de fundo entre o ponto de grade  $i$  e a estação  $k$ ;

$\varepsilon_k^2 = \langle (o_k - t_k)^2 \rangle / \langle (b_k - t_k)^2 \rangle$ , erro da observação normalizada; e

$W_i$  = peso a posteriori.

Similarmente, a equação (17) pode ser normalizada:

$$\varepsilon_a^2 = 1 - \sum_{l=1}^K \rho_{ki} W_l \quad (18)$$

A variância prevista do erro da análise normalizada é a relação entre a variância prevista da do erro da análise (termo da esquerda da Equação 11) e a variância do erro de background (primeiro termo da direita da Equação 11). Isto pode ser usado para determinar a distribuição espacial da variância do erro da análise e da redução do erro acima de uma dada área de análise. Geralmente, o fechamento das observações dos pontos de grade são as análises dos pontos de grade, para um pequeno valor de  $\varepsilon_a^2$ . Esta característica do esquema da ANOBES pode ser usada para otimizar uma rede de superfície de pluviômetros (Pereira Filho et al, 1998), que depende apenas da climatologia da precipitação e dos recursos financeiros disponíveis para dar suporte à rede (Crawford, 1979).

### 2.6.2 Funções de Correlações Espaciais

As equações (17) e (18) são normalizadas pela matriz da covariância do erro de background (primeiro termo da direita da Equação 11). Esta matriz é o componente mais importante do esquema da ANOBES; a exatidão da análise

depende fortemente desta componente. Falhas em considerar o impacto do erro de fundo afetará adversamente os erros da interpolação (Pereira Filho et al, 1998).

A correlação do erro de background pode ser estimada por (Pereira Filho et al, 1998):

$$\rho_{kl} = \frac{\langle (P_r^k - P_t^k)(P_r^l - P_t^l) \rangle}{\sqrt{\langle (P_r^k - P_t^k)^2 \rangle \langle (P_r^l - P_t^l)^2 \rangle}}, \quad (19)$$

onde  $P_r^{k(l)}$  = precipitação acumulada pelo radar (mm) no local k (l). Desde que a acumulação verdadeira  $P_t^{k(l)}$  é desconhecida,  $\rho_{kl}$  é estimada no sentido climatológico (Creutin e Obled 1982) substituindo-se  $P_t$  pela média de longas séries de precipitação.

Este esquema de análise maximiza o sinal da precipitação nos dados e minimiza os erros observacionais para produzir uma análise com erros menores do que teria em uma análise univariada de dados de radar ou de medidas pluviométricas. As vantagens preliminares do esquema da análise são os seguintes (Pereira Filho et al, 1998).

- A variância prevista do erro da análise é minimizada e conhecida;
- A técnica da ANOBES usa as propriedades estatísticas de campos observados de precipitação;
- Somente as medidas de chuva próximas à posição da análise são usadas para a interpolação do ponto de grade;
- A técnica é direta e relacionada às propriedades estatísticas (isto é, a covariância espacial) de sistemas reais de precipitação.

Até recentemente, o poder computacional e falta de séries de dados longas eram os fatores que limitavam o uso operacional da ANOBES. Com o advento de computadores mais rápidos, e com a possibilidade de acesso à séries de dados de radar meteorológico maiores, estas limitações são muito menos significativas no presente momento.

As correlações espaciais do erro de background (Eq. 19) foram calculadas usando séries de dados de precipitação do RSP. As correlações das séries de dados de precipitação acumulada foram estimadas para intervalos de 15, 30, 60 e 120 minutos.

As correlações espaciais foram determinadas para cada um dos cinco tipos de sistemas identificados: CI, BM, LI, BD e FF. Para tanto, utilizou-se cerca de 30% da série de dados de cada um dos cinco tipos de sistemas aqui analisados.

A maior vantagem do uso dos dados de radar meteorológico para estimar estas correlações é a alta resolução espaço-temporal dos mesmos. O número total de pontos usados para determinar as correlações da amostra é uma função do número de pares em que há ao menos um deles com registro de precipitação mensurável. A correlação espacial é função da distância entre os pixels para os diferentes intervalos de acumulação citados acima, e é determinada da média de todas as estimativas de correlação para uma dada distância. Este procedimento extrai a componente isotrópica da correlação espacial. Uma função polinomial é ajustada das médias. A função ajustada deve decrescer monotonicamente com a distância tal que a solução do sistema de equações em (16) seja bem posta (Pereira Filho et al., 1998).

## **3 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **3.1 Características e descrição dos sistemas precipitantes observados**

A classificação dos sistemas de chuva na área de cobertura do radar meteorológico de São Paulo foi realizada por meio de inspeção visual dos campos de precipitação acumulados. A classificação foi realizada em duas etapas. Na primeira etapa classificaram-se os sistemas em convectivos e estratiformes. Na segunda etapa analisou-se o grau aparente de organização dos ecos de chuva, sua distribuição horizontal, deslocamento e duração. Foram identificados cinco tipos básicos de sistemas meteorológicos: precipitações associadas à convecção isolada (CI) e a brisa marítima (BM), linhas de instabilidade (LI), bandas dispersas de precipitação (BD) e frentes frias (FF).

A CI geralmente se forma à tarde sem orientação aparente e pode estar, ou não, associada a algum sistema de grande escala; surge e se dissipa, geralmente, próximo ao local de formação. São células convectivas ordinárias sem deslocamento aparente ou de deslocamento muito lento, e sem região preferencial para formação, sobre o continente. Eventos de CI ocorrem preferencialmente entre 13:30 HL e 18:30 HL, de acordo com o ciclo do aquecimento diurno. Estas células ocorrem em sua grande maioria no interior do continente, seu deslocamento é de oeste para leste na maior parte das vezes. Podem dar origem, na fase de decaimento, a áreas de precipitação estratiforme mais extensas do que as células na fase madura de desenvolvimento.

A Brisa Marítima (BM) pode dar origem a sistemas precipitantes convectivos e estratiformes. Os eventos convectivos induzidos pela BM se deslocam para oeste na forma de sistemas convectivos isolados, com características morfológicas semelhantes a CI. Em geral, desenvolvem-se entre 14:30 HL e 19:00 HL e tendem a formar linhas de células convectivas ao longo da costa, as quais são favorecidas pela Serra do Mar. Este tipo de sistema alcança a RMSP, onde normalmente produz precipitação convectiva intensa. Em alguns casos, a BM dá origem a pequenas bandas ou áreas de precipitação estratiforme, com pequeno tempo de vida.

As Linhas de Instabilidade (LI) apresentam em sua dianteira células convectivas intensas com área de precipitação estratiforme na sua retaguarda, deslocando-se rapidamente, em torno de 10 a 12  $\text{ms}^{-1}$ . Surgem geralmente da fusão de ecos convectivos isolados ou podem estar associados a outros sistemas, em geral frentes frias, e podem estar a dianteira ou retaguarda destes sistemas. As LI foram observadas em todos os horários, com predominância entre 15:00 HL e 17 HL, com ciclo de vida entre 4 a 12 horas. Foram observados deslocamentos de LI para todas as direções mas preferencialmente de Noroeste para Sudeste, perpendiculares ou paralelas ao movimento de sistemas frontais.

As Bandas Dispersas (BD) não apresentam organização espacial e, geralmente, estão associadas a um sistema de grande escala, tais como frentes estacionárias (e. g. Zona de Convergência do Atlântico Sul - ZCAS). Em geral, elas se deslocam de NW para SE e com chuva estratiforme e convecção embebida nestas. O período de vida destes sistemas pode chegar a até 5 dias, de acordo com os dados de radar. As BD convectivas de maior longevidade estão, em geral, associadas aos episódios de ZCAS.



Por fim, as frentes frias (FF) apresentam faixas de precipitação de largura variável com orientação NW-SE, convectivas ou estratiformes, e deslocamento de SW para E/NE. A duração destes sistemas na área de cobertura do radar varia de algumas horas a mais de 5 dias (estacionárias). A média de deslocamento das FF pela área de cobertura do radar meteorológico de SP foi de cerca de 18 horas. Elas atuam em todos os meses do ano, porém são mais convectivas no verão do que no inverno, quando se deslocam com maior velocidade e extensão de chuva estratiforme. Em alguns casos, no verão, estas zonas baroclínicas se tornam estacionárias e recebem aporte de umidade oriundo da Região Amazônica que evoluem para ZCAS e, desta forma, produzem bandas de precipitação intensas.

A morfologia e o tempo de evolução de cada categoria aqui observada dependem da topografia, circulação associada e processos de mistura. O tamanho horizontal dos sistemas precipitantes se mostrou bastante variável. Núcleos convectivos associados a CI e a BM são os de menores dimensões, seguidos das Linhas de Instabilidade, das Frentes Frias e das Bandas Dispersas de precipitação, nesta ordem.

A Figura 3.1 apresenta dois casos típicos de convecção, em ambas as situações sobre o continente. A Figura 3.1a corresponde a um dia de convecção isolada, sem organização aparente. Na Figura 3.1b observam-se células convectivas em forma de linha orientada ao longo da costa, associada à frente de brisa marítima.

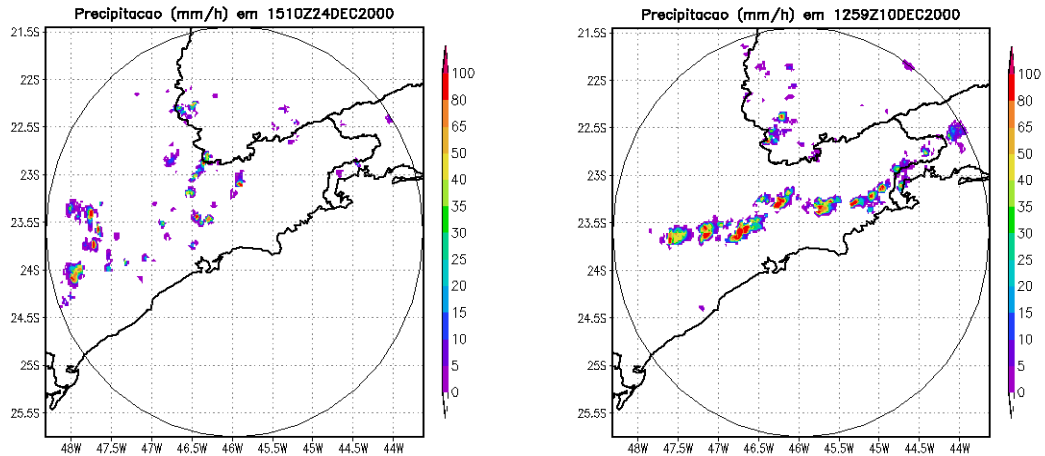


Figura 3.1 Campos de taxa de precipitação obtidos com o radar meteorológico de São Paulo. **(a)** convecção isolada e **(b)** convecção devido à brisa marítima. Horários (UTC) e datas indicados. Escala de cores indica de intensidade de precipitação ( $\text{mm h}^{-1}$ ).

Em alguns casos, mais de um tipo de sistema foi observado num mesmo dia, tal qual o ilustrado na Figura 3.2, associado a duas linhas de instabilidade. A primeira, de orientação norte-sul (Figura 3.2a) está situada na retaguarda de um sistema frontal de rápido deslocamento para Leste. A segunda (Figura 3.2b), de orientação NE-SW apresentou rápido deslocamento para sudeste, e foi o único sistema a atuar neste dia.

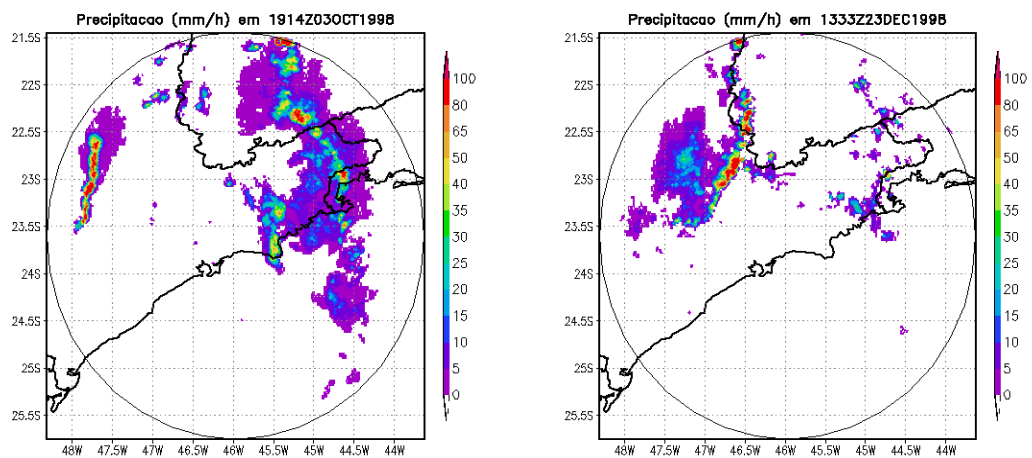


Figura 3.2 Análogo à Figura 3.1, exceto para **(a)** linha de instabilidade na retaguarda de um sistema frontal e, **(b)** linha de instabilidade isolada.

No período de 01 a 06 de janeiro de 2000, bandas dispersas de precipitação estavam associadas à ZCAS (Climanálise, 2000). Destacam-se na Figura 3.3, períodos mais convectivos (Figura 3.3a) e mais estratiformes (Figura 3.3b).

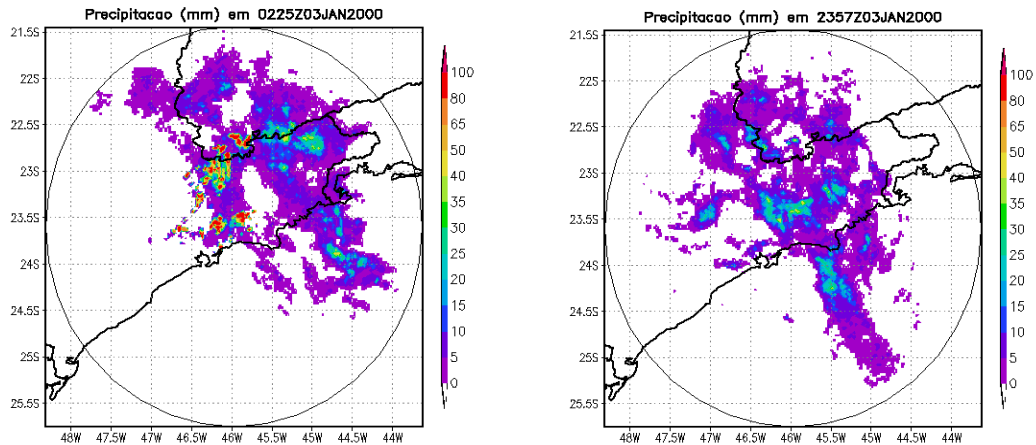


Figura 3.3 Análogo à Figura 3.1, exceto para um episódio de ZCAS com **(a)** bandas dispersas com convecção e, **(b)**, estratiforme.

As frentes frias e bandas de precipitação mostradas acima são muito variáveis ao longo do ano, morfologicamente. Geralmente, as frentes frias são mais estratiformes no inverno e mais convectivas nas demais estações do ano, conforme ilustrado na Figura 3.4a e 3.4b.

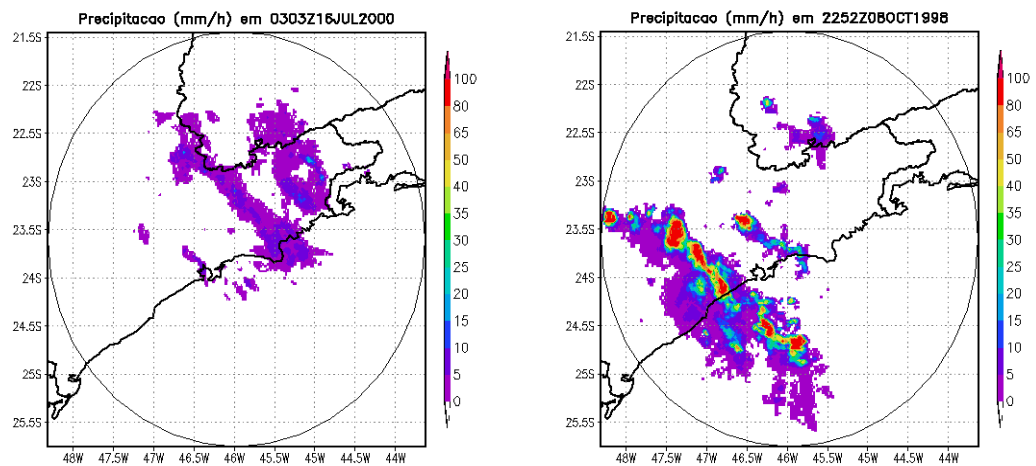


Figura 3.4 Análogo à Figura 3.1, exceto para duas frentes frias **(a)** com precipitação estratiforme e, **(b)**, convectiva.

A Figura 3.5 mostra as frequências dos eventos convectivos e estratiformes, dominantes na primavera e verão e no outono e inverno, respectivamente. O relativo incremento de eventos estratiformes em Janeiro e Fevereiro está associado a episódios de ZCAS. A frequência de eventos convectivos é máxima em Março (82.6%), enquanto que para eventos estratiformes é máxima em Julho (91.7%).

A Figura 3.6 mostra as frequências mensais para os diferentes tipos de sistemas. A CI é o sistema mais frequente entre os meses de Novembro e Abril. A BM também tem sua maior atuação neste período. As Linhas de Instabilidade tem menor frequência em todos os meses, exceto junho e julho. As Frentes Frias são os sistemas dominantes de Maio a Outubro, embora também ocorram durante todo o ano. As Bandas Dispersas atuam em todo o ano, com um pico de atuação nos meses de verão (provavelmente devido as ZCAS que ocorrem neste período) e nos meses de Agosto e Setembro, associadas a frentes frias. Estas análises foram feitas através de uma cautelosa observação dos campos de precipitação derivados de arquivos CAPPI do radar.

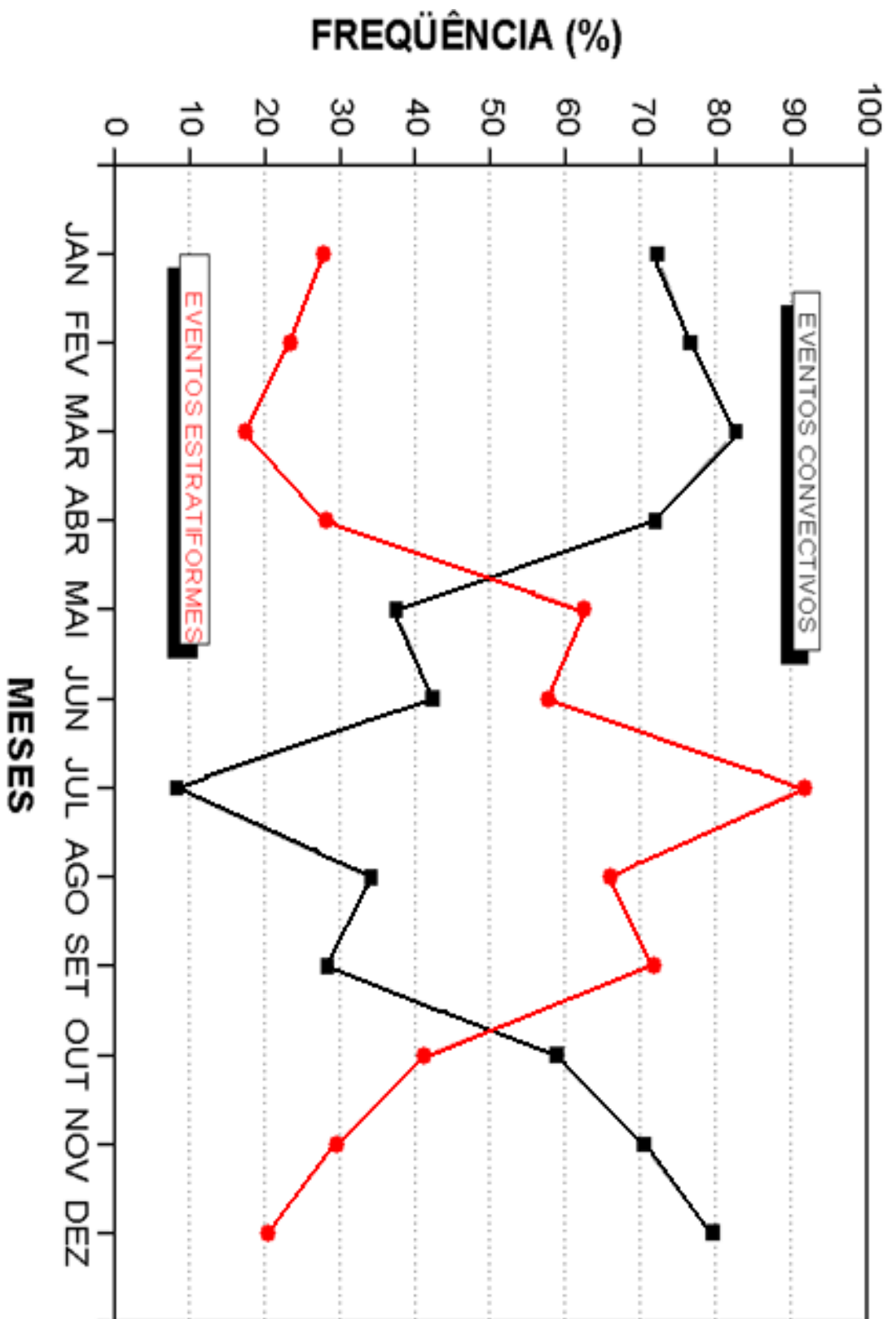


Figura 3.5 Frequências mensais de eventos convectivos e estratiformes

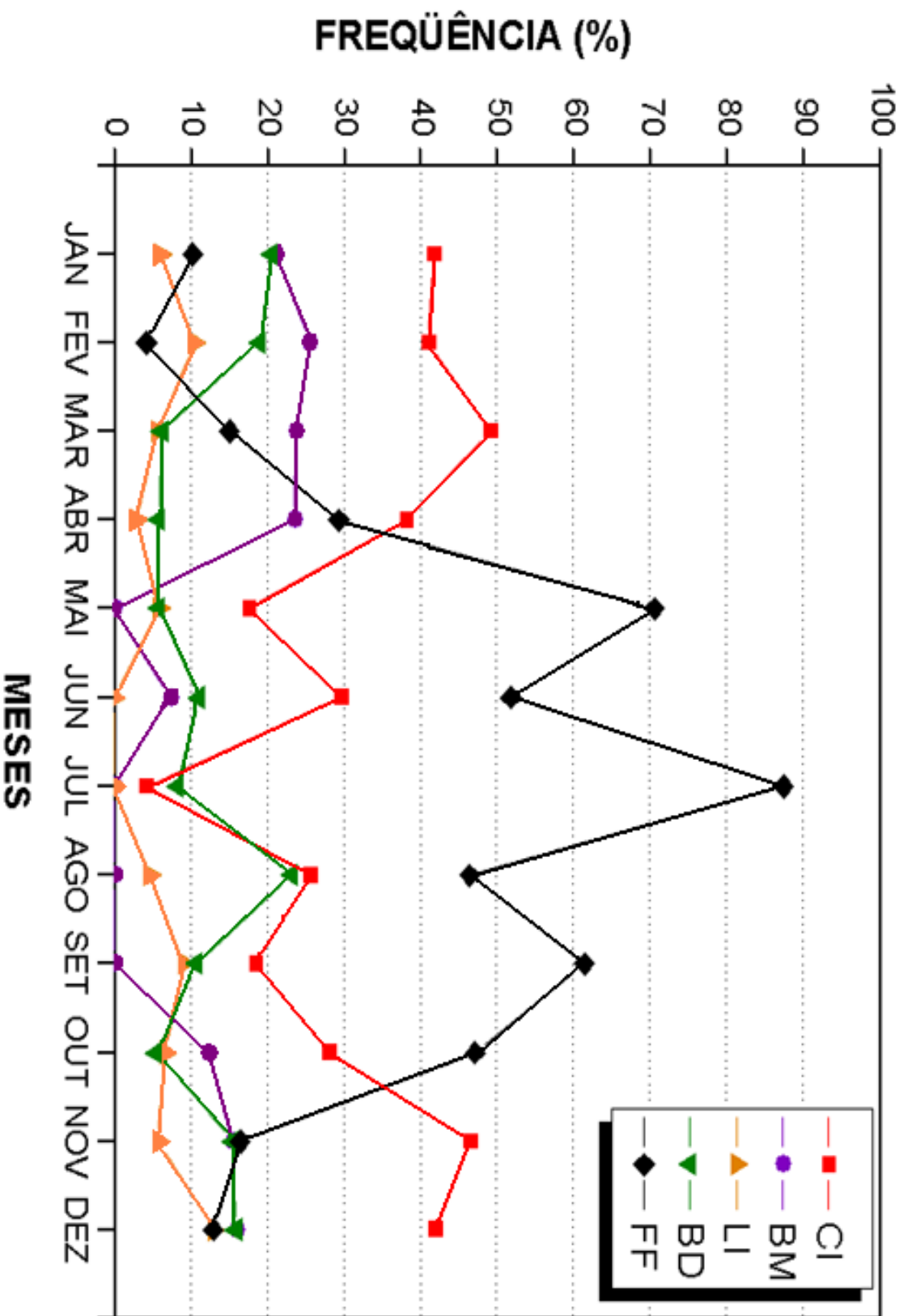


Figura 3.6 Frequências mensais dos diferentes tipos de sistemas de precipitação.

### **3.2 Comparações entre as precipitações estimadas pelo Radar meteorológico de São Paulo e medidas pela Rede Telemétrica do Alto Tietê.**

As Tabelas 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 apresentam os resultados das comparações para cada um dos tipos de sistemas precipitantes ocorridos em 1999 e 2000. Para cada evento de precipitação estimou-se o viés médio (Eq 5), em função da acumulação total média dos pluviômetros ( $\Sigma Pt$ ) e dos pixels do radar correspondentes ( $\Sigma Pr$ ) e coeficientes de correlação (Eq 6) para intervalos de acumulação de 10, 30, e 60 minutos. Um viés médio maior (menor) do que 1.0 indicam que o radar superestimou (subestimou) a precipitação. O coeficiente de correlação indica a marcha temporal das acumulações derivadas do radar, contra os respectivos pluviômetros.

Os resultados dos 92 dias estudados de 1999 e 2000 mostram que o radar, na maioria dos casos, tende a superestimar a precipitação. Em geral, as correlações aumentam com o tempo de acumulação, o que sugere uma diminuição da variância espacial, para acumulações mais longas.

Tabela 3.1 Comparações entre as precipitações médias estimadas pela rede telemétrica do Alto Tietê e estimadas pelo radar meteorológico de São Paulo, para casos de CI. N é o número de estações usadas para comparação com o radar.  $\Sigma Pt$  e  $\Sigma Pr$  são as precipitações médias da telemetria e do radar, o viés entre os dados e os respectivos coeficientes de correlações para os intervalos de acumulação citados.

Eventos de CI	N	$\Sigma Pt$	$\Sigma Pr$	Viés $\Sigma PR/\Sigma PT$	$\rho$ 10min	$\rho$ 30min	$\rho$ 1hora
09/01/1999	13	5,6	14,7	2,6	0,44	0,49	0,50
11/01/1999	15	7,8	49,6	6,4	0,20	0,19	0,16
13/01/1999	12	0,9	11,7	13,4	0,29	0,44	0,45
14/01/1999	12	42,9	136,6	3,2	0,40	0,47	0,51
22/01/1999	15	0,8	18,6	22,5	0,76	0,88	0,88
23/01/1999	14	2,3	16,4	7,0	0,53	0,66	0,66
27/01/1999	14	1,9	16,0	8,3	0,29	0,33	0,40
01/02/1999	13	6,7	30,6	4,6	0,41	0,46	0,50
10/02/1999	15	48,3	70,1	1,5	0,72	0,82	0,88
16/02/1999	13	0,4	4,3	10,9	0,37	0,45	0,50
18/02/1999	14	0,3	10,6	33,6	0,58	0,65	0,68
19/02/1999	15	0,8	10,9	14,0	0,70	0,81	0,86
20/02/1999	15	14,3	45,7	3,2	0,50	0,53	0,56
22/02/1999	14	24,3	89,8	3,7	0,48	0,57	0,61
23/02/1999	16	17,0	37,7	2,2	0,64	0,70	0,73
25/02/1999	13	30,3	80,3	2,6	0,51	0,57	0,58
26/02/1999	14	47,3	96,4	2,0	0,58	0,63	0,65
27/02/1999	13	7,2	21,1	2,9	0,52	0,58	0,61
01/03/1999	13	25,8	59,7	2,3	0,57	0,68	0,81
09/03/1999	14	28,8	70,2	2,4	0,50	0,58	0,65
08/09/1999	14	20,5	34,1	1,7	0,73	0,83	0,89
27/10/1999	15	11,2	22,8	2,0	0,70	0,78	0,81
08/11/1999	13	10,3	11,2	1,1	0,68	0,78	0,81
09/11/1999	14	3,2	1,4	0,4	0,18	0,23	0,28
20/11/1999	14	8,8	25,6	2,9	0,61	0,70	0,76
22/11/1999	17	1,0	14,1	14,8	0,68	0,76	0,76
23/11/1999	17	3,3	27,0	8,3	0,66	0,72	0,74
26/11/1999	15	6,1	33,8	5,6	0,64	0,77	0,83
04/12/1999	17	1,3	1,0	0,8	0,61	0,62	0,65
06/12/1999	16	16,9	37,1	2,2	0,50	0,57	0,58
07/12/1999	16	1,5	4,8	3,3	0,66	0,76	0,80
08/12/1999	16	3,5	9,2	2,7	0,77	0,85	0,86
22/02/2000	18	27,0	30,8	1,1	0,60	0,69	0,75
16/03/2000	10	17,6	22,3	1,3	0,82	0,90	0,95
17/03/2000	14	8,9	13,3	1,5	0,58	0,63	0,69
04/10/2000	16	21,1	20,9	1,0	0,68	0,75	0,85
14/12/2000	12	13,6	18,4	1,3	0,87	0,82	0,86



Tabela 3.2 Análoga a Tabela 3.1, exceto para casos de BM.

Eventos de BM	N	$\Sigma Pt$	$\Sigma Pr$	Viés $\Sigma PR/\Sigma PT$	$\rho$ 10min	$\rho$ 30min	$\rho$ 1hora
10/01/1999	13	1,3	4,2	3,3	0,45	0,38	0,38
12/01/1999	14	1,4	7,8	5,5	0,14	0,18	0,22
24/01/1999	15	0,03	0,4	16,0	0,12	0,11	0,07
25/01/1999	14	0,8	6,7	8,1	0,47	0,50	0,52
26/01/1999	10	34,3	110,1	3,2	0,49	0,53	0,54
03/02/1999	14	0,0	0,1	0,0	///	///	///
04/02/1999	15	15,2	51,4	3,4	0,62	0,69	0,76
24/02/1999	14	25,1	49,9	2,0	0,65	0,73	0,74
02/03/1999	10	7,3	13,5	1,9	0,76	0,84	0,83
05/12/1999	16	4,7	4,0	0,9	0,65	0,79	0,83
13/12/2000	09	14,4	18,8	1,3	0,76	0,84	0,85

Tabela 3.3 Análoga a Tabela 3.1, exceto para casos de LI.

Eventos de LI	N	$\Sigma Pt$	$\Sigma Pr$	Viés $\Sigma PR/\Sigma PT$	$\rho$ 10min	$\rho$ 30min	$\rho$ 1hora
02/02/1999	14	2,1	17,1	8,1	0,64	0,72	0,81
10/03/1999	14	26,3	29,3	1,1	0,81	0,86	0,90
23/03/1999	14	16,6	47,7	2,9	0,42	0,45	0,48
30/03/1999	17	3,8	22,7	6,0	0,52	0,61	0,64
03/12/1999	16	3,5	24,4	6,9	0,46	0,57	0,61
25/11/2000	16	33,6	72,7	2,2	0,35	0,38	0,40
24/12/2000	15	25,5	45,0	1,8	0,65	0,67	0,69

Tabela 3.4 Análoga a Tabela 3.1, exceto para casos de BD.

Eventos de BD	N	$\Sigma Pt$	$\Sigma Pr$	Viés $\Sigma PR/\Sigma PT$	$\rho$ 10min	$\rho$ 30min	$\rho$ 1hora
01/01/1999	15	32,4	91,8	2,8	0,60	0,68	0,76
02/01/1999	13	3,2	20,2	6,4	0,39	0,45	0,49
05/01/1999	12	32,9	117,4	3,6	0,65	0,72	0,77
06/01/1999	11	23,0	40,9	1,8	0,63	0,69	0,73
07/01/1999	15	20,5	26,4	1,3	0,37	0,42	0,51
08/01/1999	13	14,7	46,9	3,2	0,49	0,49	0,50
15/01/1999	14	4,3	43,5	10,1	0,43	0,55	0,63
17/02/1999	14	1,2	4,8	4,2	0,20	0,24	0,20
21/02/1999	12	9,7	35,2	3,6	0,65	0,71	0,74
12/11/1999	13	17,8	11,2	0,6	0,47	0,59	0,72
01/01/2000	12	46,8	69,6	1,5	0,59	0,67	0,71
02/01/2000	09	20,5	49,2	2,4	0,44	0,53	0,58
26/01/2000	16	48,0	23,0	0,5	0,56	0,64	0,70
10/02/2000	16	24,6	19,9	0,8	0,62	0,67	0,73
12/02/2000	16	22,3	41,7	1,9	0,58	0,65	0,69

Tabela 3.5 Análoga a Tabela 3.1, exceto para casos de FF.

Eventos de FF	N	$\Sigma Pt$	$\Sigma Pr$	Viés $\Sigma PR/\Sigma PT$	$\rho$ 10min	$\rho$ 30min	$\rho$ 1hora
11/03/1999	13	33,5	46,1	1,4	0,57	0,65	0,71
12/03/1999	13	4,1	8,9	2,1	0,62	0,70	0,82
14/04/1999	14	21,7	62,9	2,9	0,72	0,80	0,78
06/05/1999	16	24,8	83,4	3,4	0,71	0,80	0,84
29/05/1999	17	2,1	9,8	4,6	0,77	0,86	0,88
19/06/1999	14	5,7	15,2	2,7	0,73	0,82	0,85
20/06/1999	15	37,4	87,4	2,3	0,49	0,59	0,71
04/07/1999	15	10,0	23,3	2,3	0,52	0,65	0,70
05/07/1999	15	10,6	23,4	2,2	0,58	0,68	0,75
09/09/1999	15	2,3	7,3	3,1	0,64	0,78	0,93
02/10/1999	13	2,1	5,1	2,4	0,76	0,83	0,84
08/10/1999	09	2,9	5,6	1,9	0,75	0,88	0,93
16/10/1999	12	11,7	43,1	3,7	0,45	0,50	0,55
17/10/1999	12	5,3	14,9	2,8	0,60	0,65	0,74
13/12/1999	16	10,1	30,9	3,1	0,81	0,89	0,93
22/12/1999	16	10,1	19,0	1,9	0,83	0,87	0,89
07/03/2000	16	15,6	12,5	0,8	0,50	0,61	0,67
20/06/2000	18	10,9	14,8	1,4	0,64	0,72	0,73
15/07/2000	13	29,6	31,3	1,1	0,57	0,67	0,73
01/09/2000	17	32,6	39,0	1,2	0,60	0,74	0,81
12/09/2000	18	23,0	22,5	1,0	0,73	0,84	0,88
13/11/2000	17	42,0	29,3	0,7	0,48	0,57	0,63

A Tabela 3.6 apresenta os valores médios para cada um dos cinco tipos de sistemas examinados.

Tabela 3.6 Análogo à Tab 3.1, exceto para a média de cada um dos cinco sistemas analisados.

Eventos	N	$\Sigma Pt$	$\Sigma Pr$	Viés $\Sigma PR/\Sigma PT$	$\rho$ 10min	$\rho$ 30min	$\rho$ 1hora
CI	14	9,73	29,83	6,96	0,54	0,62	0,65
BM	14	8,35	26,18	4,81	0,46	0,51	0,52
LI	15	6,50	27,98	5,98	0,51	0,59	0,64
BD	13	18,60	49,79	3,73	0,50	0,57	0,64
FF	14	12,15	30,39	2,68	0,66	0,75	0,80

Nota-se, da tabela 3.6 que os melhores resultados foram obtidos para os casos de frentes frias nos três intervalos de acumulação. O menor viés para as frentes frias é devido à natureza mais uniforme da precipitação espacial com grandes áreas de taxas homogêneas. Os casos de convecção isolada apresentaram o maior viés, devido a sua estrutura espacial mais isolada e aleatória, com diferenças de até 30 vezes (Tab. 3.1) entre as medidas pluviométricas e do radar. Os casos de brisa marítima apresentaram as menores correlações para os intervalos de acumulação dados, por serem sistemas de curta duração e apresentarem precipitação tanto de natureza convectiva quanto estratiforme.

### **3.3 Correlações Espaciais derivadas da precipitação estimada com o Radar meteorológico de São Paulo.**

A metodologia descrita na seção 2.5.2 foi aplicada aos dados nas datas da (Tabela 3.7). Estes eventos foram separados de acordo com as categorias de sistemas às quais pertencem, de acordo com a classificação morfológica já estabelecida. As estruturas das correlações em função das distâncias para as acumulações de 15, 30, 60 e 120 minutos foram então estimadas para cada um dos cinco tipos de sistemas. O esquema de ANOBES foi depois aplicado a casos independentes.

Tabela 3.7 – Séries de dados do radar meteorológico de São Paulo usados para a obtenção das correlações espaciais dos sistemas. São mostradas as datas dos eventos, classificação quanto ao tipo de precipitação e ao tipo de sistema. Os números em azul indicam o total de eventos usados para cada tipo de sistema.

Sistemas e dias usados para obtenção das correlações espaciais					
Ordem	CI	BM	LI	BD	FF
1	20/01/1998	20/01/1998	02/03/1998	01/03/1998	17/01/1998
2	21/01/1998	21/01/1998	04/03/1998	02/03/1998	10/03/1998
3	05/03/1998	06/03/1998	15/09/1998	03/03/1998	11/03/1998
4	07/03/1998	08/03/1998	27/09/1998	28/09/1998	18/03/1998
5	27/09/1998	13/12/1998	03/10/1998	29/09/1998	28/03/1998
6	09/12/1998	14/12/1998	06/10/1998	30/09/1998	29/03/1998
7	10/12/1998	16/12/1998	11/10/1998	01/10/1998	14/08/1998
8	12/12/1998	10/01/1999	18/11/1998	16/10/1998	05/09/1998
9	15/12/1998	11/01/1999	17/12/1998	30/10/1998	06/09/1998
10	22/12/1998	12/01/1999	22/12/1998	03/11/1998	07/09/1998
11	25/12/1998	04/02/1999	23/12/1998	04/12/1998	08/09/1998
12	27/12/1998	24/02/1999	02/02/1999	05/12/1998	09/09/1998
13	09/01/1999	28/02/1999	26/02/1999	09/12/1998	18/09/1998
14	10/01/1999	03/04/1999	07/03/1999	10/12/1998	20/09/1998
15	27/01/1999	24/12/1999	23/03/1999	11/12/1998	21/09/1998
16	18/02/1999	27/12/1999	30/03/1999	24/12/1998	03/10/1998
17	19/02/1999	28/01/2002	24/11/1999	25/12/1998	04/10/1998
18	20/11/1999	11/02/2002	03/12/1999	02/01/1999	06/10/1998
19	22/11/1999	12/02/2002	14/01/2002	05/01/1999	07/10/1998
20	23/11/1999	19/10/2002	22/01/2002	06/01/1999	08/10/1998
21	10/12/1999	20/11/2002	07/09/2002	07/01/1999	09/10/1998
22	11/01/2002	22/11/2002	04/11/2002	10/11/1999	11/10/1998
23	14/01/2002	24/11/2002	04/12/2002	12/11/1999	16/10/1998
24	20/01/2002	27/11/2002	05/12/2002	11/01/2002	17/10/1998
25	21/01/2002	02/12/2002	07/12/2002	12/01/2002	21/10/1998
26	22/01/2002	03/12/2002	23/12/2002	13/01/2002	21/11/1998
27	23/01/2002	09/12/2002	24/12/2002	19/01/2002	14/04/1999
28	24/01/2002	17/12/2002	25/12/2002	27/01/2002	15/04/1999
29	25/01/2002	31/12/2002		07/02/2002	19/06/1999
30	06/02/2002			09/02/2002	20/06/1999
31	13/02/2002			16/02/2002	20/06/1999
32	16/02/2002			23/02/2002	04/07/1999
33	09/09/2002			22/05/2002	05/07/1999
34	26/10/2002			12/11/2002	22/12/1999
35	29/10/2002			13/11/2002	23/12/1999
36	04/11/2002			29/11/2002	14/01/2002
37	05/11/2002			11/12/2002	15/01/2002
38	11/11/2002			12/12/2002	25/01/2002
39	14/11/2002			21/12/2002	28/02/2002
40	16/11/2002				01/09/2002
41	17/11/2002				07/09/2002
42	19/11/2002				09/09/2002
43	28/11/2002				13/09/2002
44	29/11/2002				14/09/2002
45	01/12/2002				21/09/2002
46	04/12/2002				22/09/2002
47	06/12/2002				24/09/2002

Tabela 3.7 – Continuação.

48	07/12/2002	01/10/2002
49	14/12/2002	22/10/2002
50	20/12/2002	25/10/2002
51	21/12/2002	26/10/2002
52	23/12/2002	30/10/2002
53	24/12/2002	04/11/2002
54		05/11/2002
55		10/11/2002
56		11/11/2002
57		26/11/2002
58		30/11/2002
59		05/12/2002
60		07/12/2002
61		08/12/2002
62		25/12/2002

Um total de 177 dias com eventos foi analisado, em alguns destes dias mais de um sistema diferente atuou, por isso na tabela algumas datas coincidem para um ou mais sistemas. Para os casos de CI, foram usados dados de 53 dias, 29 dias para BM, 28 para LI, 39 para BD e 62 para eventos de FF. Estes números representam cerca de 30 % do total de dias em que ocorreram estes sistemas com séries de acumulações completas. Houve muitos dias com dados de eventos incompletos.

Desta forma, os coeficientes de correlações espaciais (Equação 18) foram calculados para os quatro intervalos de acumulação mencionados, para cada um dos cinco tipos de sistemas independentes: CI, BM, LI, BD e FF. As curvas ajustadas do componente isotrópico das funções de correlações espaciais médias de todos os eventos de precipitação de cada sistema foram ajustadas por funções polinomiais de sexta ordem, com exceção apenas dos casos de convecção isolada para 60 e 120 minutos de acumulação. As curvas das Figuras 3.7 a 3.11, mostram as correlações médias ajustadas em função da distância, e decrescem monotonicamente satisfazendo a condição imposta pela Equação 16.

### Correlações Espaciais - Convecção Isolada

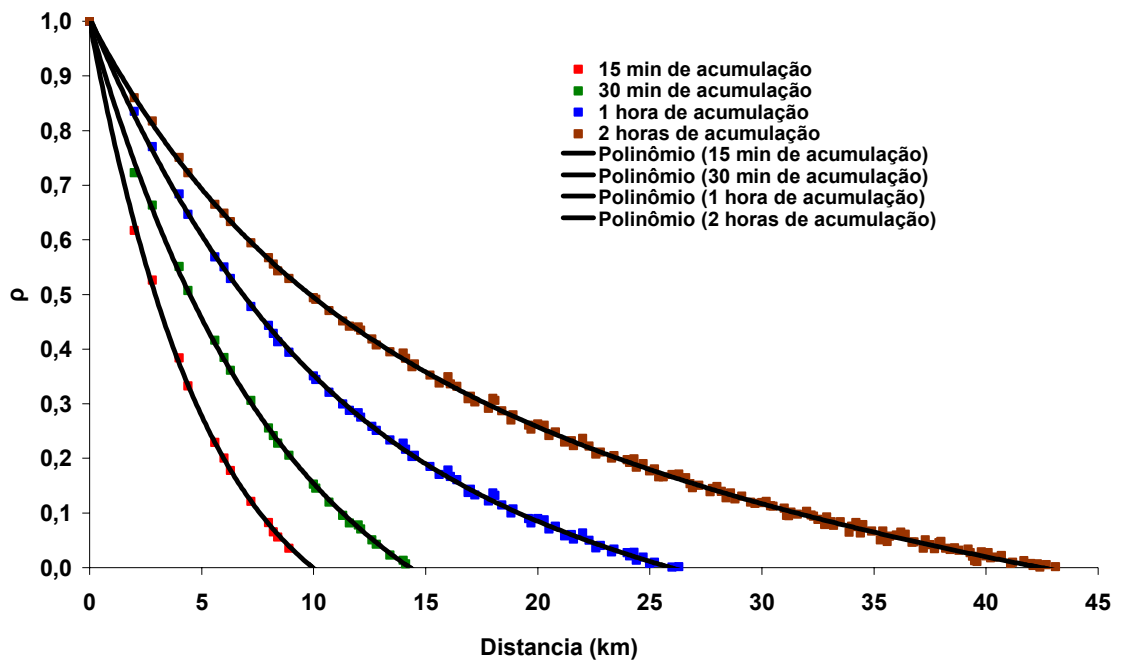


Figura 3.7 Coeficientes de correlação espacial médios estimados de acumulações de precipitação com o radar meteorológico de São Paulo para pixels de 2km x 2 km, para o caso de Convecção Isolada. Os intervalos de tempo das acumulações são indicados, bem como a curva polinomial que melhor ajusta os dados.

### Correlações Espaciais - Brisa Marítima

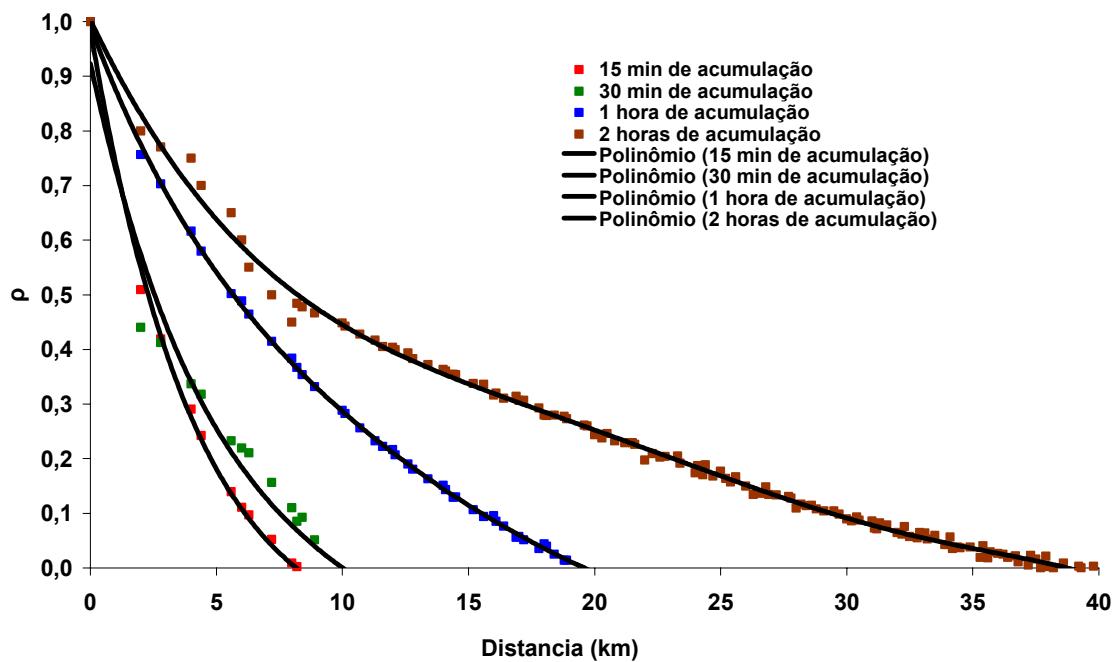


Figura 3.8 Idêntica à figura 3.7, mas para os casos de Brisa Marítima.

### Correlações Espaciais - Linhas de Instabilidade

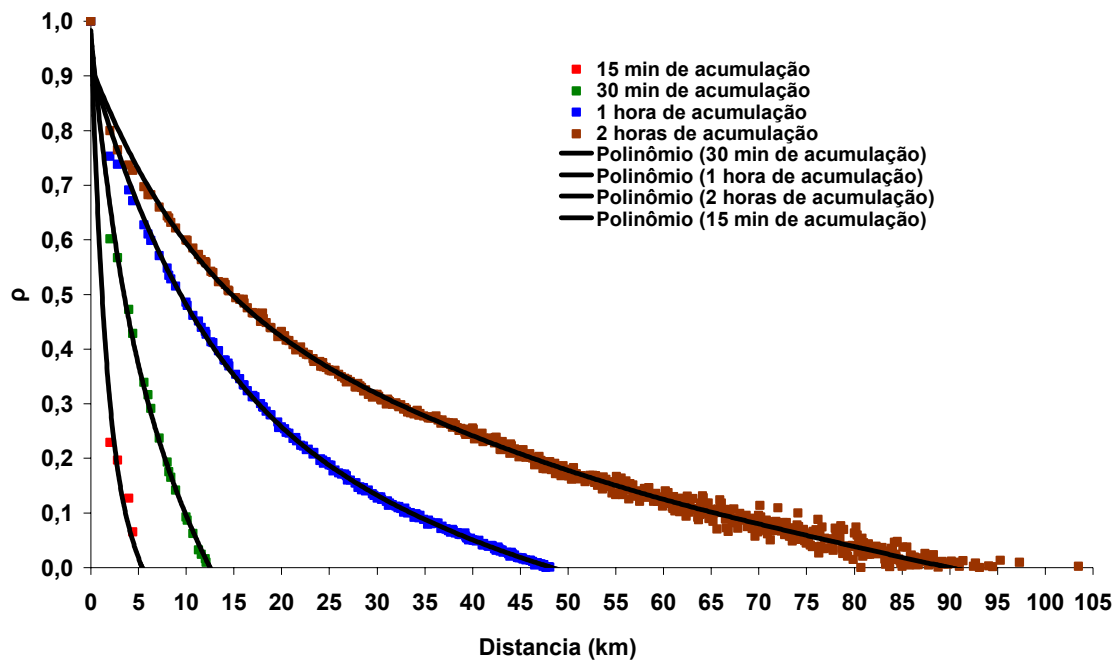


Figura 3.9 Idêntica à figura 3.7, mas para os casos de Linhas de Instabilidade.

### Correlações Espaciais - Frentes Frias

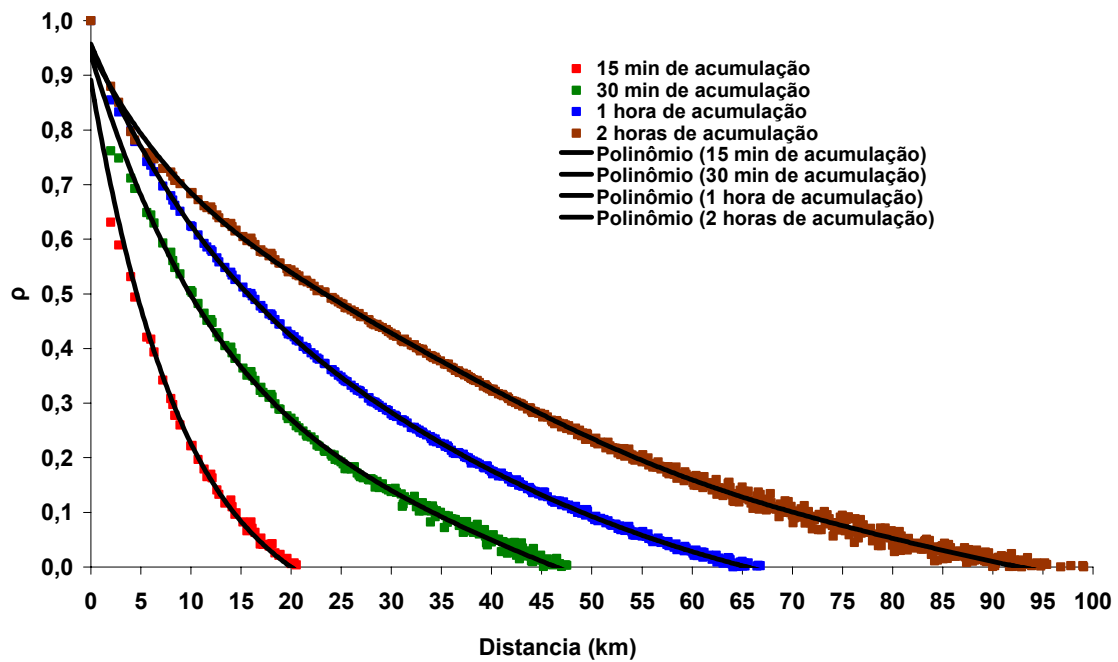


Figura 3.10 Idêntica à figura 3.7, mas para os casos de Frentes Frias.

### Correlações Espaciais - Bandas Dispersas

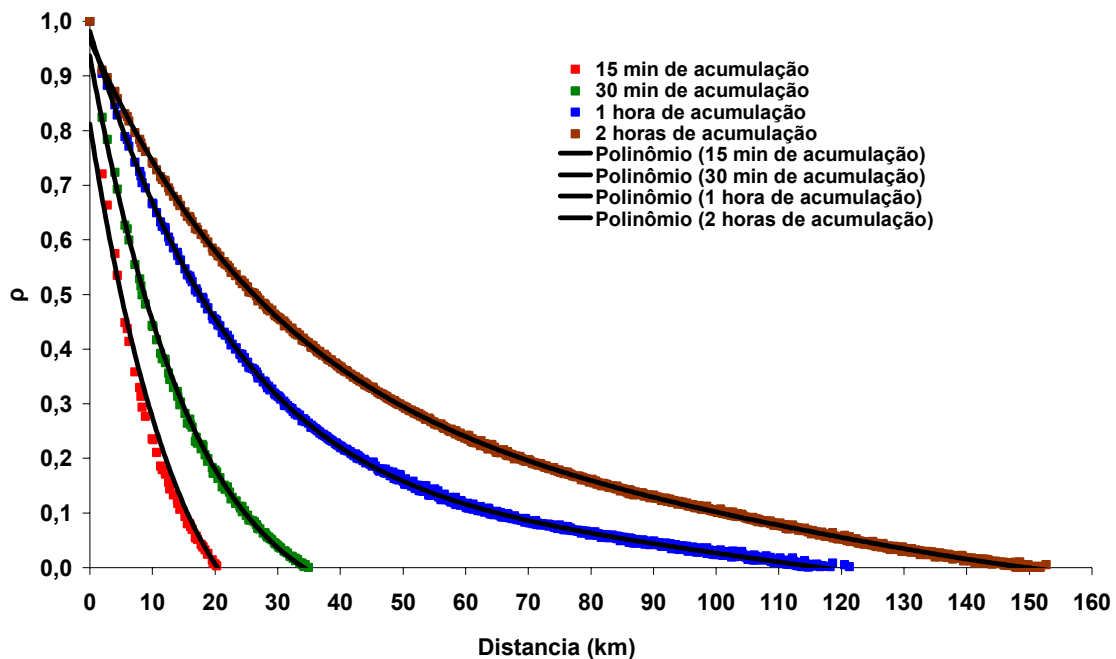


Figura 3.11 Idêntica à figura 3.7, mas para os casos de Bandas Dispersas de Precipitação.

Os eventos de convecção isolada são caracterizados pela sua curta vida, a função de correlação espacial diminui rapidamente com a distância nos intervalos de acumulação descritos acima. A correlação espacial diminui para 0,5 em 2,5 km para 15 minutos de acumulação, 5 km para 30 minutos de acumulação, 7,5 km para 60 minutos de acumulação e 10 km para 120 minutos de acumulação. Os valores de correlação chegam a zero em 10, 15, 25 e 45 km para 15, 30, 60 e 120 minutos, respectivamente. Desta forma, esses sistemas mantêm uma coerência espacial muito limitada por cobrirem áreas relativamente pequenas. Por outro lado, a propagação destes sistemas é limitada. Ao se acumular a precipitação para intervalos mais longos de tempo, esta pode ser devido a mais de uma célula



convectiva, talvez forçada e advectada neste intervalo de tempo, com a precipitação estratiforme em seu estágio final de vida.

Para eventos de Brisa Marítima, a correlação diminui para 0,5 em 2,5 km e 5 km em 15 e 30 minutos de acumulação. Para 60 e 120 minutos de acumulação, a correlação cai para 0,5 em 6 e 8,5 km, respectivamente. Em comparação às CI, percebe-se que a precipitação dos píxeis do radar associada a brisa marítima mantém correlação com os píxeis vizinhos por um intervalo de tempo ainda menor. Isto também ocorre devido à precipitação associada à brisa ser de curta duração, na maior parte das vezes sob a forma de núcleos convectivos alinhados devido a efeitos orográficos, com propagação menos lenta. As correlações caem para zero para distâncias de 8,5, 10, 20 e 40 km para 15, 30, 60 e 120 minutos de acumulação, respectivamente.

As curvas de correlação espacial das Linhas de Instabilidade apresentam características semelhantes a CI e a BM para os intervalos de acumulação de 15 e 30 minutos. A correlação diminui para 0,5 em 2 e 4 km, respectivamente, devido ao deslocamento limitado pelo tempo de acumulação. Este tipo de sistema se desloca mais rapidamente do que os demais sistemas analisados. As áreas de maior acumulação são aquelas associadas com as células convectivas na dianteira da LI. Desta forma, tem características similares aos casos de CI e BM. Assim, para os intervalos de 60 e 120 minutos, a correlação diminui para 0,5 em 50 e 100 km, respectivamente. A contribuição da região estratiforme para estes intervalos de acumulação é mais significativa e mais abrangente em área. Dentre os eventos predominantemente convectivos (CI, BM e LI), as Linhas de instabilidade apresentam a maior coerência espacial para intervalos de acumulação mais longos.

Frentes frias e bandas dispersas de precipitação são semelhantes para os intervalos de acumulação de 15 e 30 minutos. A correlação espacial diminui para 0,5 em 20 km em 15 minutos, e 35 km e 45 km para 30 minutos de acumulação, aproximadamente. Para os intervalos de acumulação de 60 e 120 minutos, há diferenças da ordem de 10 km, a correlação cai a 0,5 em 20 e 30 km, respectivamente. A correlação é nula em 65 e 100 km no caso das frentes frias e 120 e 150 km no caso das bandas dispersas. As bandas dispersas são sistemas precipitantes ainda mais uniformes do que as frentes frias, com áreas de precipitação mais extensas e de mais longa duração.

Os sistemas precipitantes apresentam anisotropia (Huff e Shipp 1969). Thiebaut (1976) mostrou que a anisotropia da função de correlação é uma fonte de erros significativa para o esquema de interpolação nas regiões onde a densidade de estações é muito baixa ou irregular. Entretanto, nesta pesquisa a natureza anisotrópica da função de correlação foi negligenciada.

As Tabelas 3.8 a 3.12 são apresentadas os coeficientes dos polinômios ajustados aos quatro intervalos de acumulação; 15, 30, 60 e 120 minutos, para os cinco tipos de sistemas analisados.

A equação polinomial de sexta ordem ajustada é do tipo:

$$y(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 + a_6x^6$$

Tabela 3.8 Coeficientes dos Polinômios das Curvas de melhor ajuste das Correlações Espaciais para sistemas do tipo Convecção Isolada.

<b>CI</b>	<b>X6</b>	<b>X5</b>	<b>X4</b>	<b>X3</b>	<b>X2</b>	<b>X1</b>	<b>X0</b>
15 min	2,06E-9	-3,57E-7	2,51E-5	-9,18E-4	1,88E-2	-2,18E-1	0,998
30 min	1,96E-11	-2,56E-8	4,00E-6	-2,41E-4	7,65E-3	-1,40E-1	0,995
1 hora				-2,11E-5	2,13E-3	-7,81E-2	0,947
2 horas			3,58E-7	-4,67E-5	2,42E-3	-6,93E-2	0,989

Tabela 3.9 Análoga à Tabela 3.8, exceto para Brisa Marítima.

<b>BM</b>	<b>X6</b>	<b>X5</b>	<b>X4</b>	<b>X3</b>	<b>X2</b>	<b>X1</b>	<b>X0</b>
15 min	6,82E-9	-1,00E-6	5,88E-5	-1,77E-3	2,94E-2	-2,70E-1	0,985
30 min	6,09E-9	-8,28E-7	4,53E-5	-1,29E-3	2,11E-2	-2,12E-1	0,923
1 hora	2,18E-9	-3,03E-7	1,68E-5	-4,89E-4	8,83E-3	-1,24E-1	0,991
2 horas	-3,17E-9	3,25E-7	-1,05E-5	4,85E-5	3,86E-3	-9,14E-2	0,999

Tabela 3.10 Análoga à Tabela 3.8, exceto para Linhas de Instabilidade.

<b>LI</b>	<b>X6</b>	<b>X5</b>	<b>X4</b>	<b>X3</b>	<b>X2</b>	<b>X1</b>	<b>X0</b>
15 min	6,03E-7	-4,40E-5	1,26E-3	-1,79E-2	1,33E-1	-5,44E-1	0,983
30 min	1,30E-8	-1,45E-6	6,41E-5	-1,47E-3	1,99E-2	-1,91E-1	0,977
1 hora	7,99E-12	-3,17E-9	5,07E-7	-4,21E-5	2,01E-3	-6,00E-2	0,917
2 horas	8,80E-12	-3,13E-9	4,53E-7	-3,46E-5	1,53E-3	-4,47E-2	0,918

Tabela 3.11 Análoga à Tabela 3.8, exceto para Frentes Frias.

<b>FF</b>	<b>X6</b>	<b>X5</b>	<b>X4</b>	<b>X3</b>	<b>X2</b>	<b>X1</b>	<b>X0</b>
15 min	4,40E-11	-1,52E-8	+2,07E-6	-1,42E-4	+5,21E-3	-1,06E-1	0,891
30 min	6,68E-12	-2,88E-9	+4,89E-7	-4,23E-5	+2,04E-3	-6,07E-2	0,938
1 hora	6,75E-12	-2,41E-9	+3,47E-7	-2,64E-5	+1,23E-3	-4,32E-2	0,958
2 horas	1,24E-11	-4,25E-9	+5,71E-7	-3,80E-5	+1,38E-3	-3,66E-2	0,946

Tabela 3.12 Análoga à Tabela 3.8, exceto para Bandas Dispersas.

FF	X6	X5	X4	X3	X2	X1	X0
15 min	2,31E-12	- 1,32E-9	+ 3,03E-7	- 3,54E-5	+ 2,22E-3	- 7,28E-2	0,812
30 min	1,37E-12	- 8,02E-10	+ 1,92E-7	- 2,40E-5	+ 1,67E-3	- 6,30E-2	0,937
1 hora	2,12E-13	- 1,47E-10	+ 4,43E-8	- 7,29E-6	+ 6,93E-4	- 3,76E-2	0,982
2 horas	1,38E-13	- 8,57E-11	+ 2,36E-8	- 3,80E-6	+ 3,86E-4	- 2,57E-2	0,966

Estes resultados indicam que a estimativa da chuva tende a melhorar para intervalos crescentes de acumulação, em parte por se tratar de um processo integrador com filtragem do tipo passa-baixa.

### 3.4 Aplicações da ANOBES

Uma série de dados independentes foi separada para testar o esquema da ANOBES. Três casos de cada um dos cinco tipos de sistemas foram analisados para os intervalos de acumulação de 60 e 120 minutos. O objetivo foi de avaliar o esquema para casos de precipitação fraca, moderada e intensa, de acordo com as medições dos pluviômetros da rede telemétrica e estimativas do radar meteorológico de São Paulo.

As correlações espaciais dos intervalos de acumulações de 15 e 30 minutos decrescem rapidamente com a distancia em poucos quilômetros para todos os sistemas precipitantes, CI, BM, LI, BD e FF.

Adicionalmente, constatou-se a irregularidade espacial dos pluviômetros da rede telemétrica do Alto Tietê. Desta forma, a análise do total de precipitação será para três subáreas da RMSP com diferentes conjuntos de pluviômetros. Estas três áreas foram numeradas de áreas 1, 2 e 3, (Figura 3.12). Os campos de precipitação

acumulada do radar, análise e diferença entre estes são mostrados nas áreas acima. A evolução temporal das medias de precipitação nos postos e a dos respectivos pixels do radar são também analisados. Campos das diferenças entre as estimativas de precipitação do radar e da ANOBES também são mostrados para evidenciar as áreas nas quais o radar subestimou ou superestimou a precipitação.

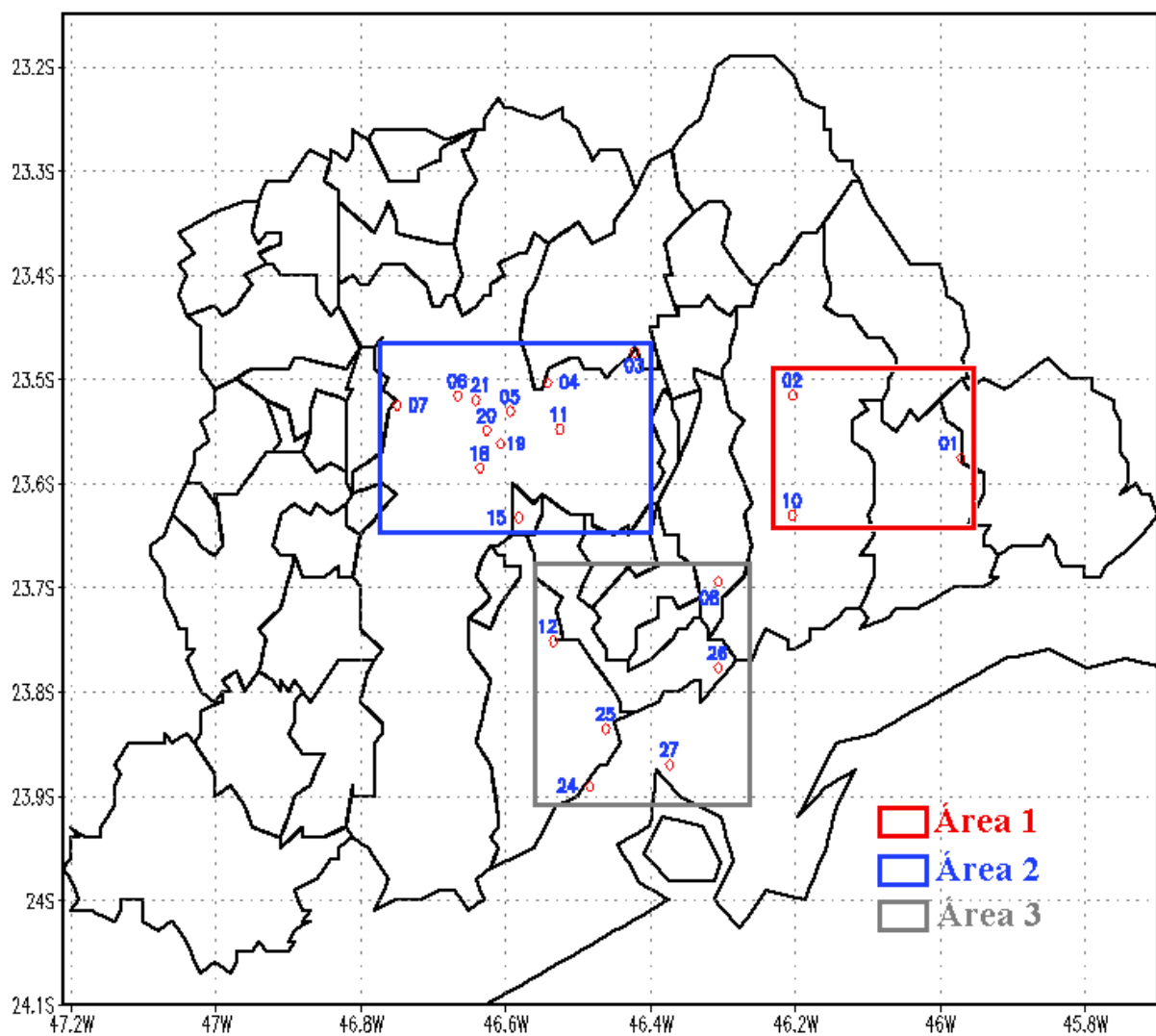


Figura 3.12 Áreas da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê onde será avaliada a integração de dados da ANOBES.

### 3.4.1 Casos de Convecção Isolada

Os casos de CI selecionados para análise do desempenho da ANOBES foram os dos dias 26/01/2000, 16/02/2000 e 25/11/2000. Utilizou-se as estatísticas relativas a este tipo de sistema.

No dia 16/02/2000 desenvolveram-se células convectivas intensas no período da tarde junto à costa. Durante a noite a precipitação de origem convectiva se intensificou inclusive nas três áreas de maior densidade de postos pluviométricos.

A Figura 3.13 mostra a evolução temporal da precipitação média para o intervalo de 60 minutos de acumulação pela telemetria, radar e ANOBES. Observa-se que a evolução temporal da precipitação medida pelos pluviômetros é coerente com a estimada com o radar. Houve um máximo de acumulação às 21 horas, de 4,29 mm. Neste mesmo horário, com a maior diferença entre pluviômetros e radar.

O radar subestimou a precipitação média em relação à telemetria. A precipitação média dos pluviômetros foi de 17,4 mm, 10,8 mm e 13,2 com a ANOBES. A Figura 3.14 mostra os campos de precipitação estimada com o radar, com a ANOBES e o campo diferença entre estes, para o período das 20:00 as 24:00 horas, quando ocorreram as maiores taxas de precipitação nas áreas de interesse. A convecção produziu áreas de chuva estratiforme. Neste caso, a ANOBES produziu resultados adequados.

As medições realizadas pelos três pluviômetros mais próximos do ponto (pixel) de análise recebem um peso que depende da sua distribuição no espaço e da correlação do erro de background. Em virtude de não se considerar o erro dessas medidas, são consideradas como “verdade de superfície”. Cada pluviômetro possui um raio de influencia na análise de forma que, na ausência de medidas de radar, tendem a ser propagadas no espaço.

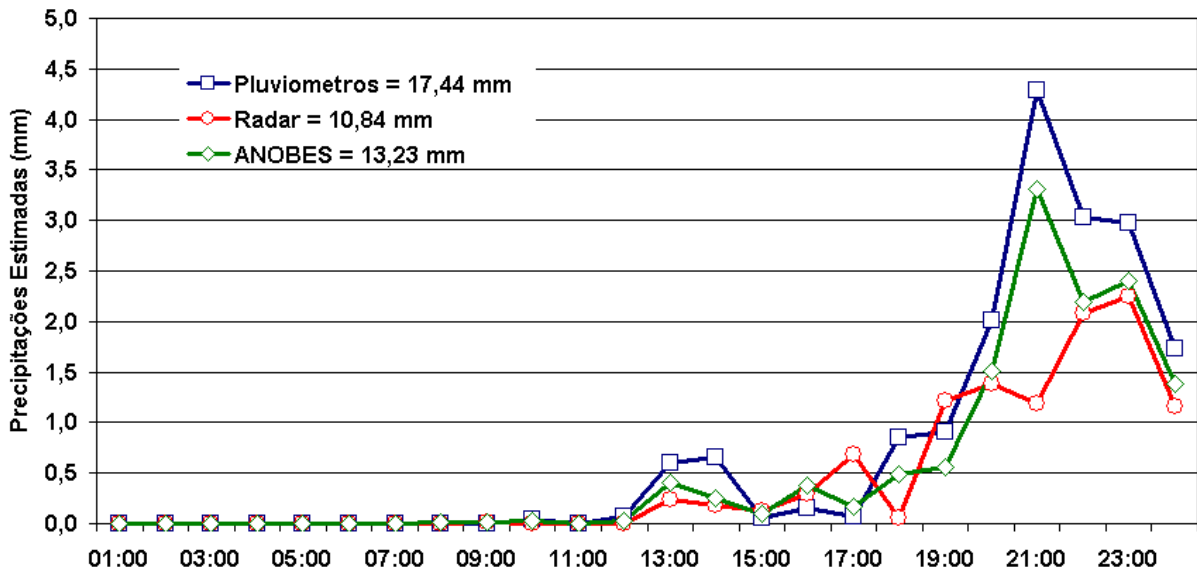


Figura 3.13 Distribuição da precipitação média horária medida pelos pluviômetros, estimadas pelo radar e corrigida pela ANOBES, para o dia 16/02/2000, para o intervalo de 60 minutos de acumulação.

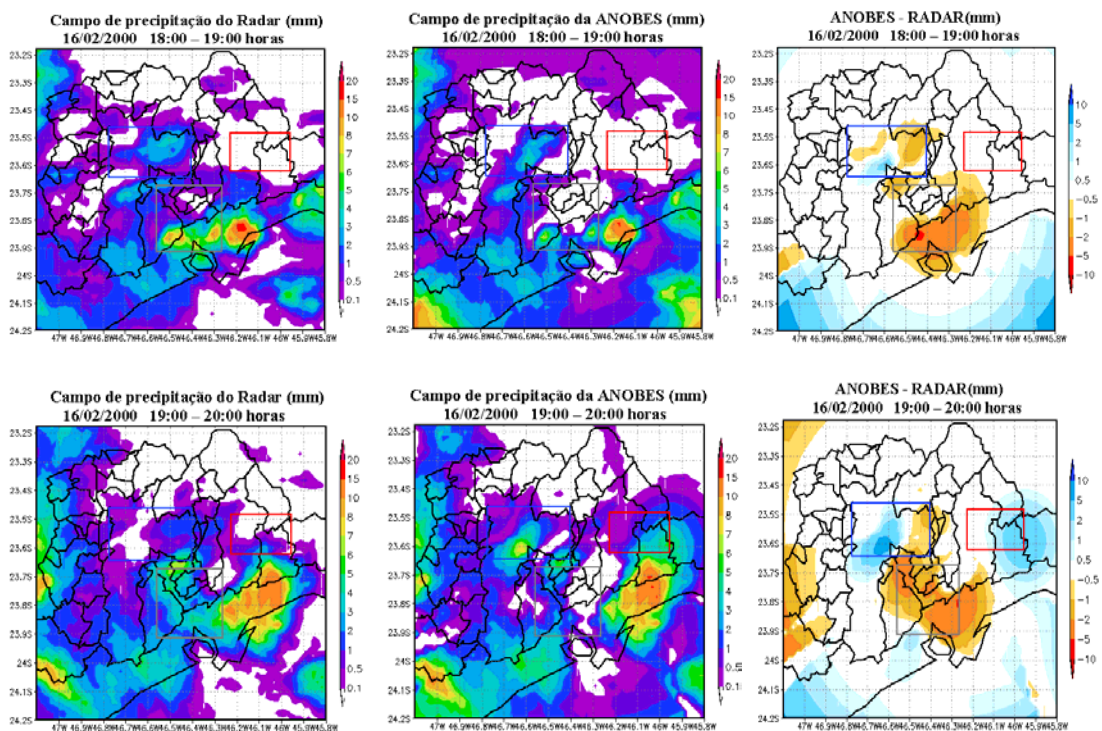


Figura 3.14 Campos de precipitação acumulada em 60 minutos no dia 16/02/2000 estimada com o (1) Radar – coluna da esquerda; (2) ANOBES – coluna do meio e (3) campo diferença entre ANOBES e Radar – coluna da direita. Retângulos azul, vermelho e cinza indicam as áreas de maior densidade de postos pluviométricos.

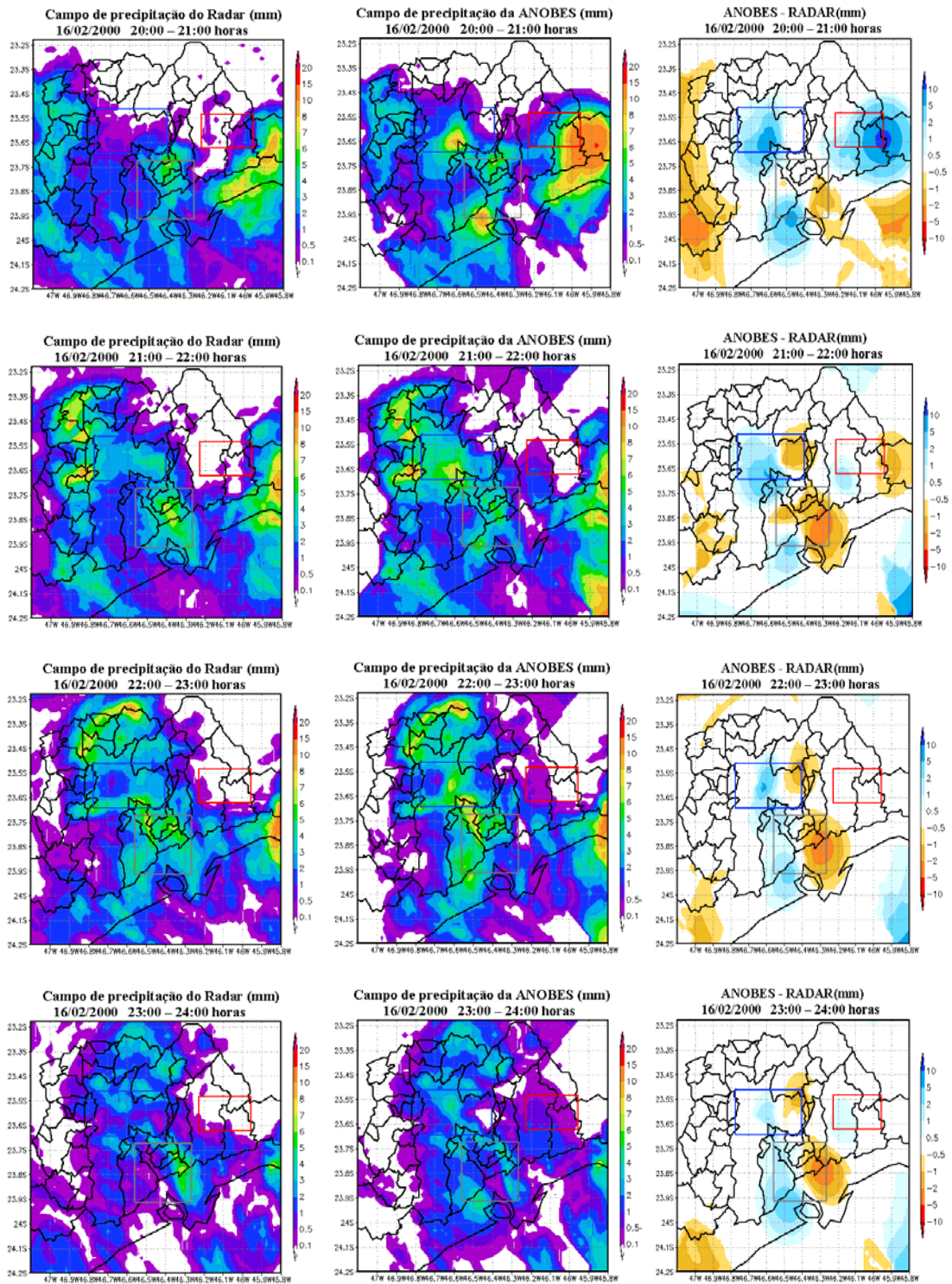


Figura 3.14 Continuação.

Os núcleos de precipitações intensas quando ocorreram próximos das estações que registraram chuvas intensas, foram incrementados na intensidade e na



área de sua abrangência. Da mesma forma foram reduzidas quando as estações registraram pouca ou nenhuma chuva. Os campos das diferenças, ou seja, o campo de precipitação acumulada estimada pela análise menos o campo do radar mostram o aumento ou redução da precipitação nas áreas de interesse. Nota-se o aumento da precipitação pela ANOBES entre 20 e 21 horas, principalmente nas áreas 1 e 2 (retângulos vermelho e azul).

A acumulação da precipitação de 120 minutos produziu resultados similares aos de 60 minutos. A Figura 3.15 mostra a distribuição de precipitação menos variável no espaço do que a de 60 minutos, por causa da advecção das nuvens de chuva pelo escoamento médio (Calveti et al, 2003).

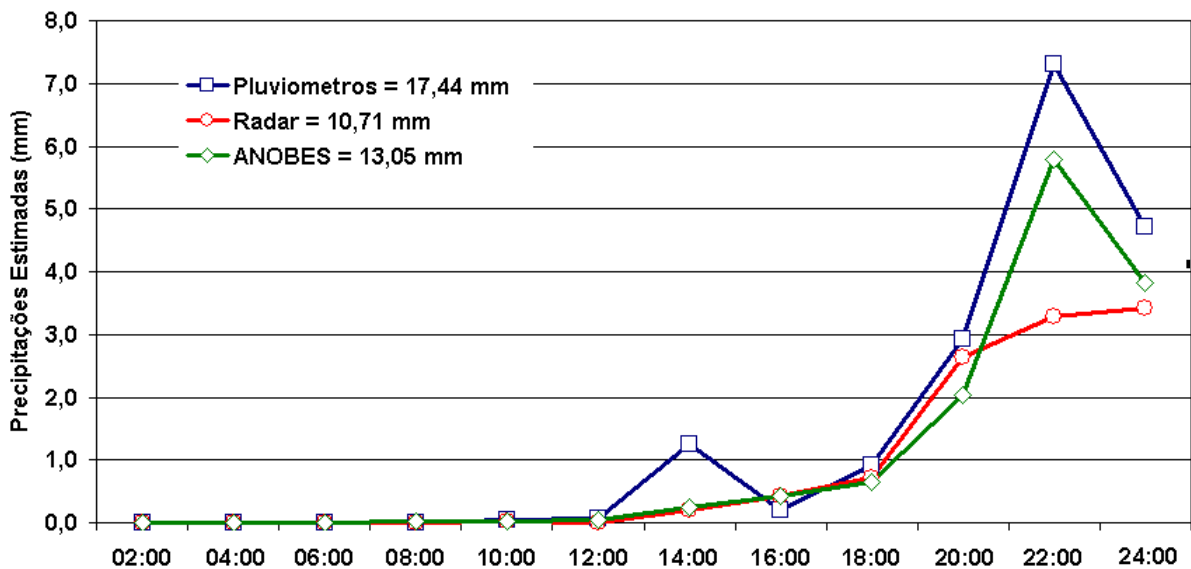


Figura 3.15 Idem a Figura 3.13, mas para 120 minutos de acumulação.

A Figura 3.16 mostra os campos de precipitação estimada do radar, pela ANOBES e o campo diferença entre estes, entre 20:00 HL e 24:00 HL.

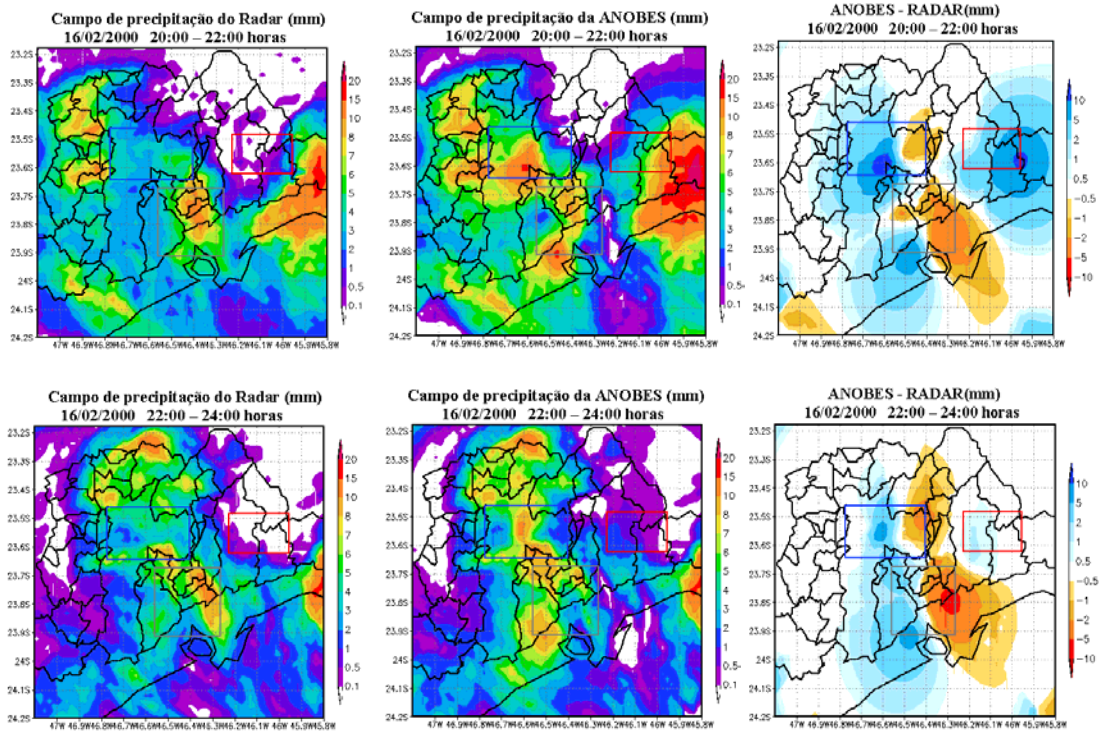


Figura 3.16 Idem a Figura 3.14, mas para intervalos de acumulação de 120 minutos, entre as 20:00 e as 24:00 horas.

Os campos de diferença de precipitação da Figura 3.16 são similares, exceto a Leste entre 20 e 22 h. Áreas de precipitação convectiva intensa podem ser vistas dentro das áreas de interesse, como nas áreas 1 e 2, entre as 20 e as 22 horas. A correlação do erro de background com a distancia é nula numa distancia de 40 km. O efeito do raio de influencia pode ser observado a Leste do retângulo vermelho, no campo diferença das 20 às 22 horas.

Em 25/11/2000 houve dois máximos de precipitação, um às 09:00 e outro as 20:00 h. Em ambos os casos, as estimativas do radar foram maiores do que as medidas pluviométricas (Fig 3.18). A ANOBES reduziu a chuva acumulada pelo radar, principalmente no período da manhã.

A figura 3.17 mostra a evolução temporal da chuva média medida com o rede telemétrica, estimada com o radar e pela ANOBES nos píxeis com dados de ambos: rede telemétrica e radar. A média da precipitação dos pluviômetros foi de 19,1 mm enquanto a estimada pelo radar foi de 61,8 mm, uma diferença de 42,7 mm.

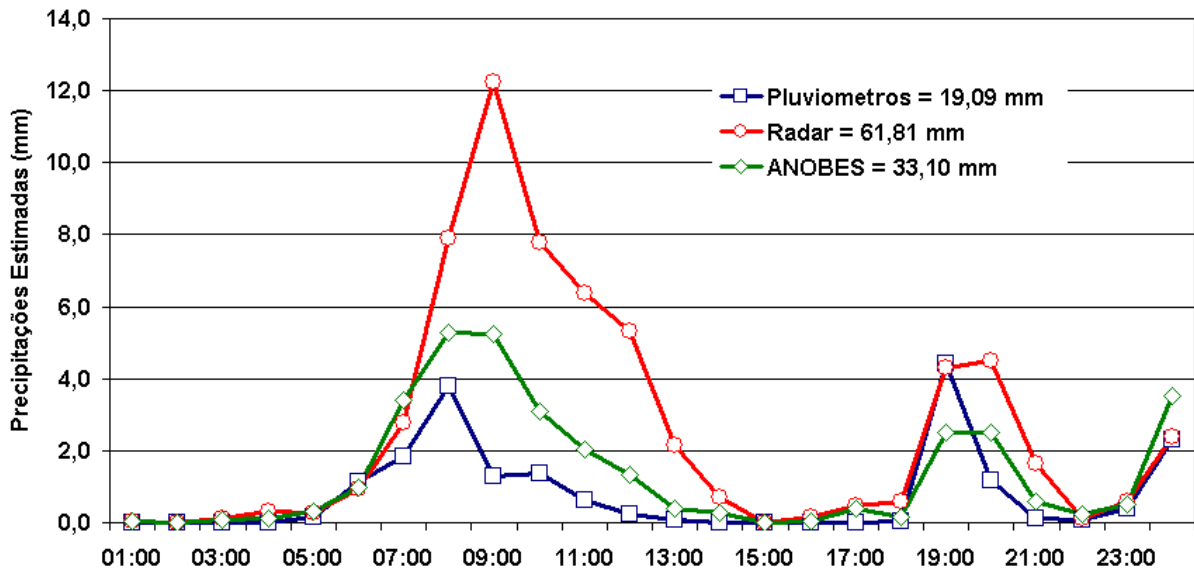


Figura 3.17 Similar a Figura 3.13, exceto para 2511/2000.

A Figura 3.18 mostra os campos de precipitação do radar, ANOBES e diferença entre ANOBES e radar para o período da manhã, entre 08:00 horas e as 12:00 horas.

Nota-se que as estimativas de chuva com o radar em superestimaram a precipitação. A ANOBES reduziu a chuva estimada com o radar em todas as áreas de interesse.

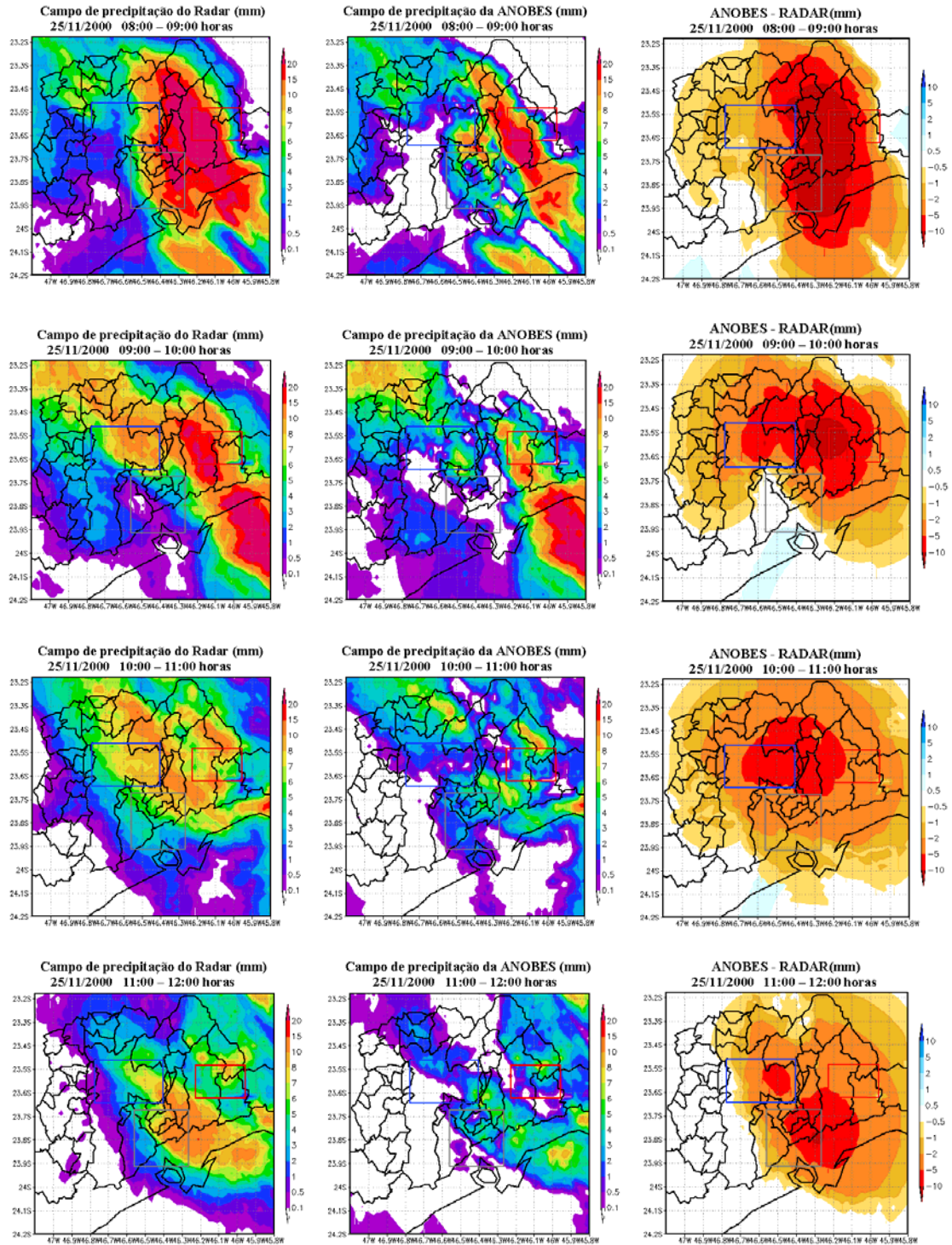


Figura 3.18 Similar à Figura 3.14, exceto para 25/11/2000.

A Figura 3.19 mostra a evolução temporal da chuva média para a acumulação de 120 minutos. A precipitação da ANOBES foi 1,6 mm maior em relação à

acumulação de 60 minutos. Nota-se uma concordância referente a amplitude da precipitação acumulada entre as 18:00 e 22:00 horas.

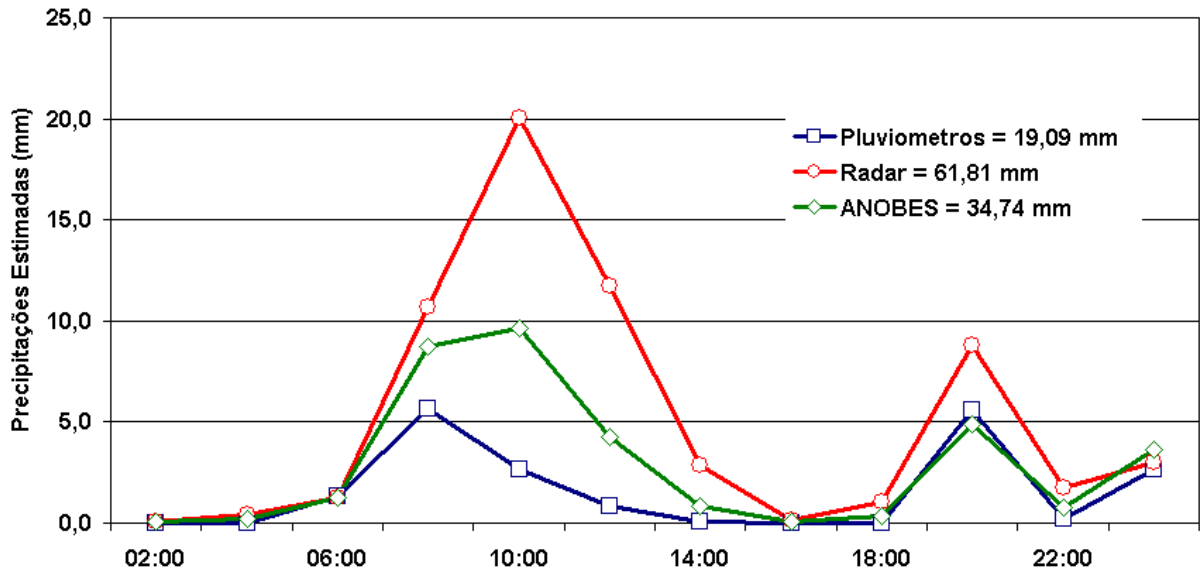


Figura 3.19 Idem a Figura 3.18, mas para 120 minutos de acumulação.

A Figura 3.20 mostra os campos de precipitação do radar, ANOBES e o campo diferença entre 18:00 e 22:00 horas.

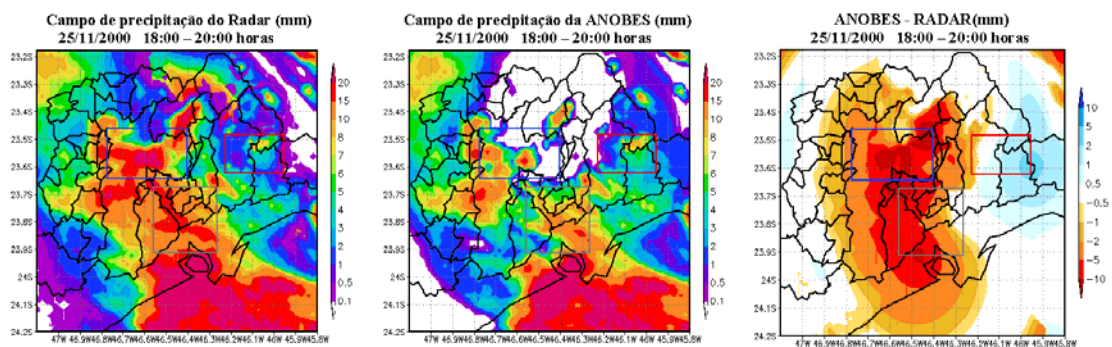


Figura 3.20 Idem a Figura 3.18, mas para 120 minutos de acumulação nos horários indicados.

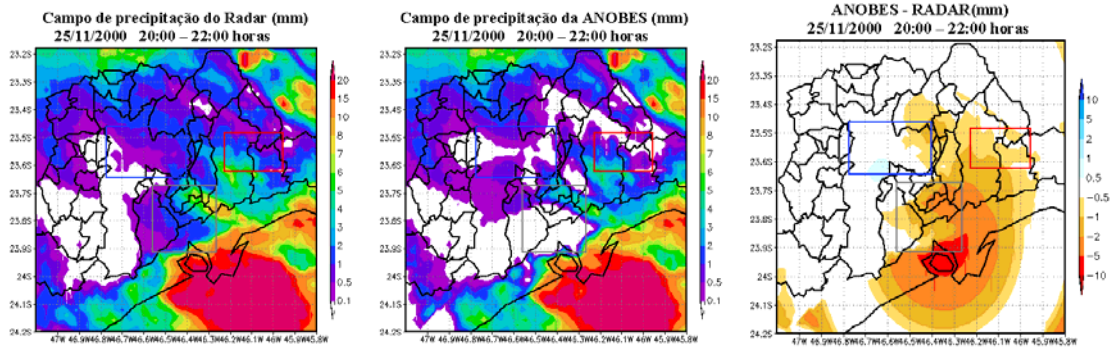


Figura 3.20 Continuação

A precipitação média da telemetria é próxima do evento do dia 16/02/2000, o último foi mais intenso. A ANOBES manteve os padrões espaciais de distribuição de chuva e respectivas intensidades.

O evento de 26/01/2000 foi muito intenso entre as 07:00 e 14:00 horas. A Figura 3.21 mostra a evolução da chuva acumulada. A telemetria registrou em média 50,8 mm, o radar 27,9 mm e a ANOBES 42,7 mm. Com exceção das primeiras horas da manhã, o radar subestimou a precipitação em todo o restante do dia.

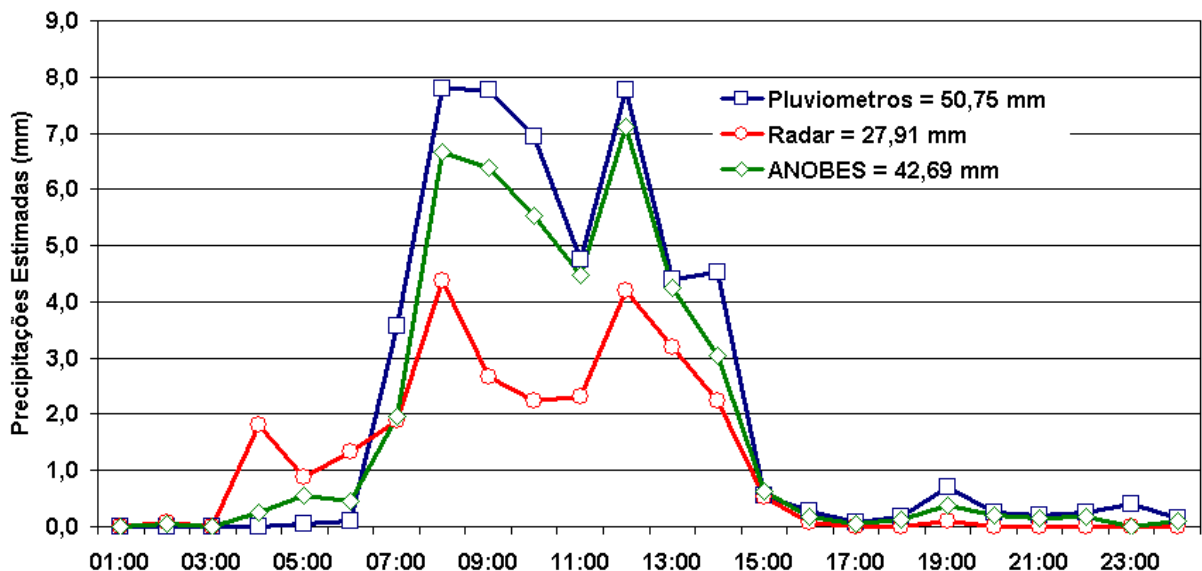


Figura 3.21 Similar a Figura 3.17, exceto para 26/01/2000.

A precipitação acumulada horária do radar, ANOBES e a diferença é mostrada na Figura 3.22 entre as 05:00 e 14:00 horas. Os campos diferença mostram que apenas entre 05:00 e 07:00 horas, no retângulo 3 (cinza), o radar superestimou a precipitação em até 10 mm. Nas demais áreas ao longo do dia, o radar subestimou a precipitação abaixo de 10 mm. As análises para acumulações de 120 minutos são similares (não mostradas).

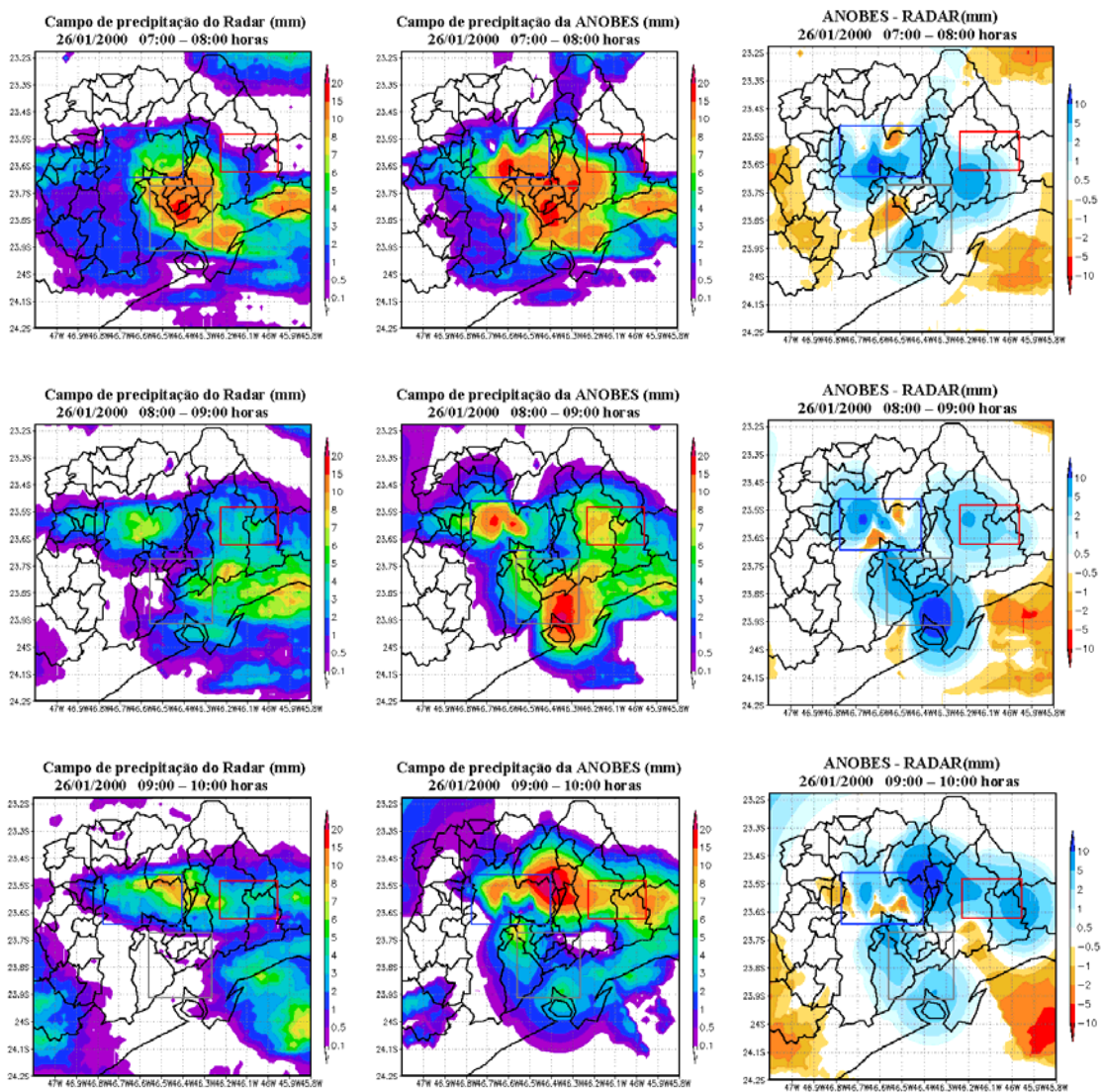


Figura 3.22 Similar a Figura 3.14, exceto para 26/01/2000.

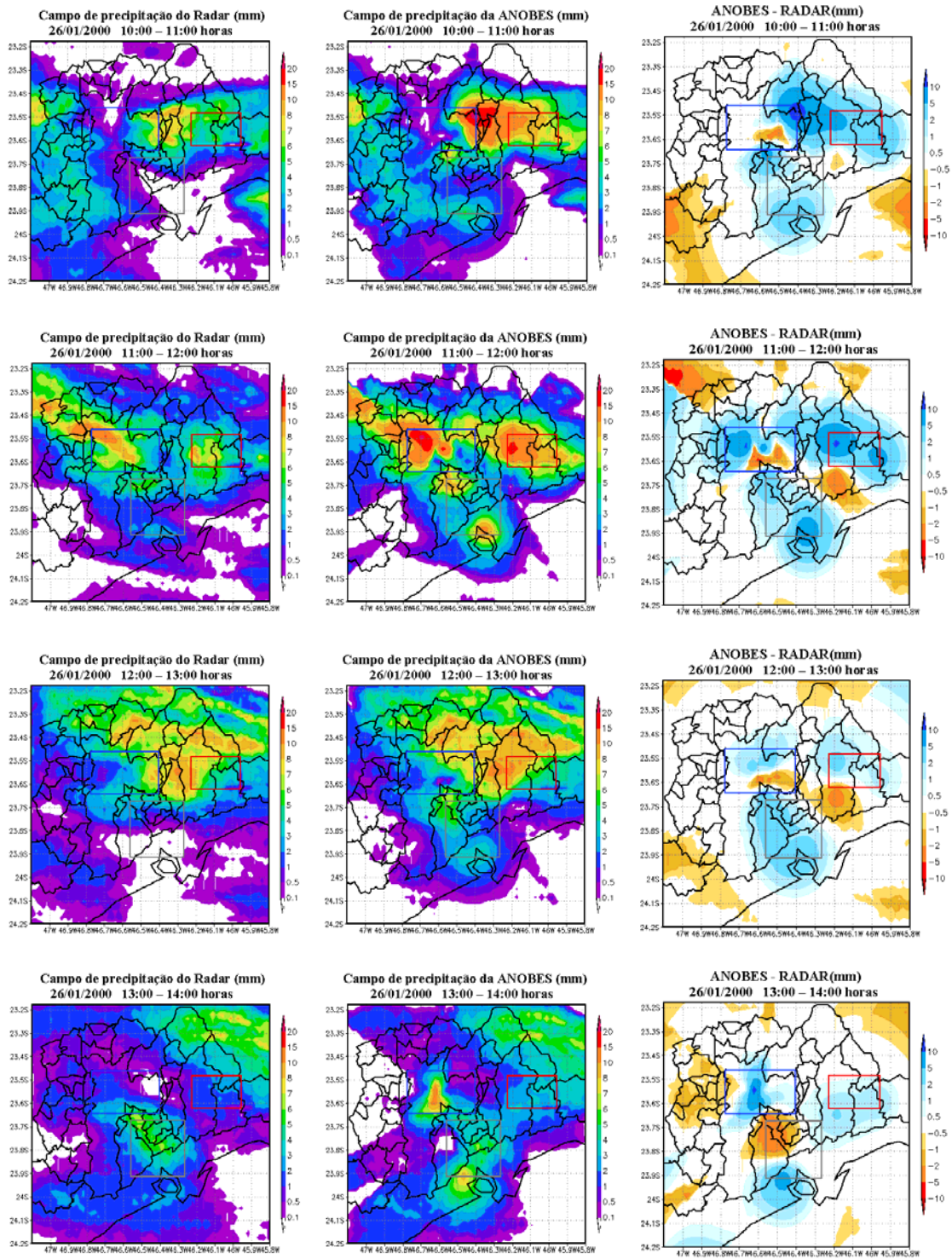


Figura 3.22 Continuação



### 3.4.2 Casos de Brisa Marítima

Os casos de BM selecionados foram os dos dias 08/01/2000, 05/12/1999 e 09/03/1999. Utilizaram-se as respectivas estatísticas para este tipo de evento.

O evento de chuva do dia 08 de janeiro de 2000 foi de baixa acumulação. As médias de precipitação obtidas da telemetria e do radar foram, respectivamente, 6,0 mm e 7,6 mm. A ANOBES estimou um valor intermediário de 6,6 mm. A Fig 3.23 mostra boa coerência referente a amplitude entre os as três estimativas, com máximo as 18:00 horas.

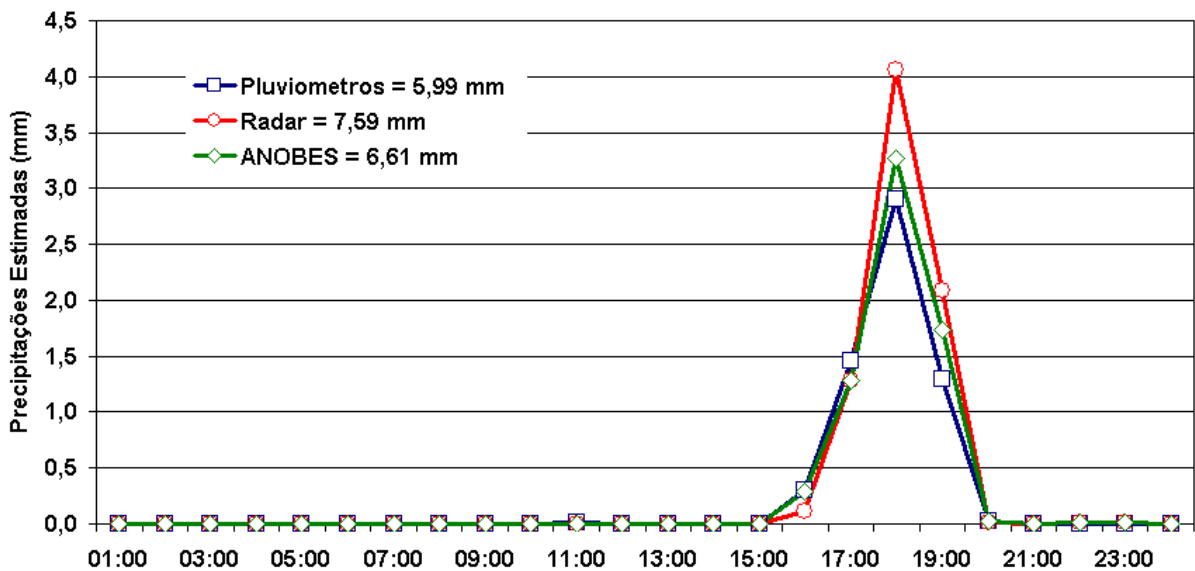


Figura 3.23 Similar a Fig 3.13, exceto para 08/01/2000.

Os campos de precipitação do Radar, ANOBES e a diferença estão mostrados na Fig 3.24. Neste caso, apenas para a acumulação de 60 minutos entre 17:00 e 19:00 horas. Dos campos do radar, nota-se que este é um típico caso de convecção organizada ao longo da costa induzido pela BM, inicialmente mais evidente as 16:00 horas. Nas duas horas seguintes, pode-se acompanhar o deslocamento da convecção para o interior do continente, e a modificação de suas

características morfológicas, com a precipitação convectiva das 19:00 horas com características de convecção isolada.

Neste tipo de sistema, para acumulação de 60 minutos a correlação espacial se torna nula em 20 km. Desta forma, nos campos da ANOBES, o efeito do raio de influencia dos pluviômetros é evidente na área 3 (retângulo cinza), quando foi observada precipitação pela telemetria não detectada pelo radar. Notam-se neste caso círculos concêntricos de taxas de precipitação que se propagam além do ponto específico do pluviômetro. Outra característica importante que é melhor observada neste tipo de sistema, é a propagação anômala de precipitação fora dos retângulos onde se encontram os conjuntos de dados telemétricos. Este efeito ocorre devido a técnica da ANOBES não ser apropriada para interpolação de dados muito além das áreas onde se encontram as medidas telemétricas que serão integradas aos respectivos valores de precipitação estimadas pelo radar.

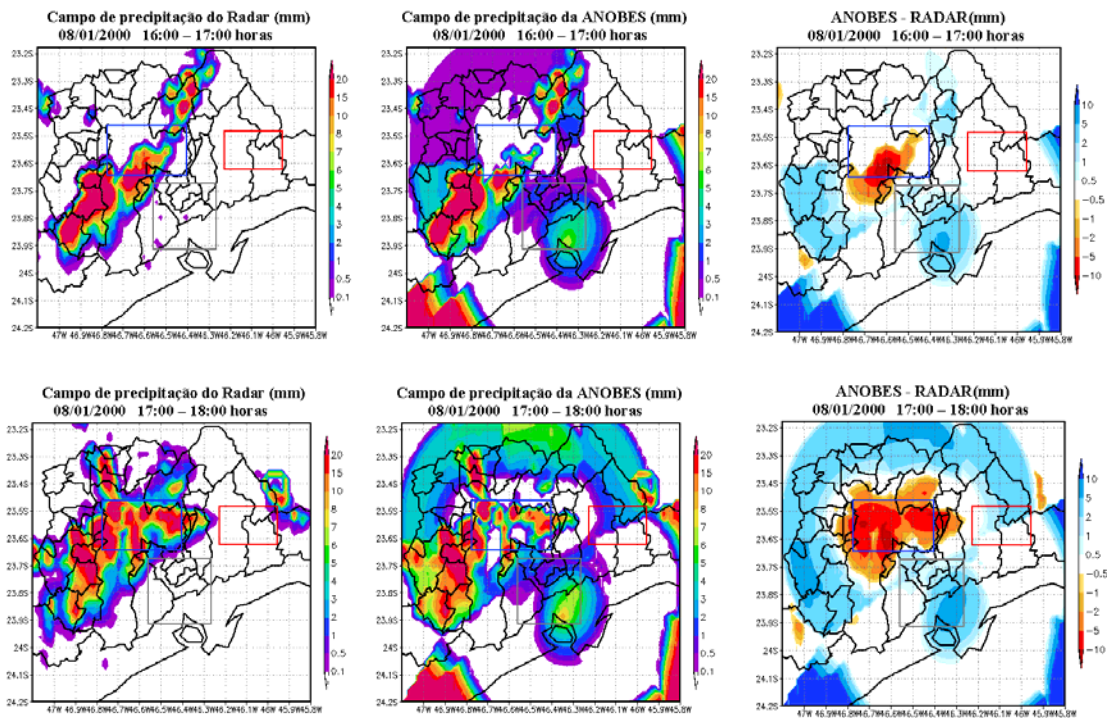


Figura 3.24 Similar a Figura 3.14, exceto para 08/01/2000.

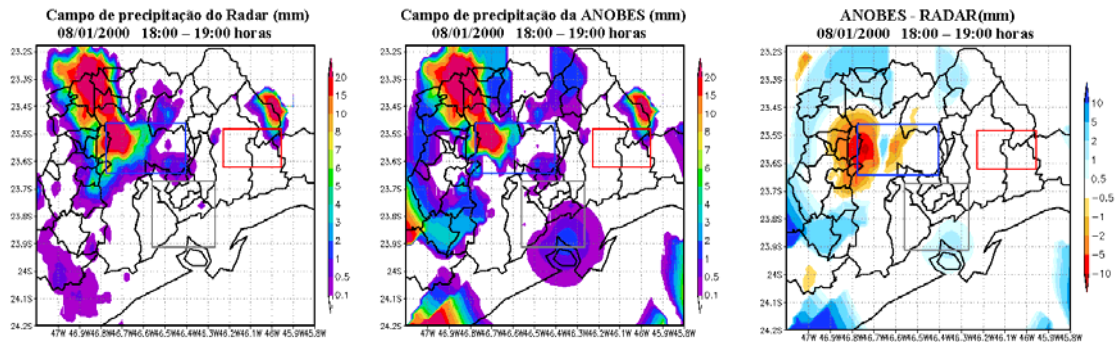


Figura 3.24 Continuação.

No evento de 05/12/1999, para 60 minutos de acumulação, a telemetria registrou 4,7 mm, uma quantidade de chuva reduzida quando comparada ao radar, que estimou 23,1 mm e a ANOBES com 20,1 mm. Para 120 minutos de acumulação a ANOBES reduziu este valor para 17.6 mm. Choveu entre 17 e 19:00 horas, com máximo às 18:00 horas, quando a telemetria mediu 2,6 mm contra 9.3 mm do Radar (Figura 3.25). A Figura 3.26 mostra os campos de precipitação do Radar, ANOBES e diferença entre as 17 e 18:00 horas.

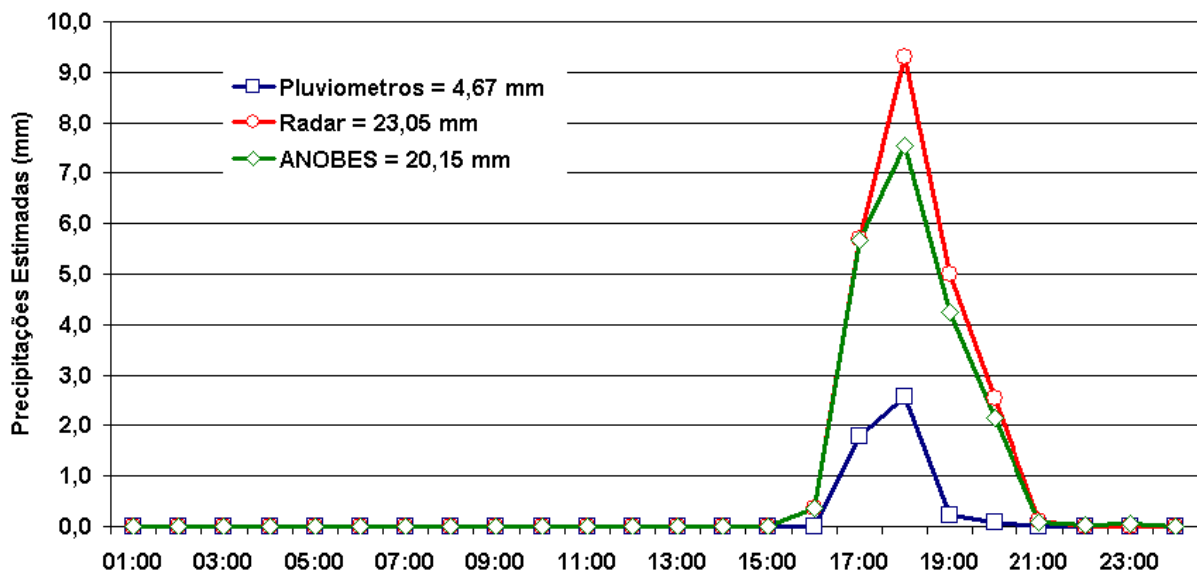


Figura 3.25 Similar a Figura 3.13, exceto para 05/12/1999.

Neste evento, assim como no anterior, o radar superestima a precipitação em mais de 10 mm, a exemplo da área 2 (retângulo azul). As áreas onde o radar subestimou a precipitação não são tão significativas quanto nas áreas onde houve superestimativas, de forma que a taxa de acumulação pela ANOBES foi muito próxima do acumulado pelo radar. Observa-se dos campos de precipitação do radar, a convecção alinhada formada pela BM e sua intensificação e propagação em direção ao interior do continente.

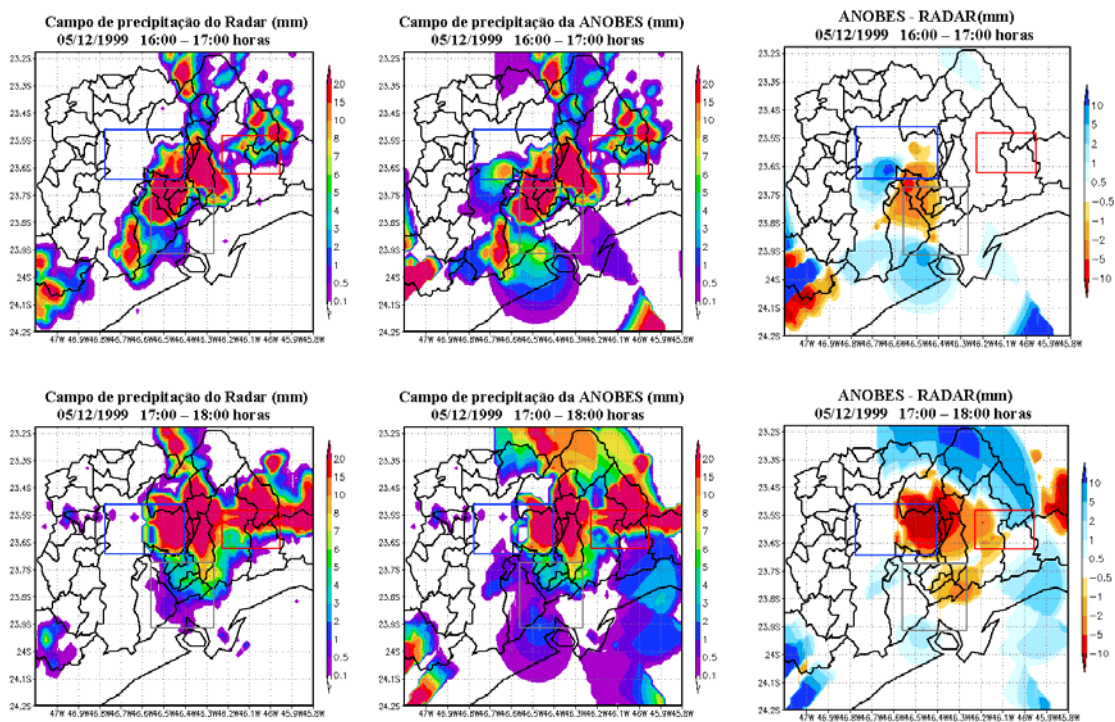


Figura 3.26 Similar a Figura 3.14, exceto para 05/12/1999.

O evento de 09/03/1999 foi o mais intenso com dois máximos de precipitação, às 18:00 horas e, outro entre 23 e 24 horas. A ANOBES obteve valores muito próximos aos do Radar (Figura 3.27). Para este caso, o Radar subestimou a precipitação da telemetria em mais de 10mm.

Para este evento, são mostrados os campos de precipitação acumulada de 60 minutos entre 18 e 24 horas (Figura 3.28). Este foi um dos poucos eventos em que a telemetria registrou quantidade maior de precipitação do que a estimada pelo radar.

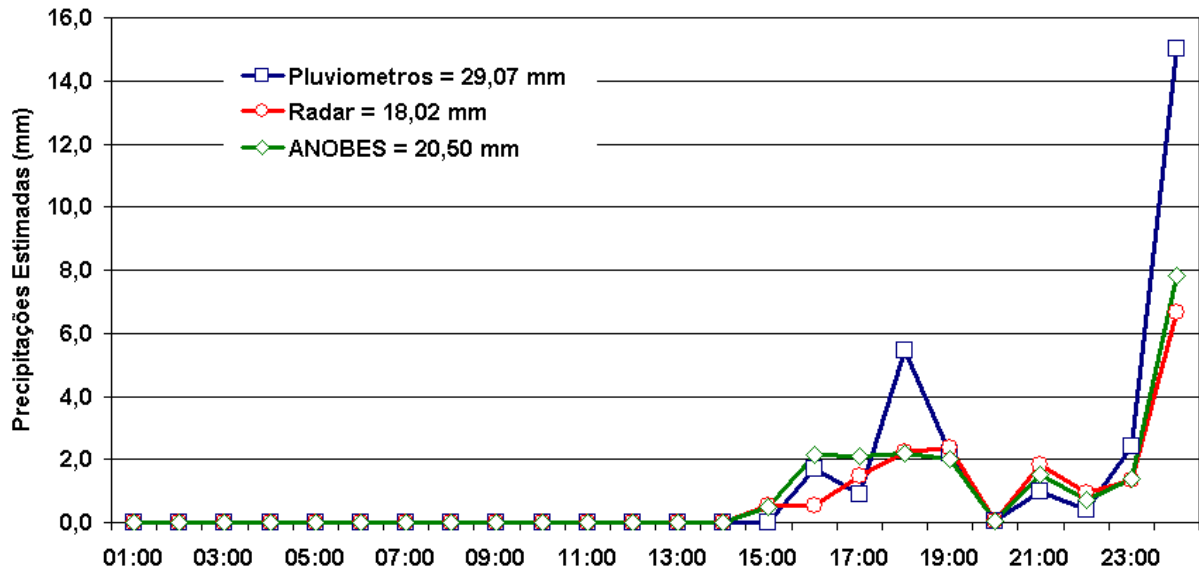


Figura 3.27 Similar a Figura 3.13, exceto para 09/03/1999.

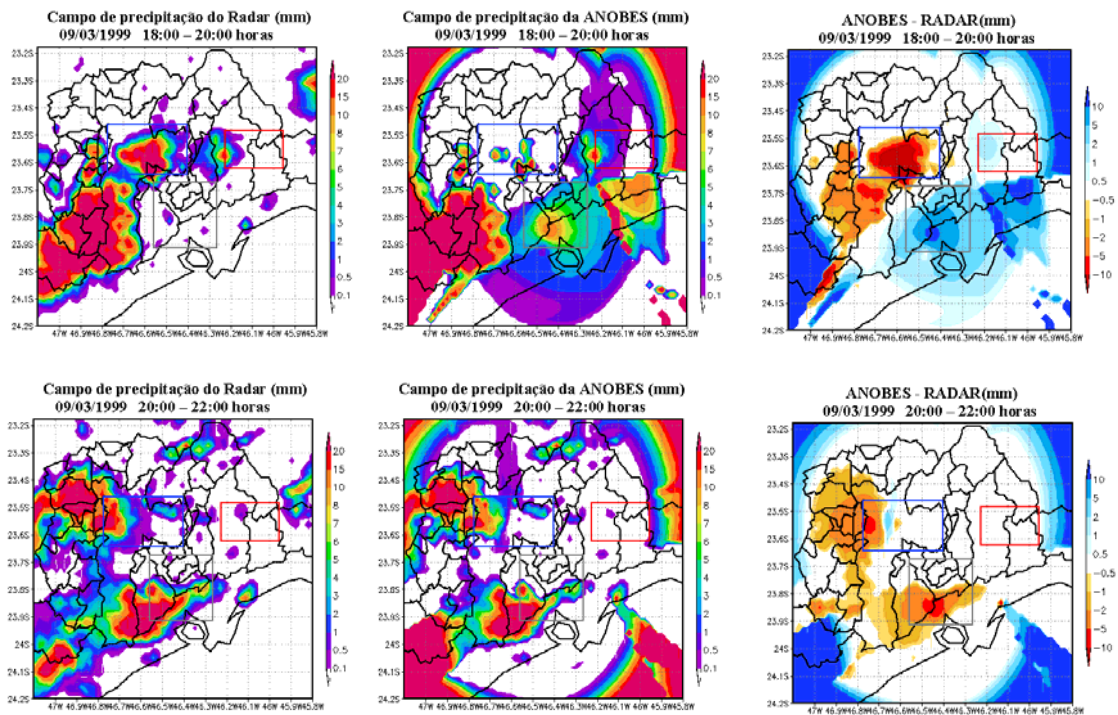


Figura 3.28 Similar a Figura 3.14, exceto para 09/03/1999.

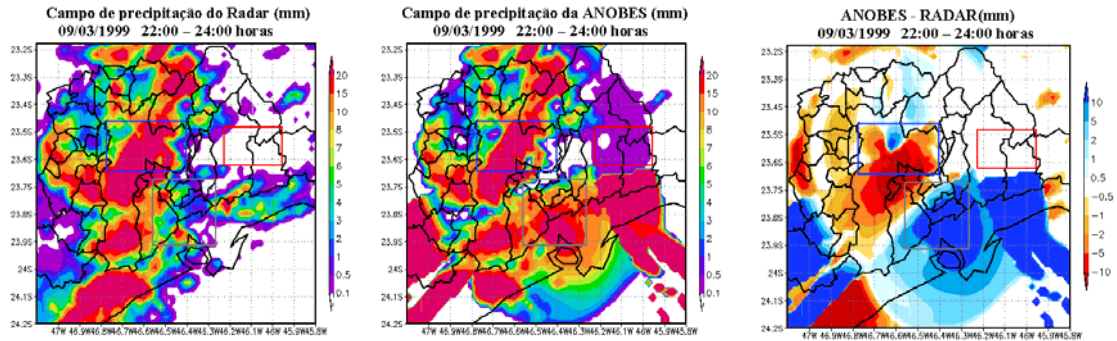


Figura 3.28 Continuação.

### 3.4.3 Casos de Linhas de Instabilidade

Selecionaram-se os eventos dos dias 09 e 26/02/1999, e o dia 14/01/2000.

A LI do dia 09/02/1999 teve um rápido deslocamento entre as 14 e às 19 horas, com máximo de precipitação às 17 horas. A evolução temporal da precipitação para o intervalo de 60 minutos de acumulação para telemetria, radar e ANOBES é mostrada na Figura 3.29. O radar superestimou a precipitação em relação à telemetria em todos os horários. A ANOBES reduziu a estimativa do Radar em 14.9 mm para 60 minutos de acumulação e em 16.8 mm para 120 minutos de acumulação (Figura não mostrada).

É mostrado na Figura 3.30 o campo de precipitação do radar, ANOBES e diferença, para 120 minutos de acumulação, entre 16:00 e 18 horas. Fica evidente a magnitude das superestimativas da precipitação pelo radar, como mostra o campo diferença, com destaque para a área 2 (retângulo azul), com diferenças acima de 10 mm.

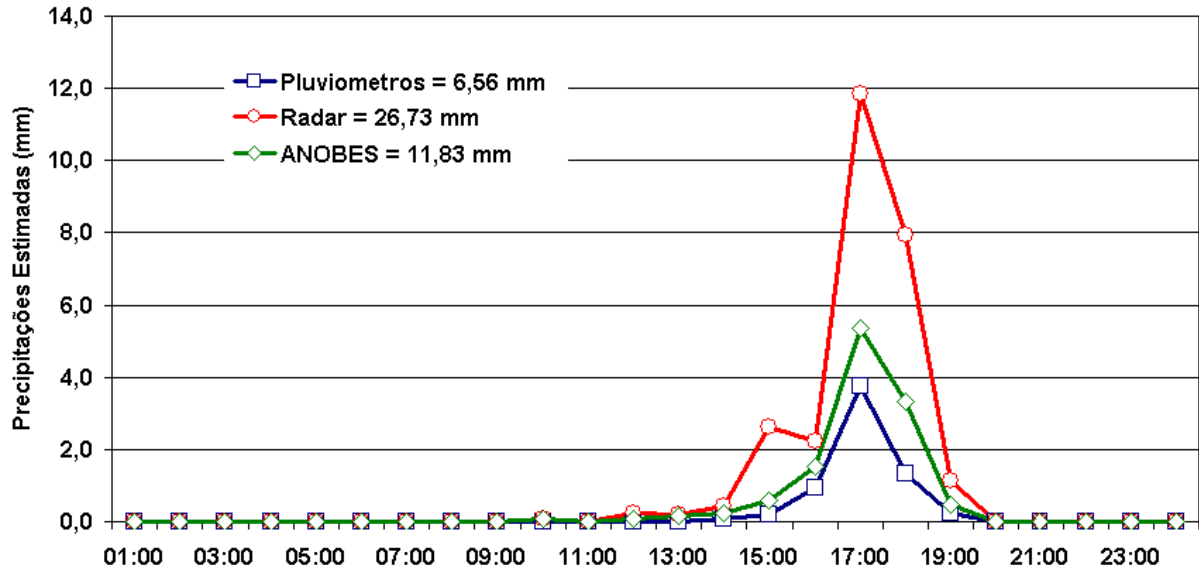


Figura 3.29 Similar a Figura 3.13, exceto para 09/02/1999.

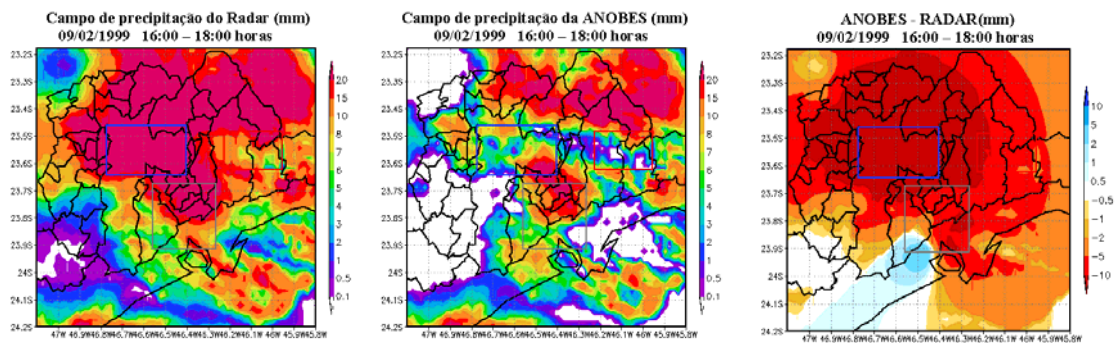


Figura 3.30 Similar a Figura 3.14, exceto para 09/02/1999.

Para o caso de 14/01/2000, a telemetria registrou 7.2 mm e o radar 37,1 mm. Como no caso anterior, uma estimativa muito alta em relação à telemetria. A linha de instabilidade provocou chuva à noite, entre 18 e 22 horas. Um máximo menor de precipitação foi observado à tarde por volta das 15 horas associado a núcleos de CI (Figura 3.31).

A ANOBES reduziu por volta de 10 mm a precipitação estimada pelo Radar, uma redução pequena quando comparada ao valor estimado pelo radar.

Os campos de precipitação do radar, ANOBES e diferença são mostrados na Figura 3.32, para o intervalo de 120 minutos de acumulação, entre as 18 e as 22

horas. Neste campo de 120 minutos, o perfil de LI não está muito bem caracterizado, isto ocorre porque, ao se acumular a precipitação por longo período, alguns sistemas perdem sua configuração e passam a se assemelhar, morfologicamente, a outros tipos de sistemas.

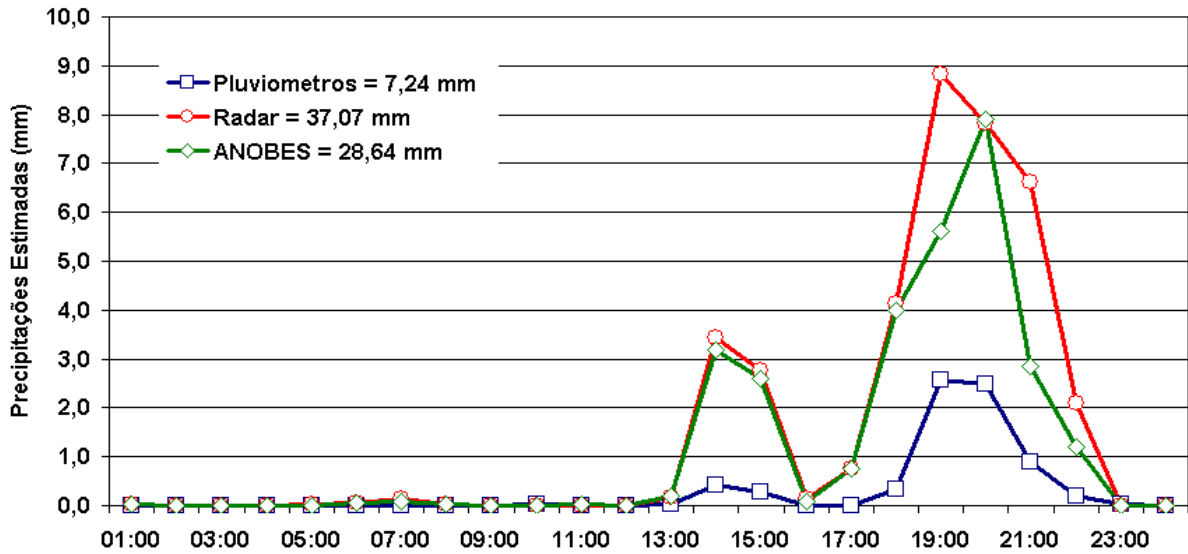


Figura 3.31 Similar a Figura 3.13, exceto para 14/01/2000.

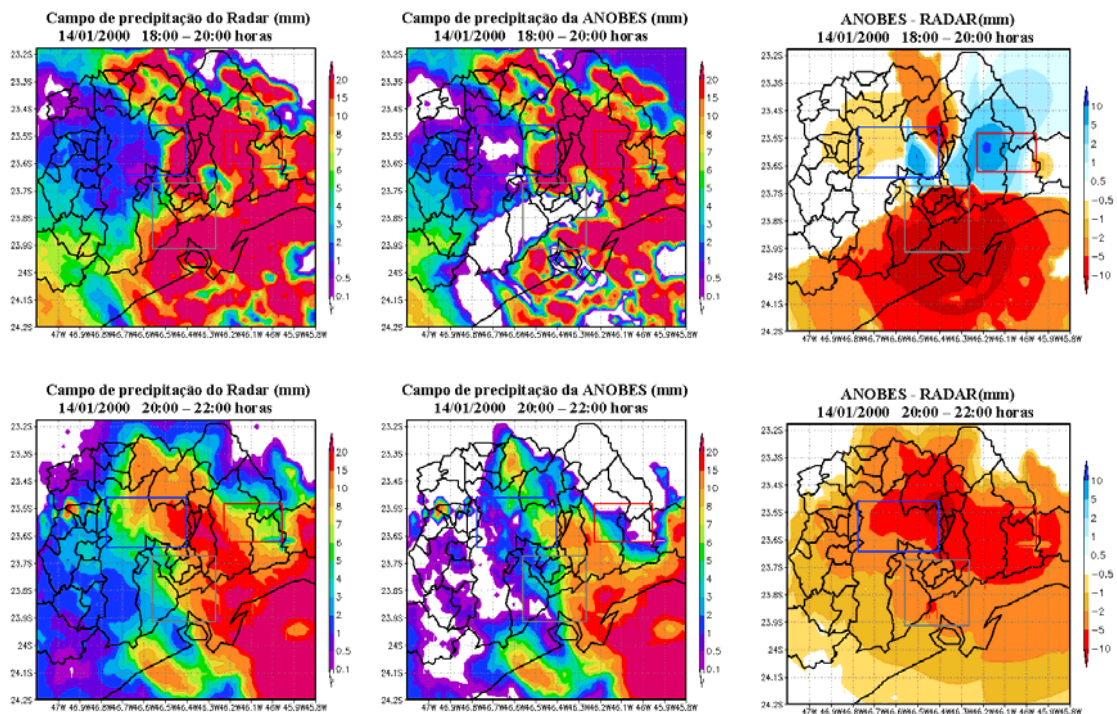


Figura 3.32 Similar a Figura 3.14, exceto para 14/01/2000.



Dos casos de LI, o evento de 26/02/1999 apresentou o maior registro de precipitação pela telemetria, uma média de 44,7 mm contra 79,1 mm pelo radar. Esta LI atuou com forte intensidade das 16 horas da tarde até o final do dia (Figura 3.33). O radar superestimou a precipitação para este evento. Ao contrário do caso anterior, a ANOBES estimou um valor mais próximo ao da telemetria, 54,5 mm.

Para 120 minutos de acumulação, a ANOBES registrou 51,0 mm, 4 mm menos que no intervalo de 60 minutos. Os campos de precipitações acumuladas de 120 minutos entre as 18 e as 24 horas são mostrados na Figura 3.34.

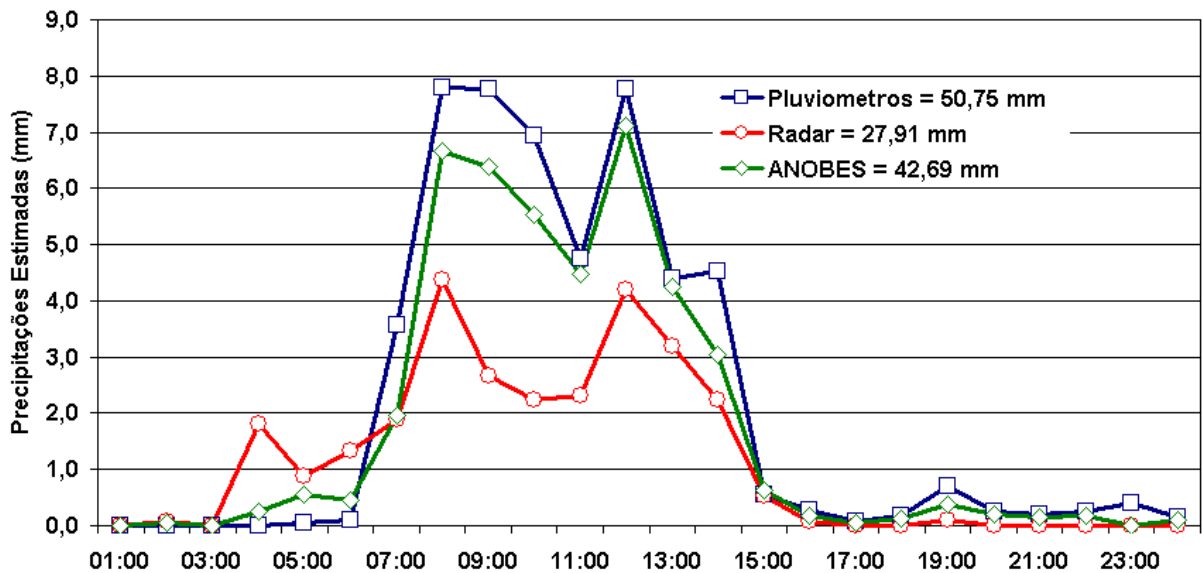


Figura 3.33 Similar a Figura 3.13, exceto para 26/02/1999.

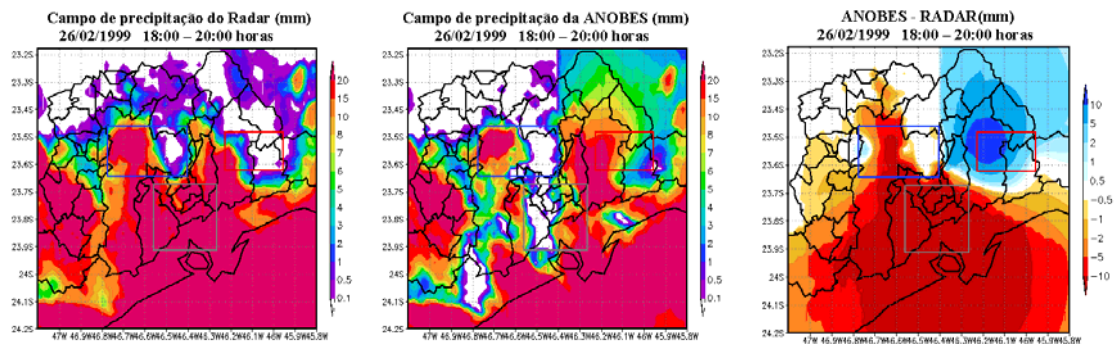


Figura 3.34 Similar a Figura 3.14, exceto para 26/02/1999.

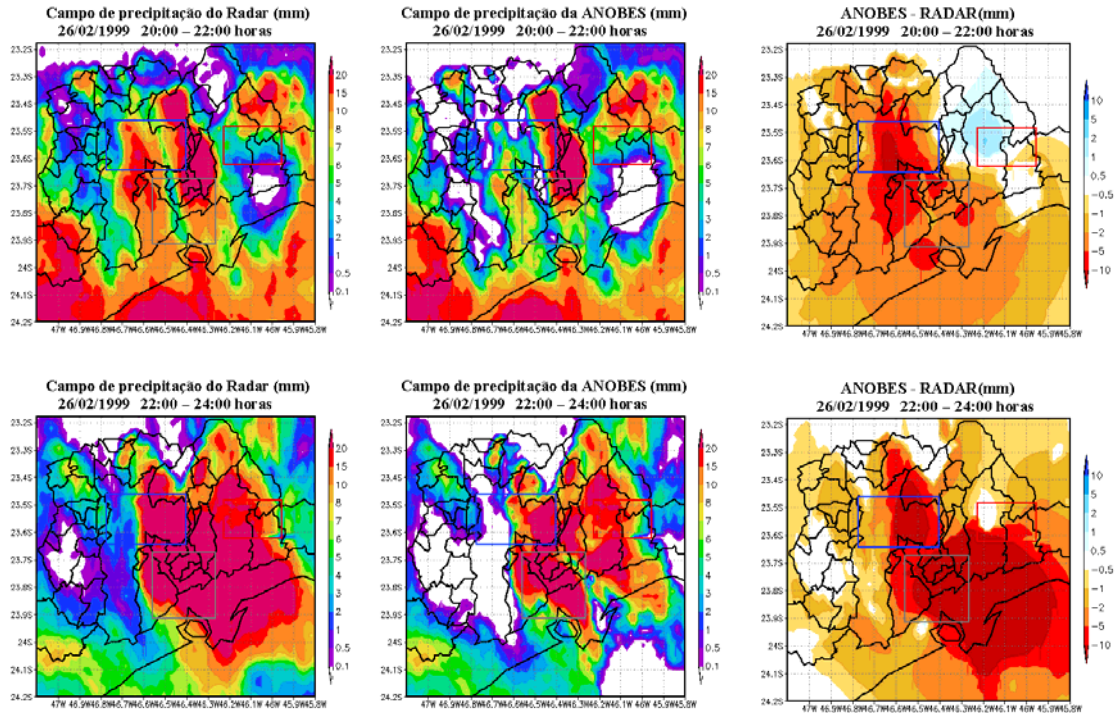


Figura 3.34 Continuação.

### 3.4.4 Casos de Bandas Dispersas

Três eventos de Bandas dispersas são apresentados, entre os dias 02 e 04 de janeiro de 2000. Estas BDs estiveram associadas a um episódio de ZCAS, que se estendeu do dia 01 até o dia 06 de janeiro deste ano.

Este é um tipo de sistema caracterizado por cobrir grandes áreas com precipitação, tanto estratiformes como convectivas. Os acumulados diários de precipitação são geralmente elevados, devido às precipitações constantes durante quase todo o dia. Esta é uma característica importante, pois a ANOBES tem melhor desempenho ao integrar dados de telemetria aos do radar em áreas onde estes dois tipos de medidas existam. As correlações espaciais para este sistema atingiram as maiores distancias dentre os cinco sistemas observados.

Dos três casos, o menos intenso ocorreu no dia 04, o mais moderado no dia 02 e o mais intenso no dia 03. Os dados foram agrupados e analisados, pelo fato de

serem dias seguidos afetados pelo mesmo sistema. A evolução temporal contínua da precipitação média medida pela telemetria, radar e ANOBES é apresentada na Figura 3.35, para 120 minutos de acumulação. Nota-se que o radar superestimou a precipitação da telemetria na maior parte dos horários.

Para estes três dias, a telemetria mediu 66,4 mm e o Radar 128,2 mm, uma diferença de aproximadamente 62 mm. A ANOBES estimou a precipitação em 83,5 mm. Neste caso, onde o radar estimou mais que o dobro da precipitação observada pela telemetria, os resultados mostram como as diferenças existentes entre telemetria e radar podem ser minimizadas com o uso da ANOBES. Nota-se então, que as estimativas de precipitação do radar podem levar a erros significativos se forem usados, por exemplo, como dados de entrada para modelos numéricos.

Observou-se que o Radar superestimou a precipitação com mais significância nos períodos da tarde e da noite. No dia 04 a precipitação foi superestimada durante todo o dia. O período de maior destaque onde o radar subestimou a precipitação foi o ocorrido das 12 às 17 horas do dia 03.

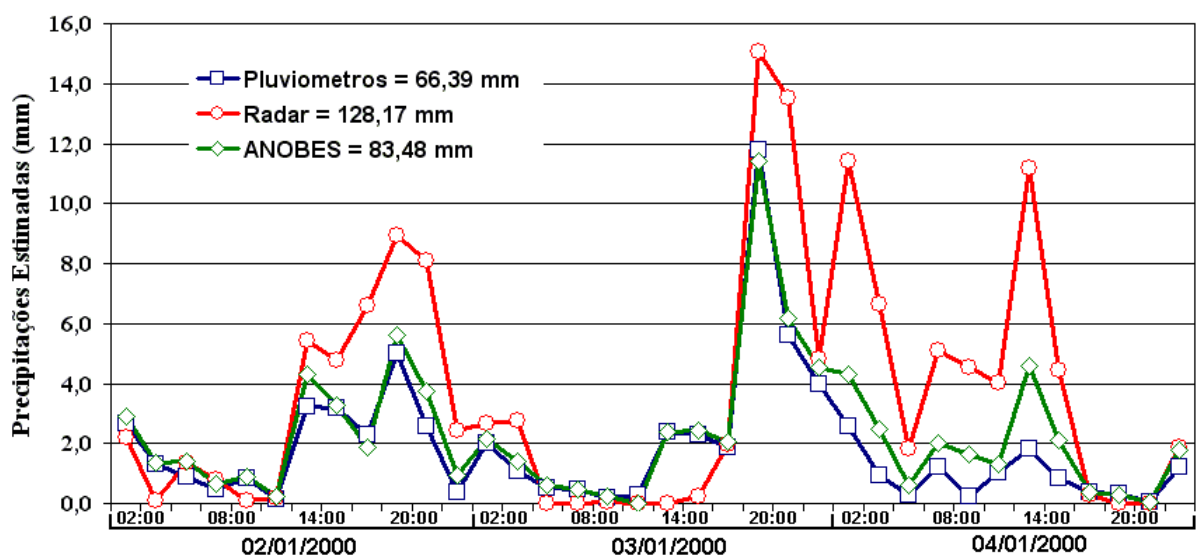


Figura 3.35 Similar a Figura 3.13, exceto para 02, 03 e 04/01/2000.

São mostrados campos de precipitação do Radar, ANOBES e diferença, para intervalos de 120 minutos de acumulação, relativos a períodos de maior importância de acumulação nestes dias estudados. A Figura 3.36 mostra campos entre as 18 e as 22 horas. Notam-se acumulados significativos de precipitação nestes horários, do campo diferença percebe-se como o radar superestimou a precipitação, em alguns pontos em até mais de 10 mm. A ANOBES reduziu significativamente a precipitação estimada pelo radar nas três áreas de interesse.

A Figura 3.37 mostra um dos períodos onde o radar subestimou a precipitação, no dia 03. Pode-se notar um núcleo de precipitação intenso, na área 2 (retângulo azul), que o radar não identificou. No restante do dia, o radar permaneceu superestimando a precipitação, principalmente à noite (Figura 3.38).

Por fim, a Figura 3.39 mostra campos do dia 04. Este dia apresentou as maiores superestimativas da precipitação pelo radar. Os campos revelam, em dois horários consecutivos, a magnitude destas estimativas.

Em geral, mesmo com o radar subestimando a precipitação em alguns períodos, as magnitudes das superestimativas foram muito mais intensas, como mostraram os resultados da Figura 3.35.

A ANOBES foi eficiente em reduzir a precipitação estimada pelo radar em aproximadamente 45 mm, um volume de água muito significativo do ponto de vista hidrológico, por exemplo.

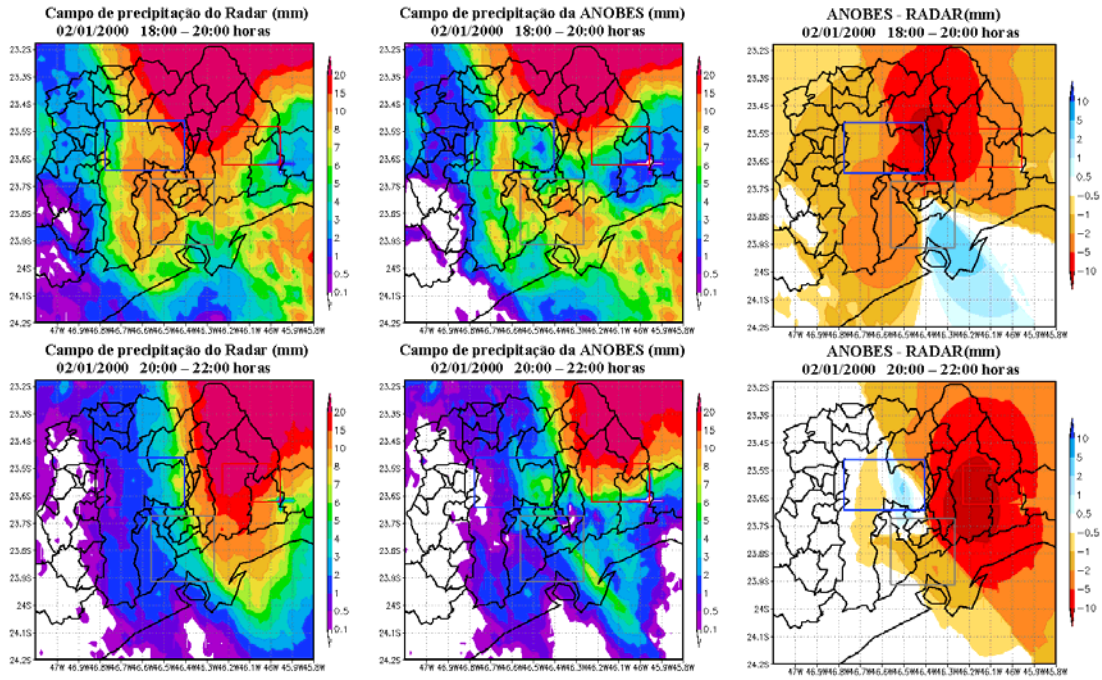


Figura 3.36 Similar a Figura 3.14, exceto para 02/01/2000.

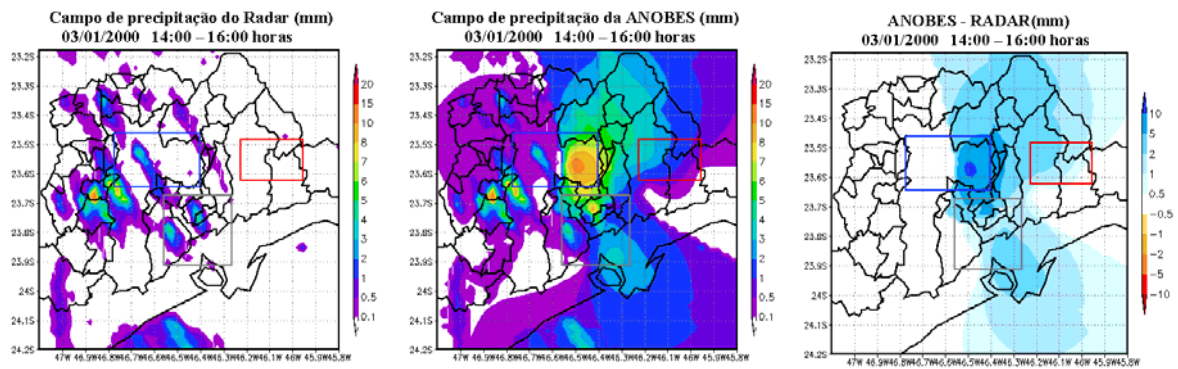


Figura 3.37 Similar a Figura 3.14, exceto para 03/01/2000.

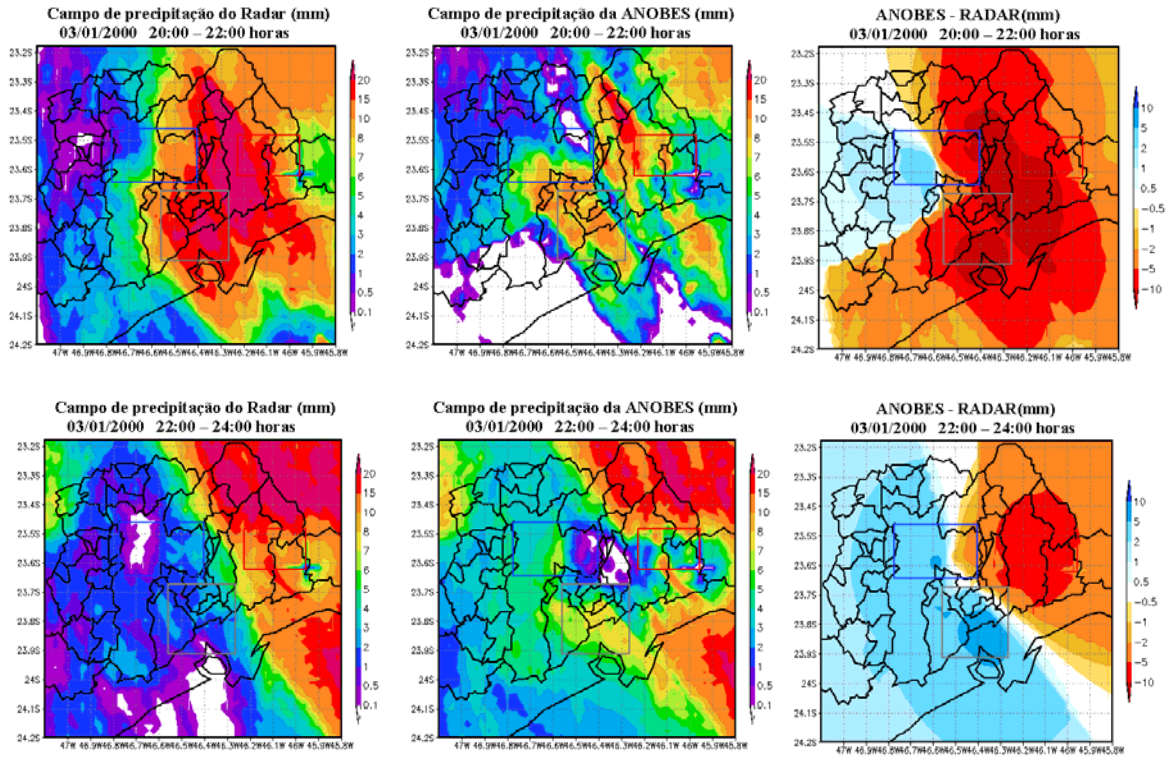


Figura 3.38 Similar a Figura 3.14, exceto para 03/01/2000.

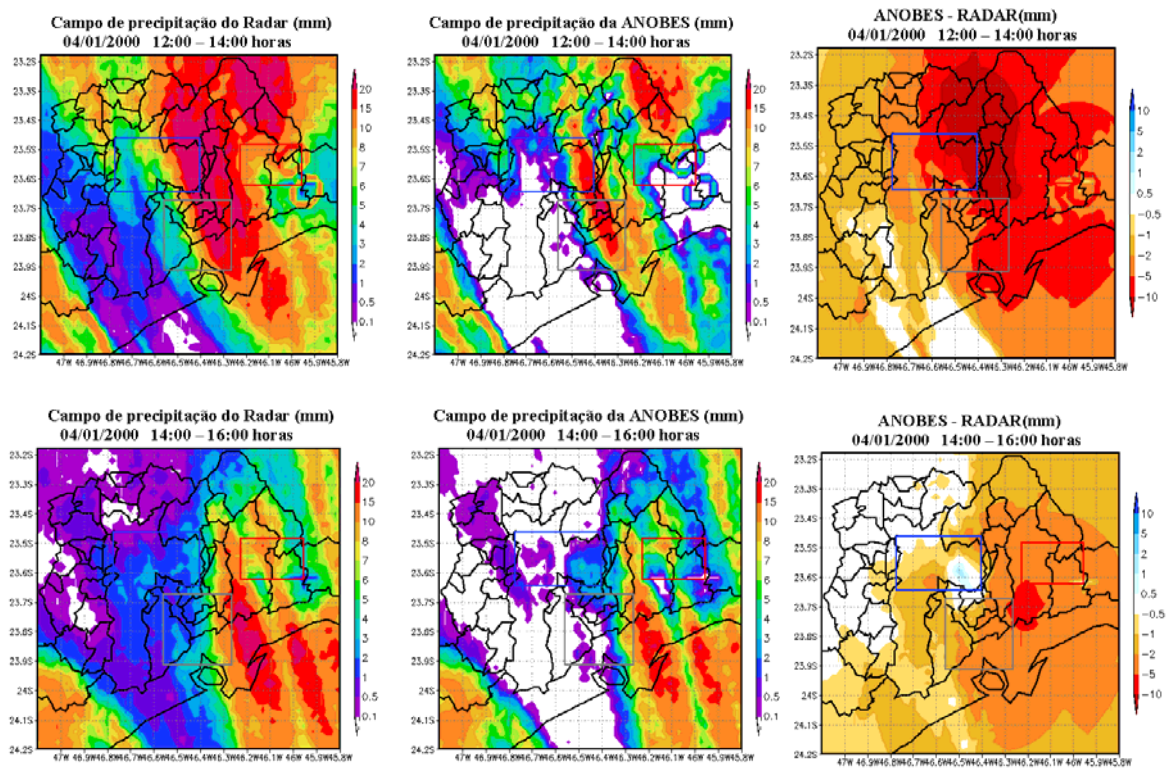


Figura 3.39 Similar a Figura 3.14, exceto para 04/01/2000.

### 3.4.5 Casos de Frentes Frias

Para este tipo de sistema, os casos escolhidos foram os dos dias 15/07/2000, 01/09/2000 e 06/05/1999. Em todos os casos, as frentes frias atuaram a partir do período da tarde.

O evento do dia 15/07/2000 apresentou caráter predominantemente estratiforme, com precipitação contínua a partir das 13 horas da tarde. Neste evento, a precipitação média observada pela telemetria foi de 17.5 mm, e 20,4 mm pelo radar, uma diferença pequena de aproximadamente 3 mm. A ANOBES estimou 16,5 mm de precipitação, reduzindo também, em menor grau, a precipitação da telemetria. A Figura 3.40 mostra a evolução temporal das precipitações observadas e estimadas para 60 minutos de acumulação. Nota-se que o radar superestimou a precipitação, embora a pequenas taxas, para todos os momentos de chuva.

São mostrados, na Figura 3.41, os campos de precipitação do radar, ANOBES e diferença, para 60 minutos de acumulação, entre as 20 e as 24 horas. Pode-se notar nestes campos que para este sistema estratiforme com precipitações de baixa intensidade, as diferenças do radar foram menor do que 5 mm. Para o intervalo de 120 minutos de acumulação (Figuras não mostradas) as magnitudes destas diferenças também não foram elevadas, permanecendo na mesma ordem do intervalo de acumulação anterior.

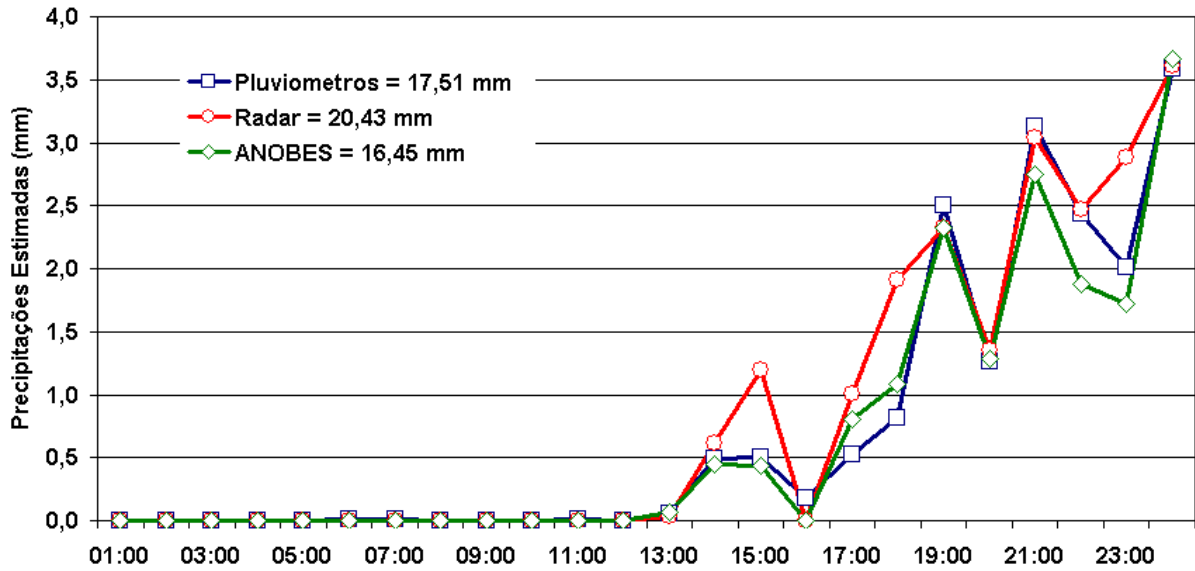


Figura 3.40 Similar a Figura 3.13, exceto para 15/07/2000.

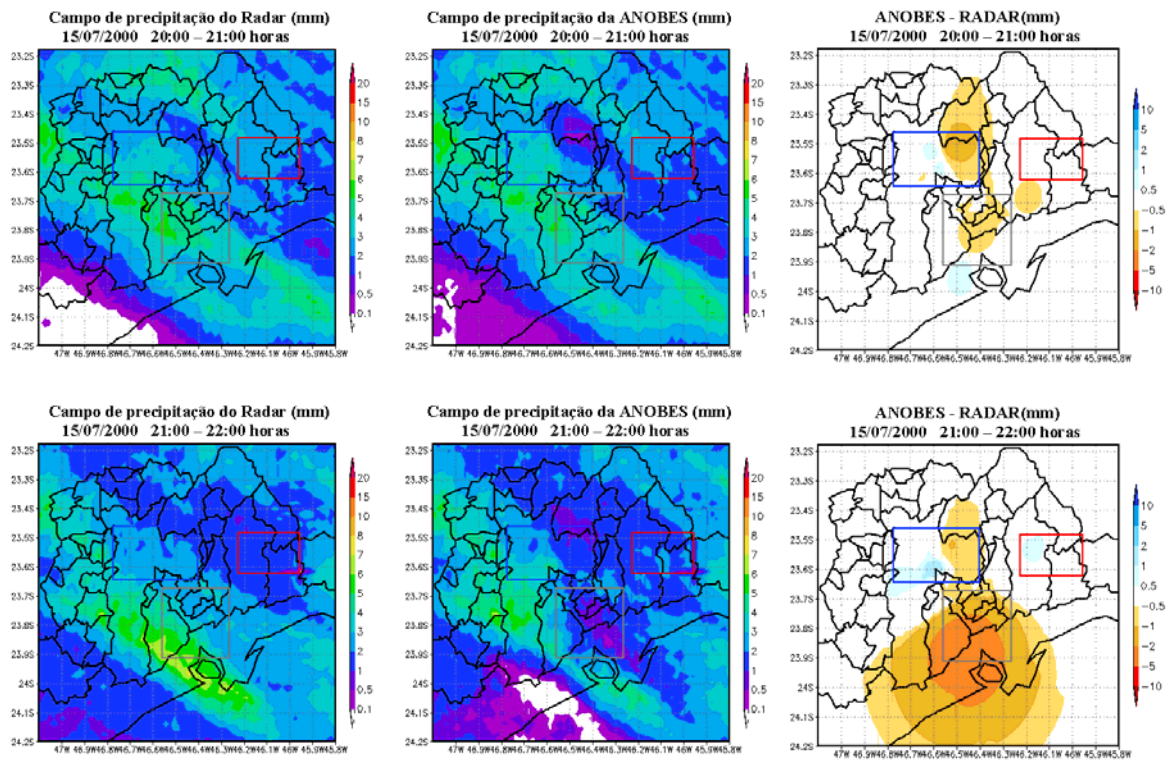


Figura 3.41 Similar a Figura 3.14, exceto para 15/07/2000.



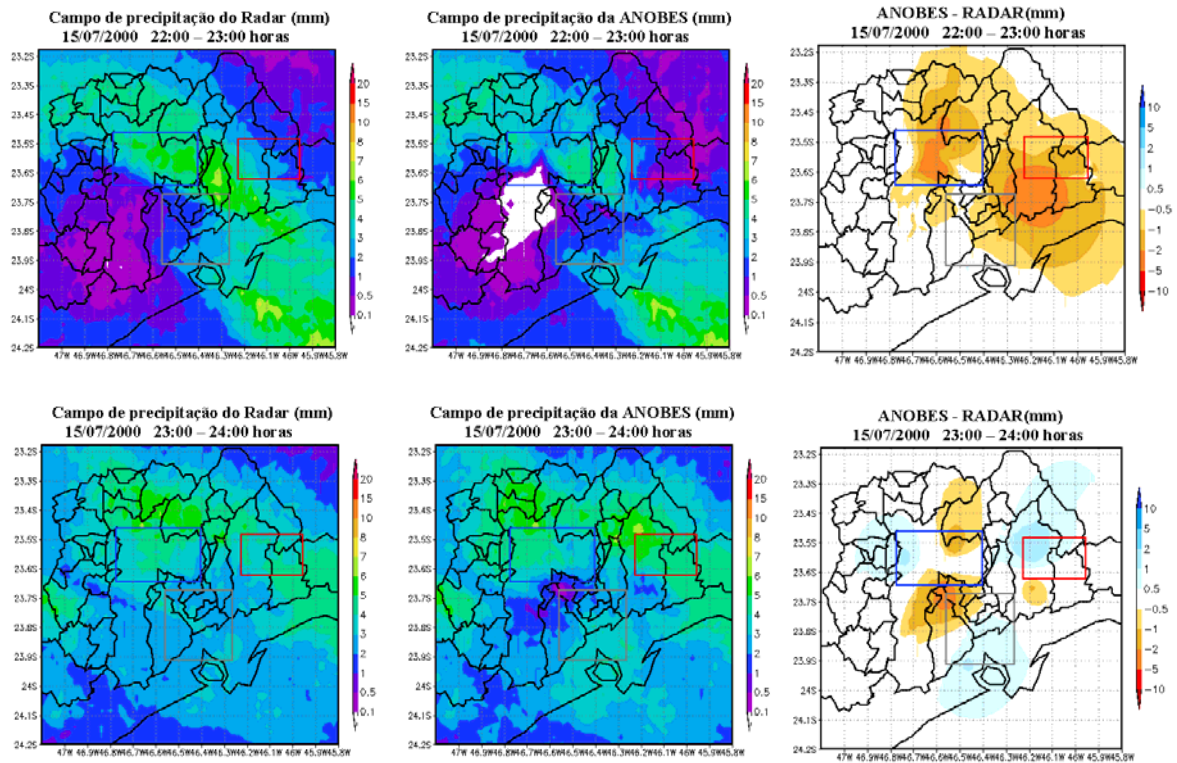


Figura 3.41 Continuação

No dia 01/09/2000 a telemetria registrou precipitação média de 19,8 mm, o radar 30,9 mm e a ANOBES registrou um valor um pouco abaixo da telemetria, 18,9 mm. Atuando a partir das 14 horas da tarde, o radar superestimou, em todo o período, a precipitação observada pela telemetria.

A evolução temporal da precipitação observada e estimada pelo radar e ANOBES é apresentada na Figura 3.42. Apesar de esta frente fria ter apresentado alguns núcleos de precipitação convectivos em sua trajetória, os resultados obtidos são muito semelhantes ao da frente fria estudada no evento anterior.

São mostrados, na Figura 3.43, os campos de precipitação, para 60 minutos de acumulação, para os horários entre as 22 e as 24 horas, horário onde o radar superestimou a precipitação com maior magnitude, com máximo às 22 horas.

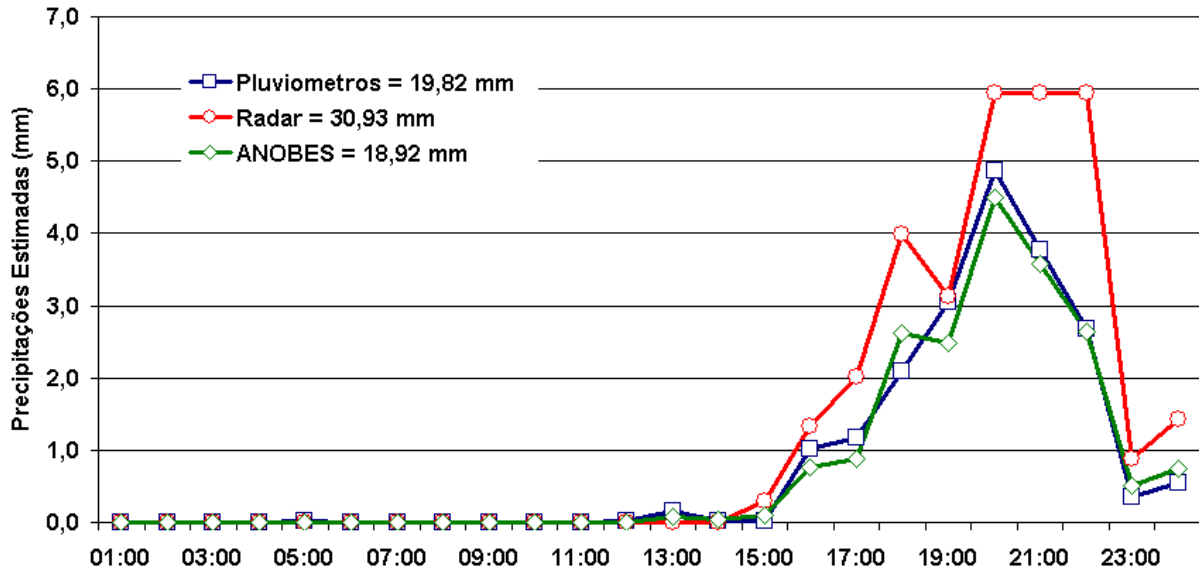


Figura 3.42 Similar a Figura 3.13, exceto para 01/09/2000.

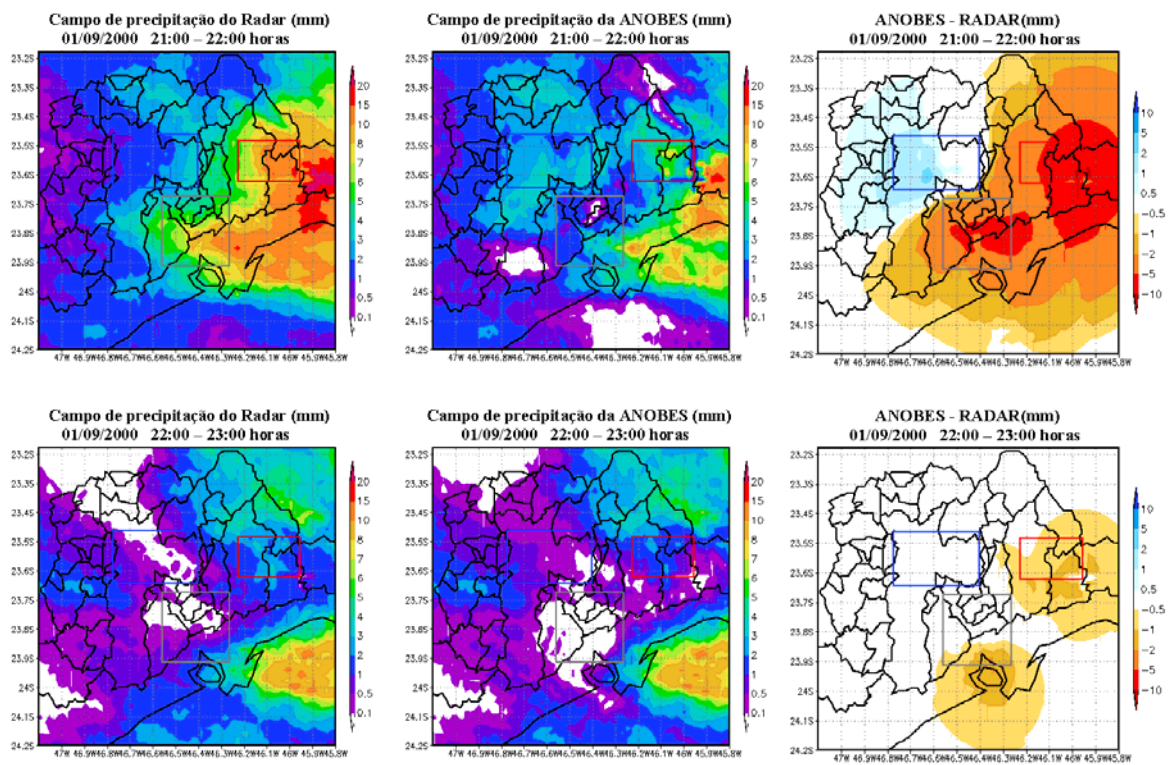


Figura 3.43 Similar a Figura 3.14, exceto para 01/09/2000.

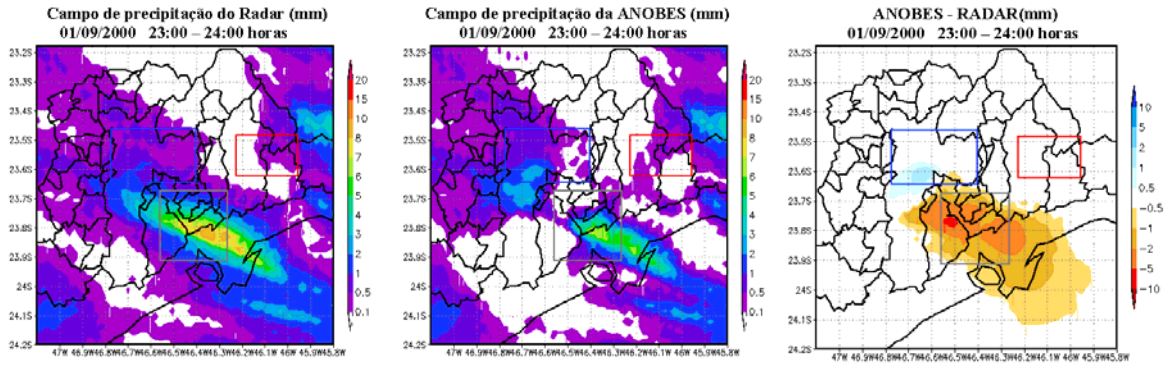


Figura 3.43 Continuação.

A FF do dia 06/05/1999 atuou a partir das 16 horas da tarde, apresentou forte atividade convectiva e as medidas de precipitação foram as mais intensas dentre os casos selecionados. A evolução temporal da precipitação média obtida pela telemetria, radar e ANOBES são mostrados na Figura 3.44. Neste caso, a telemetria registrou precipitação média de 21,9 mm, e o radar estimou a precipitação em 68,7 mm. A ANOBES reduziu a precipitação do radar, estimando 31,3 mm.

Para este evento, são mostrados os campos de precipitação do radar, ANOBES e diferença, para 120 minutos de acumulação, entre as 20 e as 24 horas (Figura 3.45). Assim como nos eventos anteriores, o radar superestimou a precipitação de forma significativa.

Por ser um tipo de sistema que provoca precipitação de forma muito abrangente, não se observa, nos campos da ANOBES, o efeito de precipitação espúria nas áreas sem precipitação, como foi observado, principalmente, nos casos de BM. Isto ocorre porque, sem dados telemétricos para ajustar as estimativas do radar, a ANOBES depende exclusivamente do campo do chuva do radar. Isto ressalta o fato de se ter uma distribuição muito irregular dos postos da rede telemétrica, com quantidade de postos em determinadas regiões e grandes áreas sem postos. Esta má distribuição espacial influencia mais diretamente nos resultados da ANOBES. Pequenas diferenças observadas entre os campos de

precipitação do radar e ANOBES nos eventos não significa que as medidas do radar estão corretas ou tem erros pequenos, pois é provável que células convectivas individuais de vida curta possam ocorrer entre as posições dos pluviômetros da rede telemétrica.

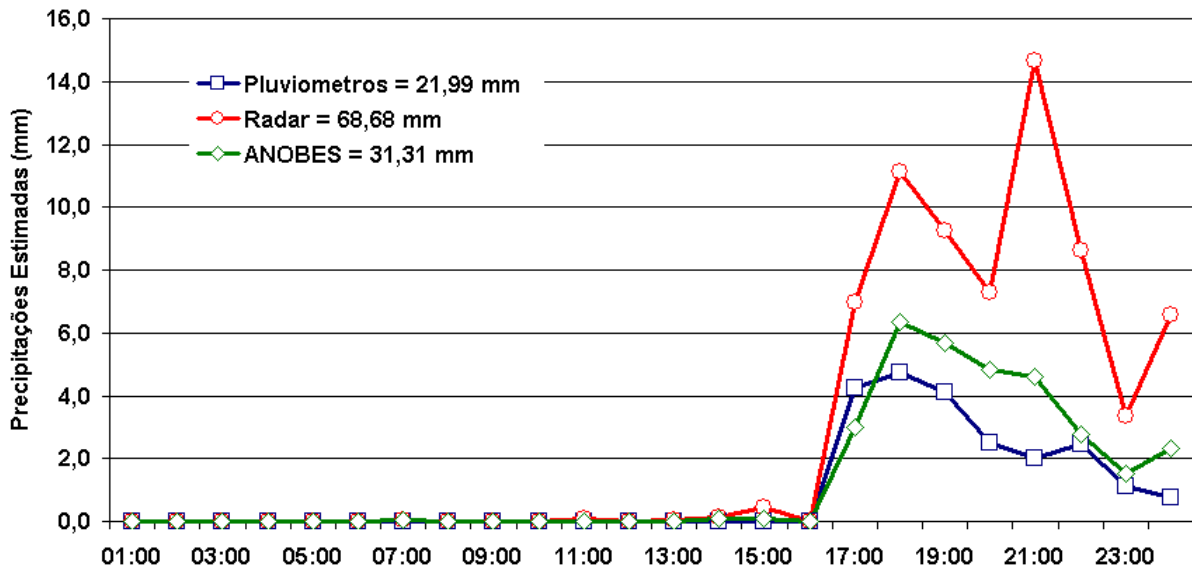


Figura 3.44 Similar a Figura 3.13, exceto para 06/05/1999.

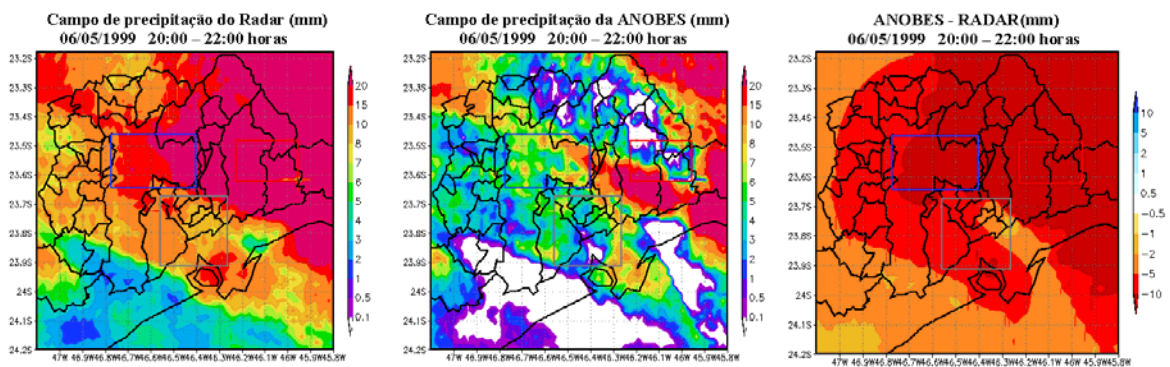


Figura 3.45 Similar a Figura 3.14, exceto para 06/05/1999.

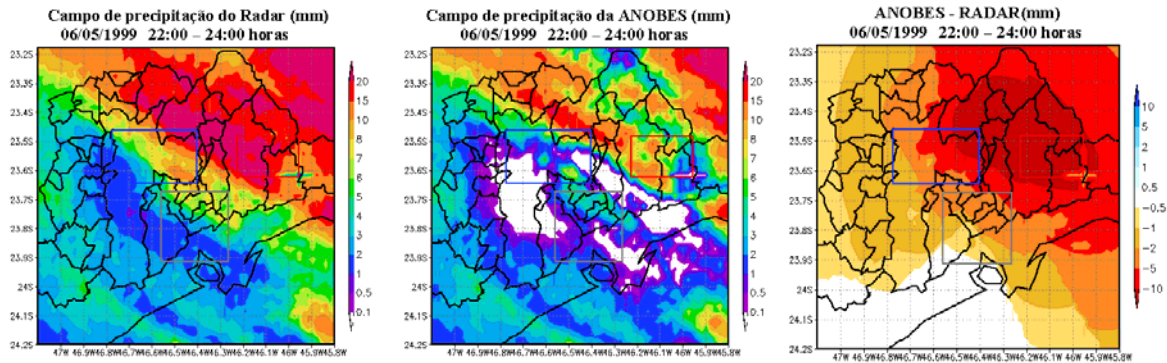


Figura 3.46 Continuação.

Uma síntese dos 15 eventos selecionados, 3 para cada caso, é mostrada da Tabela 3.13 a Tabela 3.17, para cada tipo de sistema precipitante analisado.

Tabela 3.13 Valores de precipitação associados aos sistemas de CI, para 60 minutos de acumulação.

<b>Eventos de CI</b>	<b>P média (mm) (Telemetria)</b>	<b>P média (mm) (Radar)</b>	<b>P média (mm) (ANOBES)</b>
16/02/2000	17,4	10,8	13,2
25/11/2000	19,1	61,8	33,1
26/01/2000	50,8	27,9	42,7

Tabela 3.14 Análogo a Tab 3.13, exceto para BM.

<b>Eventos de BM</b>	<b>P média (mm) (Telemetria)</b>	<b>P média (mm) (Radar)</b>	<b>P média (mm) (ANOBES)</b>
08/01/2000	6,0	7,6	6,6
05/12/1999	4,7	23,1	20,1
09/03/1999	29,1	18,2	20,5

Tabela 3.15 Análogo a Tab 3.13, exceto para LI.

<b>Eventos de LI</b>	<b>P média (mm) (Telemetria)</b>	<b>P media (mm) (Radar)</b>	<b>P media (mm) (ANOBES)</b>
09/02/1999	6,6	26,7	11,8
14/01/2000	7,2	37,1	28,6
26/02/1999	50,8	27,9	42,7

Tabela 3.16 Análogo a Tab 3.13, exceto para BD.

<b>Eventos de BD</b>	<b>P média (mm) (Telemetria)</b>	<b>P media (mm) (Radar)</b>	<b>P media (mm) (ANOBES)</b>
02/01/2000	23,0	41,3	28,1
03/01/2000	32,5	41,2	34,7
04/01/2000	10,9	45,7	20,7

Tabela 3.17 Análogo a Tab 3.13, exceto para FF.

<b>Eventos de FF</b>	<b>P média (mm) (Telemetria)</b>	<b>P media (mm) (Radar)</b>	<b>P media (mm) (ANOBES)</b>
15/07/2000	17,6	20,4	16,5
01/09/2000	19,8	30,9	18,9
06/05/1999	22,0	68,7	31,3

### 3.5 Correlação temporal entre ANOBES, telemetria e radar para os casos estudados

O impacto global da ANOBES para todos os casos estudados é sintetizado por diagramas de dispersão entre a precipitação média desta e com as respectivas do radar. São mostrados os diagramas de dispersão para os intervalos de acumulação de chuva de 60 e 120 minutos,. As Figuras 3.47 e 3.48 mostram o diagrama de dispersão para cada tipo de sistema e respectiva reta de regressão para acumulações de 60 e 120 minutos, respectivamente.

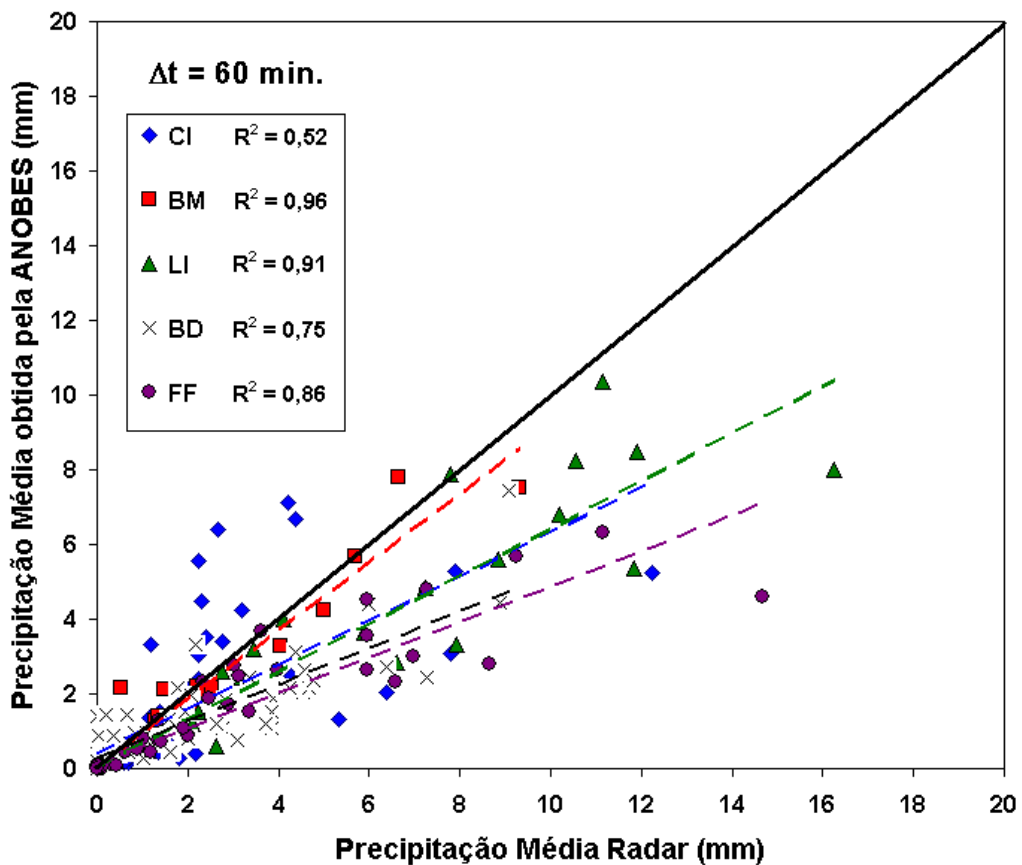


Figura 3.47 Diagrama de dispersão e retas de regressão linear para a precipitação média obtida pela ANOBES e radar, para os casos de CI, BM, LI, BD e FF no intervalo de 60 minutos de acumulação. As linhas tracejadas se referem à regressão linear para cada sistema e a contínua para o ajuste ideal.

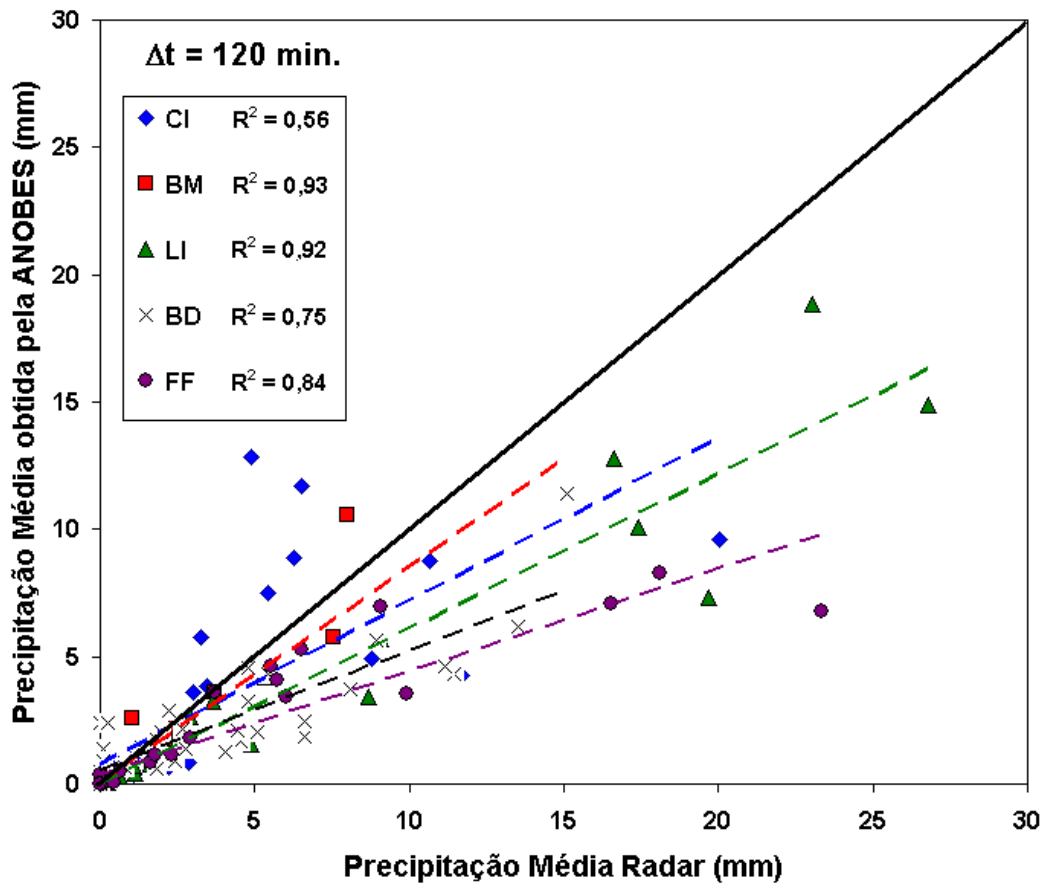


Figura 3.48 Análoga a Fig 3.47, exceto para 120 minutos de acumulação.

A estimativa da variância ( $r^2$ ) entre a chuva média estimada com o radar e analisada pela ANOBES para dos diferentes tipos de sistemas precipitantes não diferem significativamente para os intervalos de acumulação de 60 e 120 minutos. Observa-se que o radar tende a superestimar a precipitação de sistemas mais estratiformes e de mais longa duração, tais como as frentes frias e as bandas dispersas. A precipitação associada às linhas de instabilidade também foram superestimadas pelo radar. A precipitação média de sistema do tipo CI foi subestimada pelo radar em dois dos três casos selecionados devido, claramente, a natureza mais convectiva da chuva associada a estes sistemas. No entanto, o valor do coeficiente de determinação revela que a ANOBES teve bom desempenho para este tipo de sistema, o que mostra que os valores de precipitação do radar ficaram



mais próximos da telemetria após a aplicação da ANOBES. Um fato que contribui para este desempenho neste tipo de sistema é que produzem áreas de precipitação estratiforme no fim do seu ciclo de vida e o deslocamento menor.

Os coeficientes de variação mais altos dos eventos de BM e LI indicam que os dados de superfície têm menor impacto na análise. A ANOBES dá peso maior aos dados do radar para estes sistemas. Os casos de BM e LI, ao contrário da CI, produzem precipitação de deslocamento mais rápido que não são muitas vezes medidas pela rede telemétrica adequadamente.

Os coeficientes de variação das FF e BD indicam uma maior homogeneidade entre eles. Estes resultados indicam que, para estes tipos de sistema, o radar representa a distribuição espacial da chuva adequadamente, mas não necessariamente a sua intensidade. Nota-se nas Figuras 3.47 e 3.48 que o radar superestima a precipitação destes sistemas. A ANOBES reduziu as diferenças entre radar e telemetria.

#### 4. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A série de dados de chuva de 1998 a 2003 foi convertida em campos de precipitação e analisados para identificar padrões associados aos tipos mais freqüentes de sistemas precipitantes que atuam na área de cobertura do radar meteorológico de São Paulo.

Identificaram-se cinco tipos básicos de sistemas de precipitação: Convecção Isolada (CI), Brisa Marítima (BM), Linhas de Instabilidade (LI), Bandas Dispersas de precipitação (BD) e Frentes Frias. Estes sistemas foram caracterizados quanto ao processo de organização dos ecos de chuva, suas distribuições horizontais, deslocamento e duração.

Observou-se que sistemas como CI e BM se formam preferencialmente no período da tarde, entre os horários das 13:30 HL e 18:30 HL e 14:30 HL e 19:00 HL, respectivamente. São sistemas semelhantes caracterizados geralmente por núcleos intensos de precipitação convectiva. A principal diferença está no sentido de deslocamento e na organização. Enquanto a CI se forma preferencialmente no interior do continente e apresenta, geralmente, deslocamentos lentos para leste, a BM forma-se junto à costa, com organização orientada pela Serra do Mar e se desloca para oeste, para o interior do continente.

As LI atuam associadas ou não a sistemas de maior escala, como frentes frias. Elas atuam em todos os horários com predominância no período entre as 15:00 HL e as 17:00 HL. Isto ressalta também o papel do ciclo do aquecimento diurno na formação destes sistemas, assim como da CI e da BM.

Bandas Dispersas ocorrem com maior intensidade geralmente no período de ZCAS, com áreas de precipitação convectiva embebidas em áreas de precipitação

estratiforme. São sistemas que atuam por um período de até 5 dias. A precipitação associada a este tipo de sistema é contínua na maior parte do dia. Apresentam como característica mais marcante o sentido de deslocamento da precipitação que é de NW para SE.

As FF, assim como as BD, atuam, algumas vezes, por até mais de 5 dias. Por muitas vezes se deslocam pela área de cobertura do radar em poucas horas. Em média, seu período de atuação foi de 18 horas. Apresentam também como característica principal o seu sentido de deslocamento, de SW para NE.

Estes eventos também foram classificados em convectivos e estratiformes. Os eventos convectivos são dominantes na primavera e verão e os estratiformes no outono e inverno. Dentre os sistemas observados, a CI e a BM tem seus maiores picos de atuação entre outubro e março enquanto as frentes frias de abril a setembro. Bandas dispersas foram observadas durante todo o ano e as linhas de instabilidade só não foram observadas atuar nos meses de junho e julho.

A comparação entre a precipitação medida pela rede telemétrica e a estimada pelo radar revelou que, na grande maioria dos casos, o radar superestima a precipitação medida pela telemetria. O viés entre radar e telemetria (dado pela razão entre ambos) foi geralmente alto. O resultado da análise das correlações para os sistemas mostrou que as correlações aumentam para intervalos maiores de acumulações da precipitação, com as frentes frias apresentando os melhores resultados.

Desta forma, ao se analisar as correlações espaciais para os sistemas, diretamente dos campos de precipitação do radar, foram obtidas curvas de correlações para os sistemas para quatro intervalos de acumulação diferentes, 15, 30, 60 e 120 minutos. Os resultados esclareceram que, para sistemas de vida curta

e com menor abrangência espacial (e.g., CI e BM), estas correlações espaciais decrescem rapidamente com a distancia, atingindo poucos quilômetros mesmo para intervalos de acumulações maiores. Para as LI, estas correlações persistem até maiores distâncias no caso de intervalos de acumulação de 60 e 120 minutos. Os sistemas de vida mais longa e que abrangem áreas maiores (e.g., BD e FF), apresentaram maiores correlações com a distância do que para os demais sistemas, principalmente para os intervalos de acumulação de 60 e 120 minutos.

Estas estatísticas foram usadas numa técnica de análise objetiva estatística (ANOBES) para a integração de dados de telemetria aos dados do radar. O esquema foi utilizado para três eventos de cada tipo de sistema precipitante, um de baixa, um de média e um de alta acumulação de acordo com a telemetria e radar.

Evidenciou-se que o ANOBES poderia ter melhor desempenho com uma rede de superfície maior e melhor distribuída. A rede telemétrica dispõe de poucos postos para monitorar a bacia hidrográfica do Alto Tietê e com distribuição espacial irregular com postos agrupados em três áreas. Esta má distribuição de postos impossibilitou o estudo sobre toda a área da bacia do Alto Tietê.

Desta forma, para sistemas convectivos como CI, BM e LI, a ausência de dados de chuva da telemetria para além das três áreas, resulta em erros maiores. Isto ocorre porque as funções de correlação utilizadas na ANOBES decaem rapidamente com a distância.

Sem dados telemétricos para ajustar as estimativas do radar, a ANOBES depende exclusivamente do campo de chuva do radar e, também, é provável que células convectivas individuais de vida curta possam ocorrer entre os postos pluviométricos da rede telemétrica e, evidentemente, estes dados não são medidos. Assim, a ANOBES diminuiu as diferenças entre a estimativa de chuva com do radar

e medida da rede de superfície nas três áreas com dados telemétricos. Nos casos de BM e LI houve melhor correlação entre dados da ANOBES e radar, o que indica que não houve melhora significativa nos ajustes. As análises de chuva para acumulação de 120 minutos não são significativamente melhores do que as de 60 minutos, sendo esta última adequada para obter bons resultados pela ANOBES.

Como sugestões para trabalhos futuros propõem-se as seguintes questões:

- Verificar a correlação entre os telemetria e radar para um numero maior de casos e investigar um possível fator de correção para as superestimativas do radar.
- Avaliar para quais intervalos de precipitação o radar apresenta maiores erros, em eventos convectivos e estratiformes.
- Selecionar um número maior de casos para aplicação da ANOBES e assim obter maiores informações dos sistemas de precipitação.
- Aplicar a ANOBES na iniciação de modelos numéricos de previsão e também na análise de desempenho destes.
- Aplicar a ANOBES em modelos hidrológicos para a bacia hidrográficas do Alto Tiete e comparação com dados observados.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHRENS, B.: On precipitation downscaling in alpine hydrology, International Hydrological Programme, *Technical Documents in Hydrology.*, p. 18, in press, 2003.

AUSTIN, P. M., 1987: Relation between measured radar reflectivity and surface rainfall. *Mon. Wea. Rev.*, 115, 1053–1070.

BHARGAVA, M., and M. DANARD, 1994: Application of optimum interpolation to the analysis of precipitation in complex terrain. *J. Appl. Meteor.*, 33, 508–518.

BLANCO, C. M. R., and MASSANBANI, O., 1997: Orographic enhancement in São Paulo – Brazil: a preliminary case study. *28<sup>th</sup> Conference on Radar Meteorology.*, Texas, American Meteorological Society., 449-450.

BARROS, M.T.L. ; B.P.F, BRAGA JR, . São Paulo Flood Warning System : Integrating Different Levels of Data Quality and Availability. In: *2nd. International. Symposium on Hydrological., Applications of Weather Radar*, 1992, Hannover, Alemanha, 1992.

BRANDES, E. A., VIVEKANANDAN, j., and WILSON, J. W., 1998: A comparison of radar reflectivity estimates of rainfall from collocated radars. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.*, 16, 1264-1272.

BROCK, FRED V. *Meteorological Measurement Systems* / Fred V. Brock and Scott J. Richardson. Oxford University Press, 2001, New York, ISBN:0-19-513451-6, 160 pages.

CALVETTI, L. ; BENETI, CESAR ; PEREIRA FILHO, AUGUSTO JOSÉ: Integração do radar meteorológico Doppler do SIMEPAR e uma rede de pluviômetros para a estimativa da precipitação. *In: XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 2003, Belo Horizonte. ANAIS EM CD ROM DO XI SBSR, 2003. v. 1.

CRAWFORD, K. C., 1979: Considerations for the design of a hydrologic data network using multivariate sensors. *Water Resour. Res.*, 15, 1752–1762.

CREUTIN, J. D., and C. OBLED, 1982: Objective analysis and mapping techniques for rainfall fields: An objective comparison. *Water Resour. Res.*, 18, 413–431.

CRUM, J. D., and R. L. ALBERTY, 1993: The WSR-88D and the WSR-88D Operational Support Facility. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 74, 1669-1687.

Doelling, I. G., J. Joss, and J. Riedl, 1998: Systematic variations of *Z-R* relationships from drop size distributions measured in northern Germany during seven years. *Atmos. Res.* 47-48, 635-649.

DUCHON, C. E., T. M. RENKEVENS, and W. L. CROSSON, 1995: Estimation of daily area-average rainfall during CaPE experiment in central Florida. *J. Appl. Meteor*, 34, 2704–2714.

FREITAS, E. D. ; DIAS, PEDRO LEITE DA SILVA . Alguns efeitos de áreas urbanas na geração de uma ilha de calor. **Revista Brasileira de Meteorologia.**, Brasil, v. 20, n. 3, p. 355-366, 2005.

GAN, M. A., and RAO, V. B., 1991: Surface Cyclogenesis over South America. **Monthly Weather Review.**, 119, 1293-1302.

GANDIN, L. S., 1963: Objective Analysis of Meteorological Fields. English translation by R. Harding, **Israel Program for Scientific Translation**, 242 pp.

GRASSOTTI, C., R. N. HOFFMAN, E. R. VIVONI, and D. ENTEKHABI, 2003: Multiplatform intercomparison of two radar products and rain gauge observations over the Arkansas-Red river basin. **Weather Analysis & Forecasting**, 18, 1207-1229.

GROISMAN, P. Y., and D. R. LEGATES, 1994: The accuracy of the United States precipitation data. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, 75, 215–227.

HAAS, R. ; BARROS, Mário Thadeu Leme de ; PEREIRA FILHO, A. J. ; NAKAYAMA, P. T. . Telemetria, sensoriamento remoto e previsão de cheias na região metropolitana de São Paulo. In: **XIII Congresso Latino Americano de Hidráulica**, 1988, Havana, Cuba. v. 2. p. 1-12.

HUFF, F. A., and W. L. SHIPP, 1969: Spatial correlations of storm, monthly and seasonal precipitation. **J. Appl. Meteor.**, 8, 542–550.



JOSS, J., and LEE, R., 1995: The applications of radar-gauge comparisons to operational precipitation profile corrections. *Journal of Applied Meteorology*, 34, No.12, 2612-2630.

KEELER, R.J., LUTZ, J. and J. VIVEKANANDAN: S-Pol: NCAR's polarimetric Doppler research radar, *IGARSS-2000*, Honolulu, 2000.

KLAZURA, G. E., and D. A. IMY, 1993: A Description of the initial set of analysis product available from the NEXRAD WSR-88D system. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 74, 1293-1311.

KRAJEWSKI, W. F., 1987: Cokringing radar-rainfall and rain gage data. *J. Geophys. Res.*, 92, 9571–9580.

LEGATES, D. R., and T. L. DELIBERTY, 1993: Measurement biases in the United States raingage network, *Water Resour. Bull.*, 29, 855–861.

PEREIRA FILHO, A. J.; BAROS, M. T. L: Flood warning system for megacities: a Brazilian perspective. *In: International Conference on Hydrology in a changing environment*, 1998. British Hydrological Society.

PEREIRA FILHO, A. J.; CRAWFORD, K. C.: Integrating WSR-88D estimates and Oklahoma Mesonet measurements of rainfall accumulation: hydrologic response. *In: 3rd Internatinal symposim on hydrological applicatins of weather radar*. São Paulo : ABRH/IAHR, 1995. p. 169-178.

PEREIRA FILHO, A. J.; RODRIGUES, LAURA CHRISTINA TEODORO; GINEZ, WAGNER GARCIA: Impacto das condições meteorológicas no consumo de água na região metropolitana de São Paulo. *In: XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia.*, 2004, Fortaleza. PUDN2 - Planejamento Urbano e Desastres Naturais. Brasília : Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2004.

PEREIRA FILHO, A. J. and P. T. NAKAYAMA, 2001: Intercomparison of radar Rainfall Estimates and Rain Gage Measurements in São Paulo, Brazil. *5th International Symposium on Hydrological Applications of Weather Radar.*, Kyoto, Japan.

PEREIRA FILHO, A. J., 1999: Radar measurements of tropical summer convection: urban feedback on flash floods. *29th radar conference.*, AMS, Montreal, Canada. Paper 17.4.

PEREIRA FILHO, A. J.; CRAWFORD, K. C.: Integrating WSR-88D estimates and Oklahoma Mesonet Measurements of rainfall accumulations: a statistical approach. *27th radar conference.*, 1995, Vail, Colorado. Boston, Massachusetts: American Meteorological Society, 1995. p. 240-242.

PEREIRA FILHO, A. J.; CRAWFORD, K. C.: Mesoscale precipitation fields: part I: statistical analysis and hydrologic response. *Journal of Applied Meteorology*, v. 38, n. 1, p. 82-101, 1999.

- PEREIRA FILHO, A. J.; CRAWFORD, K. C.; STENSRUD, D. J. . Mesoscale precipitation fields: part II: hydrometeorologic modeling. ***Journal of Applied Meteorology***, v. 38, n. 1, p. 101-125, 1999.
- PEREIRA FILHO, A. J.; CRAWFORD, K. C.; HARTZELL, C.: Improving WSR-88D hourly rainfall estimates. ***Weather and Forecasting***, v. 13, n. 4, p. 1016-1028, 1998.
- PEREIRA FILHO, A. J.; SILVA, FABRÍCIO D S.: The morphology of tropical rainfall systems and their hydrological significance. In: ***32nd conference on radar meteorology***, 2005, Albuquerque. Boston: American Meteorological Society, 2005.
- ROCHA, A. M. G. C., and GANDÚ, A. W., 1996: The south Atlantic Convergence Zone. ***Climanálise, Special Edition.***, 140 – 142.
- SATYAMUTI, P., FERREIRA, C. C., and GAN, M. A., 1990: Cyclonic vórtices over South América. ***Tellus, 42A***, 194-201.
- SILVA DIAS, M. A. F., 1989: Storms in Brazil. Hazards and Disasters Series, Storms, Vol. II, R. Pielke Sr., Pielke Jr., ***Eds., Routledge***. Pp. 207-219.
- SMITH, J. A., D. J. SEO, M. L. BAECK, and M. D. HUDLOW, 1996: An intercomparison study of NEXRAD precipitation estimates. ***Water Resour. Res.***, 32, 2035–2045.

STEINER M., HOUZE JR. R. A., and YUTER, S. E., 1995: Climatological Characterization of Three-Dimensional Storm Structure from operational Radar and Rain Gauge Data. *Journal of Applied Meteorology.*, 34, No.9, 1978-2007.

THIEBAUX, H. J., 1976: Anisotropic correlation functions for objective analysis. *Mon. Wea.Rev.*,104,994–1002.

WILSON, J. W., and SCHREIBER, W., 1986: Initiation of convective storms a radar-observed boundary-layer convergence lines. *Monthly Weather Review.*, 114, No.12, 2516-2536.

ZAWADZKI, I. I., 1973: Statistical properties of precipitation patterns. *J. Appl. Meteor.*, 12, 459–472.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)