

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

JOSÉ FELIPE DA SILVA FARIAS

**Previsão de chuva a curtíssimo prazo na área de abrangência do radar
meteorológico de São Paulo**

**São Paulo
2009**

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

JOSÉ FELIPE DA SILVA FARIAS

Previsão de chuva a curtíssimo prazo na área de abrangência do radar meteorológico de São Paulo

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

Orientador: Augusto José Pereira Filho

São Paulo
2009

*Dedico este trabalho aos meus pais, meu irmão,
minha vó materna e minha vó paterna (in memoriam)
pelo incentivo e esforço em investir em minha
formação pessoal e profissional.*

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida por meio de meus pais, Sinda Farias e José Luiz Furtado Farias.

Ao meu orientador, Augusto José Pereira Filho, pela oportunidade de trabalho, paciência, amizade, confiança e conselhos principalmente nos momentos mais difíceis.

Ao meu irmão Vinicius pela amizade, carinho e conselhos. Um agradecimento especial à minha mãe pelas orações, preocupações e confiança em mim.

Ao meu amor, Ianuska Ramos Oliveira, pelo carinho, paciência e apoio principalmente na etapa final deste trabalho.

Aos professores do IAG e a todos os funcionários do departamento em especial ao setor de informática nas pessoas de Sebastião e Samuel pela rápida solução de problemas de computação.

Aos meus colegas de laboratório, Felipe Vemado, Camila Ramos e em especial a Ricardo Hallak, pela amizade e por toda ajuda em muitas etapas de desenvolvimento deste trabalho. E a Kleber Rocha pela parceria tanto na solicitação dos dados de vento quanto no auxílio com programação.

Aos amigos que conviveram comigo: Mário, Maria, Tatiane, João, Diego, Luiz Kruger, Anderson, Mano, Maurício, Marta, Márcio, Ivan, Helber, Cris, Olavo, Pa, Débora, Valéria, Angélica, Moysés Barbará. E um agradecimento especial aos amigos Paulo Foster e Sônia Foster.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro do projeto de pesquisa e da bolsa (projeto número 06/58516-9).

“Na vida há momentos em que os obstáculos vão nos querer fazer desistir, mas lembre: Nunca desista, lute sempre”

(Homens de Honra)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	III
LISTA DE TABELAS.....	VI
LISTA DE SIGLAS.....	VIII
RESUMO	IX
ABSTRACT	X
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVO.....	7
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	7
2.1 O RADAR METEOROLÓGICO	7
2.2 CAMPOS DE PRECIPITAÇÃO	11
2.2.1 LIMITAÇÕES E ERROS NA ESTIMATIVA DE CHUVA PELO RADAR METEOROLÓGICO.....	12
2.3 RADAR METEOROLÓGICO DE SÃO PAULO.....	14
2.4 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS PRECIPITANTES NA ÁREA DE COBERTURA DO RSP.....	16
2.5 PREVISÃO DE CHUVA A CURTÍSSIMO PRAZO	20
2.6 OBTENÇÃO DO VETOR DESLOCAMENTO DO SISTEMA PELO MÉTODO SHARP.....	21
2.7 MODELO ADVECTIVO PARA PREVISÃO DE CHUVA	23
2.8 AVALIAÇÃO DA PREVISÃO DE CHUVA.....	24

2.9 ESQUEMA NUMÉRICO DE TERCEIRA ORDEM CORRENTE ACIMA (ENTOCA).....	26
2.10 FONTES DE ERROS NAS PREVISÕES POR EXTRAPOLAÇÃO DOS ECOS DE RADAR.....	29
2.11 METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA PREVISÃO DE CHUVA.....	30
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	33
3.1 CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS PRECIPITANTES NO LESTE DE SÃO PAULO.....	33
3.2 COMPARAÇÕES ENTRE CAMPOS ACUMULADOS E PREVISTOS	41
3.3 ANÁLISE DO VETOR DESLOCAMENTO DOS SISTEMAS PRECIPITANTES....	54
3.4 DESEMPENHO DA PREVISÃO DE CHUVA	62
4 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	74
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ilustração da transmissão e recepção de energia por uma gota. O pulso de onda é transmitido à velocidade da luz. A distância até a gota é expressa em $d = ct/2$, decorrido um tempo t entre a emissão e recepção do sinal. Fonte: Santos da Silva (2006).	8
Figura 2: Ilustração do volume iluminado pelo feixe do radar com volume V . Fonte: Santos da Silva (2006).	8
Figura 3: Ilustração de varredura do radar para uma dada elevação ϕ em relação ao horizonte. Fonte: Santos da Silva (2006).	11
Figura 4: Ilustração de um PPI (a) e CAPPI (b). Fonte: Santos da Silva (2006).	12
Figura 5: Área de cobertura do radar meteorológico de São Paulo com destaque para Bacia do Alto Tietê (BAT) e a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Fonte: Pereira Filho (2004).	16
Figura 6: Número total mensal de campos de taxa de precipitação disponíveis para análise para o período de 2003 a 2007.	17
Figura 7: Campos da taxa de precipitação obtidos com o RSP entre 02:22 (esquerda) e 04:07 HL (direita) para evento de Frente Fria do dia 19 de outubro de 2005. Latitudes, longitudes e contornos geográficos estão indicados. As escalas de cores indicam a intensidade da precipitação em (mm h^{-1}).	18
Figura 8: Similar à Figura 7, exceto para Banda Dispersa.	19
Figura 9: Similar à Figura 7, exceto para Linha de Instabilidade.	19
Figura 10: Similar à Figura 7, exceto para Convecção Isolada.	20
Figura 11: Similar à Figura 7, exceto para Brisa Marítima.	20
Figura 12: Esquema de amplificação de ondas curtas do ENTOCA. Fonte: Pereira Filho (2002).	28
Figura 13: 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), datas, latitudes, longitudes e contornos geográficos incluindo RMSP estão indicados. Escalas de cores indicam a intensidade da precipitação (mm h^{-1}).	36
Figura 14: Análogo à Figura 13, exceto para (a) linha de instabilidade isolada e, (b) linha de instabilidade na retaguarda de um sistema frontal.	36
Figura 15: Análogo à Figura 13, exceto para (a) banda dispersa estratiforme e, (b) banda dispersa com células convectivas embebidas.	37
Figura 16: Análogo à Figura 13, exceto para duas frentes frias (a) com precipitação estratiforme, e (b) convectiva.	37
Figura 17: Freqüências mensais de eventos estratiformes e convectivos para o período de 2003 a 2007.	39
Figura 18: Freqüências mensais dos diferentes sistemas precipitantes para o período de 2003 a 2007.	40
Figura 19: Campos de precipitação acumulados pelo radar para 30, 60, 90, 120 e 180 minutos (esquerda) e previstos pelo modelo advectivo (direita), para evento de banda dispersa do dia 21 de abril de 2005 as 07:47(UTC). Latitudes, longitudes e contornos geográficos incluindo RMSP estão indicados. As escalas de cores indicam a precipitação acumulada em (mm).	42

Figura 20:	Similar à Figura 19, exceto para evento de Brisa Marítima do dia 02 de janeiro de 2005 às 17:32 (UTC).	44
Figura 21:	Similar à Figura 19, exceto para evento de Convecção Isolada do dia 18 de abril de 2004 às 17:12 (UTC).	46
Figura 22:	Similar à Figura 19, exceto para evento de Linha de Instabilidade do dia 19 de setembro de 2004 às 20:47 (UTC).	48
Figura 23:	Similar à Figura 19, exceto para Sistema Frontal do dia 19 de junho de 2005 às 00:10 (UTC).	50
Figura 24:	Evolução temporal do desempenho da previsão com os índices CSI, POD e FAR para evento de banda dispersa do dia 21 de abril de 2005, para limite de precipitação de 0.2 mm.	53
Figura 25:	Similar a Figura 24, exceto para evento de brisa marítima do dia 02 de janeiro de 2005.	53
Figura 26:	Similar a Figura 24, exceto para evento de Convecção Isolada do dia 18 de abril de 2004.	53
Figura 27:	Similar a Figura 24, exceto para evento de Linha de Instabilidade do dia 18 de setembro de 2004.	54
Figura 28:	Similar à Figura 24, exceto para o evento de Frente Fria do dia 19 de junho de 2005.	54
Figura 29:	Evolução temporal da intensidade (a) e direção (b) de deslocamento para evento de Banda Dispersa do dia 21 de abril de 2005 entre as 07:32 e 14:27 (UTC). Horários, intensidades e direções estão indicados.	56
Figura 30:	Similar a Figura 29, porém para evento de Brisa Marítima do dia 02 de janeiro de 2005 entre as 17:22 e 21:02 (UTC).	57
Figura 31:	Similar a Figura 29, porém para evento de Convecção Isolada do dia 18 de abril de 2004 entre as 17:12 e 18:27(UTC).	58
Figura 32:	Similar a Figura 29, porém para evento de Linha de Instabilidade do dia 18 de setembro de 2004 entre as 20:37 e 01:02(UTC).	59
Figura 33:	Similar a Figura 29, porém para Sistema Frontal do dia 19 de junho de 2005 entre as 00:05: e 01:20(UTC).	60
Figura 34:	Avaliação do desempenho da previsão de chuva a curtíssimo prazo pelo índice CSI para evento de Brisa Marítima do dia 02 de janeiro de 2005 (curva vermelha) e sistema frontal do dia 19 de junho de 2005 (curva azul) para o limiar de 0,2 mm de chuva acumulada.	62
Figura 35:	Desempenho da previsão de chuva a curtíssimo prazo para os diferentes sistemas precipitantes, pelos índices CSI, POD e FAR, para o limiar de 0.2 mm de chuva acumulada.	63
Figura 36:	Similar a Figura 35, exceto para o limiar de 2.0 mm de chuva acumulada.	64
Figura 37:	Similar a Figura 35, exceto para o limiar de 4.0 mm de chuva acumulada.	65
Figura 38:	Similar a Figura 35, exceto para o limiar de 8.0 mm de chuva acumulada.	66
Figura 39:	Similar a Figura 35, exceto para o limiar de 16.0 mm de chuva acumulada.	67
Figura 40:	Coeficiente de correlação da previsão para os diferentes tipos de sistemas precipitantes como monitorados pelo RSP.	71

Figura 41: Erro Quadrático Médio da precipitação acumulada em 3 horas prevista pelo modelo advectiono em relação ao estimado pelo RSP.....	73
Figura 42: Termo de amplitude do Erro Quadrático Médio da precipitação acumulada em 3 horas prevista pelo modelo advectiono em relação ao estimado pelo RSP.....	73
Figura 43: Similar a Fig. 42, exceto para o Termo de fase do Erro Quadrático Médio.	74

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 RELAÇÕES ZR ENCONTRADAS NA LITERATURA. FONTE: SANTOS DA SILVA (2006).	10
TABELA 2 CONTAGEM DAS PREVISÕES DE CURTÍSSIMO PRAZO COM RESOLUÇÃO DE 2 KM PARA UM DETERMINADO LIMITE DE CHUVA HORÁRIA (P_0) CONTRA OS RESPECTIVOS VALORES OBSERVADOS COM O RSP E FÓRMULAS DE OBTENÇÃO DOS ÍNDICES CSI, POD E FAR.	25
TABELA 3 EVENTOS DE FRENTE FRIA UTILIZADOS PARA AVALIAR A PREVISÃO DE CHUVA COM O MODELO ADVECTIVO.	30
TABELA 4 SIMILAR A TABELA 2.3, EXCETO PARA EVENTOS DE BANDA DISPERSA.	31
TABELA 5 SIMILAR A TABELA 2.3, EXCETO PARA EVENTOS DE BRISA MARÍTIMA.	31
TABELA 6 SIMILAR A TABELA 2.3, EXCETO PARA EVENTOS DE CONVECÇÃO ISOLADA.	32
TABELA 7 SIMILAR A TABELA 2.3, EXCETO PARA EVENTOS DE LINHA DE INSTABILIDADE.	32
TABELA 8 DIREÇÃO PREDOMINANTE E VELOCIDADE MÉDIA DOS SISTEMAS PRECIPITANTES PARA O PERÍODO DE 2003 A 2007.	61
TABELA 9 PORCENTAGEM DO DESEMPENHO MÉDIO DA PREVISÃO DE CHUVA PARA 60 MINUTOS DE PRECIPITAÇÃO ACUMULADA PELOS ÍNDICES CSI, POD E FAR, PARA O LIMIAR DE 0.2 MM DE CHUVA ACUMULADA PARA CADA SISTEMA PRECIPITANTE.	68
TABELA 10 SIMILAR A TABELA 9, EXCETO PARA O LIMIAR DE 2.0 MM DE CHUVA ACUMULADA.	69
TABELA 11 SIMILAR A TABELA 9, EXCETO PARA O LIMIAR DE 4.0 MM DE CHUVA ACUMULADA.	69

TABELA 12 SIMILAR A TABELA 9, EXCETO PARA O LIMIAR DE 8.0 MM DE CHUVA ACUMULADA.69

TABELA 13 SIMILAR A TABELA 9, EXCETO PARA O LIMIAR DE 16.0 MM DE CHUVA ACUMULADA.70

LISTA DE SIGLAS

CAPPI	<i>Constant Altitude Plan Position Indicator</i>
CHMI	<i>Czech Hydrometeorological Institute</i>
CSI	<i>Critical Success Index</i>
ECNWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
ENTOCA	<i>Esquema Numérico de Terceira Ordem Corrente Acima</i>
EQM	Erro Quadrático Médio
FAR	<i>False Alarm Rate</i>
FDP	<i>Forecast Demonstration Project</i>
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NEXRAD	<i>Next - Generation Radar</i>
NWP	<i>Numerical Weather Prediction</i>
POD	<i>Probability of Detection</i>
PPI	<i>Constant Altitude Plan Position Indicator</i>
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
RSP	Radar de São Paulo
SHARP	<i>Short-term Automated Radar Prediction</i>
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul

RESUMO

A avaliação da previsão de chuva a curtíssimo prazo com até 3 horas de antecedência na área de cobertura do RSP para diferentes tipos de sistemas precipitantes, principalmente os associados às enchentes e deslizamentos na RMSP, foi realizada por meio de um modelo advectivo a partir do campo de vento 2D médio e da velocidade dos campos das taxas de precipitação estimados com o radar e um Esquema Numérico de Terceira Ordem Corrente Acima (ENTOCA). O ENTOCA utiliza um vetor com deslocamento mantido constante. O desempenho da previsão para precipitação acumulada num determinado intervalo de tempo foi avaliado pelo Índice de Sucesso Crítico (CSI), Probabilidade de Detecção (POD) e Razão de Falsos Alarmes (FAR). Quantitativamente, a acurácia da previsão foi avaliada por meio do Erro Quadrático Médio (EQM). O coeficiente de correlação mostrou que a qualidade da previsão decresce ao longo do tempo, com maior previsibilidade para os sistemas estratiformes do que para os convectivos. O ENTOCA não considera a evolução espaço-temporal dos sistemas precipitantes durante a extrapolação do campo das taxas de precipitação. Em geral, constatou-se uma subestimativa da precipitação acumulada. As previsões também apresentaram maior desempenho para até 90 minutos e menor, a partir de 120 minutos de extrapolação. O desempenho médio da previsão pelo índice CSI para o limiar de 0.2 mm ao final de 60 minutos de precipitação acumulada foi: FFs (77%), Lis (67,5%), BDs (58%), CIs (56,4%) e BMs (47%). Em geral, a partir de 90 minutos de advecção (sistemas convectivos) e 120 minutos (sistemas estratiformes), o desempenho da previsão diminui exponencialmente.

ABSTRACT

The evaluation of the rainfall short-term forecast up to 3 hours in advance within the surveillance area of São Paulo weather radar (RSP) for different types of precipitating systems, mainly the are associated to floods and landslides in Metropolitan Area of São Paulo (RMSP), was carried out with an 2D wind advective scheme and rainfall rates estimated with the RSP. The third-order upstream numerical scheme (ENTOCA) was used with a uniform wind vector. The rainfall forecast skill for a given time interval was evaluated by the Critical Success Index (CSI), Probability of Detention (POD) and False Alarm Rate (FAR). Quantitatively, the accuracy of the forecast was evaluated with the mean-square error (mse). The correlation coefficient showed that the quality of the forecast decrease with time, with better skill for the stratiform systems than for convective ones, given that the ENTOCA do not take into account spatial-temporal evolution of the rainfall systems. In general, the precipitation accumulation was underestimated. The forecasts had better skill up to 90 minutes. The average skill based on CSI for the thresholds of 0.2 mm at 60 minutes the precipitation accumulation are: FFs (77%), Lis (67,5%), BDs (58%), CIs (56,4%) and BMs (47%). In general, from 90 minutes of advection (convective systems) and 120 minutes (stratiform systems), the skill of the forecast decreases.

1 INTRODUÇÃO

A urbanização brasileira da segunda metade do século XX ocasionou a alteração do espaço geográfico e, como consequência, as cidades viraram centros polarizadores da vida econômica, política e cultural. A facilidade proporcionada às pessoas, principalmente pelas cidades de grande e médio porte, trouxe significativos benefícios sociais e econômicos e também problemas ambientais.

A ocupação desordenada do território aliada à falta de planejamento e ao crescimento acelerado da população faz com que inúmeros impactos negativos acabem incidindo sobre a própria população, principalmente a população de baixa renda.

O processo de urbanização altera a cobertura e ocupação do solo, afetando dessa forma os processos naturais de escoamento da precipitação, o que resulta em enchentes e deslizamentos que afetam a vida de milhares de pessoas (Pereira Filho, 1998). A ocupação da superfície altera os padrões das circulações atmosféricas locais, devido ao aumento da temperatura e à ilha de calor urbana (Freitas e Silva Dias, 2005; Pereira Filho, 2000), sendo estas responsáveis pela precipitação de origem convectiva que atinge as regiões mais habitadas pela população, como é o caso da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Nos Estados Unidos, Colorado é frequentemente afetado por precipitação de alta intensidade e curta duração durante o verão, decorrente tanto da topografia, devido à influência das Montanhas Rochosas, quanto à urbanização das bacias, o que acarreta numa resposta hidrológica mais rápida, geralmente menor que 6 horas, ocasionando enchentes que geram prejuízos aos mais diversos setores da sociedade, da ordem de bilhões de dólares.

As enchentes que atingem a RMSP, principalmente às de origem convectivas, em decorrência da alta intensidade e curta duração, causam muitas fatalidades e o maior desafio associado às enchentes é caracterizar não a ocorrência da mesma, mas sim antecipar a magnitude desta. Uma vez, que é a quantidade de chuva que transforma uma precipitação “normal” em uma situação de risco de vida, ou seja, em uma enchente, antecipar a magnitude desta é de extrema importância, principalmente em bacias urbanizadas, como a bacia do Alto Tietê. Uma enchente é a concatenação entre um evento meteorológico intenso e uma situação hidrológica particular, pois um determinado evento de chuva numa bacia, por exemplo, é afetado por fatores como precipitação antecedente, dimensões e topografia da bacia, além da urbanização dessas. Dessa forma, é imprescindível realizar nessas regiões previsão da precipitação com alta resolução espacial e temporal.

O aumento nos últimos anos da disponibilidade de dados de radar com alta resolução espacial e temporal, desenvolvimento de técnicas computacionais e diferentes técnicas para aplicação da previsão de chuva a curtíssimo prazo (0-3h) (Einfalt et al., 1990) têm possibilitado a análise do tempo com algumas horas de antecedência, principalmente em regiões bastante habitadas pela população, como os grandes centros urbanos. Entretanto, a quantificação e a variabilidade da distribuição espacial e temporal da precipitação dificultam a acurácia da previsão de chuva a curto prazo. A previsão da quantidade de chuva numa determinada área inclui alto índice de incerteza, e testes com modelos hidrológicos mostram que o erro em quantificar a precipitação é responsável pelos erros encontrados nas previsões hidrológicas (Novák, 2007). Esses erros também variam de acordo com o tipo de sistema precipitante

avaliado, bem como de acordo com a estrutura e grau de organização deste. Para expressar as incertezas da quantificação da chuva deve-se utilizar um maior número de eventos precipitantes como entrada em modelos hidrológicos. Para este propósito, podem ser usadas previsões de vários modelos numéricos (por exemplo: ECMWF, NCEP e modelos locais), como efetuado pelo CHMI (Czech Hydrometeorological Institute). A quantificação da precipitação em um determinado local, um dos fatores que limitam a acurácia da previsão de chuva a curtíssimo prazo, é alvo de estudo de muitos autores. Johnson e Brás (1980) desenvolveram procedimento estatístico utilizando observações de pluviômetros. Georgakakos e Brás (1984a, b) utilizaram observações meteorológicas de superfície e pluviômetros. Browning e Collier (1989) revisaram uma ampla classe de processos, conhecidos como 'nowcasting', utilizando radar meteorológico, uma vez que este instrumento apresenta uma melhor resolução espacial dos sistemas precipitantes com intuito de monitorar a precipitação. Tais processos são amplamente aplicados operacionalmente (Elvander, 1976; Bellon e Austin, 1978, 1984; Browning et al., 1982; Walton e Johnson, 1986; Einfalt et al., 1990). Neste processo, a precipitação é extrapolada espacialmente por meio da velocidade do sistema precipitante por meio da advecção do campo de precipitação mais recente do radar. Trata-se de um método advectivo que é muito utilizado para fazer previsão da precipitação por ser prático, apresentar alta resolução temporal e espacial e ser menos sensível às mudanças morfológicas dos sistemas. Além disso, o método mostra trajetórias mais realísticas dos sistemas, baseado na extrapolação dos ecos de chuva nas sucessivas imagens de radar. De acordo com Sálek et al. (2006), resultados de testes com modelos hidrológicos utilizando extrapolação de ecos de radar mostram que é possível prever enchentes com minutos de antecedência, principalmente em

pequenas bacias. De acordo com Collier e Ishizaki (1989), o melhor resultado para previsão da precipitação a curtíssimo prazo é obtido pela observação dos ecos de chuva na imagem de radar, supondo-se que os mesmos padrões são mantidos durante o deslocamento, ou seja, sem que haja alteração na direção e estrutura dos sistemas precipitantes ao longo do tempo.

O conceito de extrapolação dos ecos das imagens de radar como base para previsão da chuva a curtíssimo prazo foi primeiramente sugerido por Ligda (1954). O uso computacional para extrapolar os ecos de radar para prognóstico imediato da posição futura dos sistemas precipitantes teve início na década de 1960. O campo total de eco de radar é extrapolado linearmente segundo um vetor deslocamento constante, ou seja, os padrões da precipitação para uma duração de até 3 h, propiciadas pelos ecos de radar, são transladados por uma quantidade proporcional ao movimento do sistema, desconsiderando-se modificações na estrutura e distribuição da intensidade da precipitação.

Os primeiros resultados baseados em técnicas de extrapolação de ecos de radar, principalmente para previsão de chuva em bacias urbanas, foram obtidos por Austin e Bellon (1974), sendo amplamente utilizados. Nos Estados Unidos, o desenvolvimento de técnicas de extrapolação e interpretação de imagens de radar foi destinado a avisos de tempestades severas, enquanto que na Europa foi destinado à estimativa da quantificação da precipitação. Para fins de previsão de chuva a curtíssimo prazo, as técnicas de extrapolação de ecos de radar apresentam mais sucesso para sistemas mais organizados, com ciclo de vida maior, tais como sistemas frontais e linhas de instabilidade.

Uma limitação dos métodos advectivos (Brémaud e Pointin, 1993; Johnson et al., 1998; Pereira Filho et al., 1999; Wolfson et al., 1999; Handwerker, 2002) é a não estimativa da dinâmica dos sistemas precipitantes (Pereira Filho et al., 1989; Smith e Austin, 2001). Isto ocorre principalmente nos sistemas convectivos, devido à sua rápida evolução e curto ciclo de vida (Houze, 1993). Tais fatores são considerados essenciais na determinação do limite da previsibilidade, uma vez que a maior dificuldade está em prever a condição inicial e, por conseguinte, a evolução da convecção (Mueller et al., 2003). Isso faz com que o "Skill" da previsão para este tipo de sistema decresça rapidamente com o tempo, além de subestimar a quantificação da precipitação. A subestimativa da previsão da precipitação acumulada pela advecção lagrangeana decresce dos sistemas convectivos e intensos (mais variáveis no espaço e tempo), para os estratiformes (menos variáveis no espaço e tempo).

Para um intervalo de tempo curto (0-3h), a advecção lagrangeana (extrapolação linear) dos ecos de radar, apresenta um melhor desempenho na previsão de chuva enquanto que, para períodos maiores (acima de 6h), os modelos é que apresentam melhor desempenho na previsão. Isto é explicado pelo fato do primeiro simular melhor a condição inicial do sistema precipitante, piorando ao decorrer do tempo, uma vez que não considera o crescimento e decaimento da estrutura dos sistemas. Já os modelos, que não simulam tão bem o campo inicial de chuva, acompanham melhor a dinâmica do sistema ao longo do tempo.

O interesse científico dos estudos tem sido mais na localização futura da precipitação do que na sua intensidade. Entretanto, um método para auxiliar neste problema é a aplicação de campos derivados de modelo para estimar o

desenvolvimento potencial (Pierce et al., 2000), sendo este aplicado principalmente na previsão de sistemas precipitantes convectivos, que tendem a subestimar a precipitação na posição da tempestade. Outros métodos são também empregados nos estudos de predição a curto prazo de sistemas precipitantes, principalmente os de origem convectiva, como os métodos automáticos que detectam e extrapolam células convectivas (Dixon e Weiner, 1993). Outros métodos referem-se aos modelos conceituais que predizem de forma lagrangeana a evolução da convecção (Pierce e Hardaker, 2000; Sleigh e Collier, 2004; Mueller et al. (2003)) e, além desses, métodos que combinam extrapolação de ecos de radar e predição numérica de tempo (NWP) por meio de modelos de alta resolução.

A previsão de chuva a curtíssimo prazo é de suma importância principalmente em áreas muito habitadas, auxiliando na redução das fatalidades causadas por tornados, tempestades e enchentes, além de evitar grandes prejuízos aos diversos setores da sociedade como os privado, industrial, transporte e agrícola. Neste sentido, os alertas de tempo são ferramentas de extrema utilidade, a exemplo do que ocorre desde 1988 nos Estados Unidos com a implantação da NEXRAD (Next - Generation Radar). Entretanto, poucos estudos existem em relação aos benefícios na melhoria da previsão de chuva a curtíssimo prazo. Tendo em vista a necessidade do desenvolvimento de técnicas para melhorar a previsão de chuva a curto prazo, pode-se citar o projeto Sydney 2000 FDP Keenan (2003), baseado no monitoramento de sistemas precipitantes para inúmeros países, destinado tanto para tempo severo quanto para previsão da precipitação. O projeto utilizou radares modernos e avançados recursos computacionais e técnicas de programação com o objetivo de explorar as

melhorias na previsão de chuva a curto prazo e mitigar os efeitos causados pelos sistemas precipitantes, principalmente nos grandes centros urbanos.

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi verificar previsões de chuva a curtíssimo prazo (0-3h) com o radar meteorológico de São Paulo (RSP) por meio de um modelo advectivo que utiliza o campo do vento 2D médio, a velocidade de deslocamento dos sistemas precipitantes e um Esquema Numérico de Terceira Ordem Corrente Acima (ENTOCA). O ENTOCA foi utilizado e verificado por Pereira Filho et al.(1999). Com esta metodologia avaliou-se a previsibilidade dos diferentes tipos de sistemas precipitantes e suas respectivas freqüências na área de cobertura do RSP.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 O RADAR METEOROLÓGICO

Radar é um sistema eletromagnético utilizado para detecção e localização de objetos a longas distâncias.

O princípio de funcionamento do radar meteorológico consiste na emissão, por meio de uma antena, de um pulso de energia eletromagnética de duração de μs e de comprimento de onda λ (cm). Os pulsos de onda eletromagnética são altamente energéticos para alcançar longas distâncias e viajam na velocidade da luz. Quando a energia eletromagnética é interceptada por um alvo (por exemplo, uma gota de chuva) é dispersada em todas as direções (Fig. 1). Uma pequena fração retorna na direção do pulso emitido pelo radar, e dessa forma, é captada por um refletor, o qual geralmente

está localizado na mesma antena. O tempo transcorrido entre a emissão e recepção do pulso determina a distância entre o radar e o alvo (obstáculo).

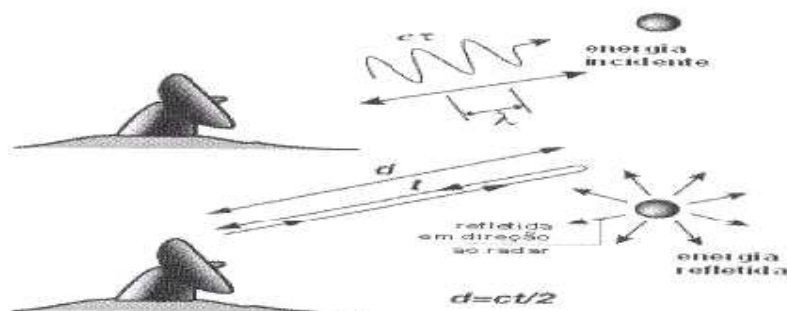


Figura 1: Ilustração da transmissão e recepção de energia por uma gota. O pulso de onda é transmitido à velocidade da luz. A distância até a gota é expressa em $d = ct/2$, decorrido um tempo t entre a emissão e recepção do sinal. Fonte: Santos da Silva (2006).

O radar mede a energia retroespalhada em sua direção pelas gotas de água contidas no interior de certo volume V (Fig. 2), determinado pela metade da duração do pulso de onda.

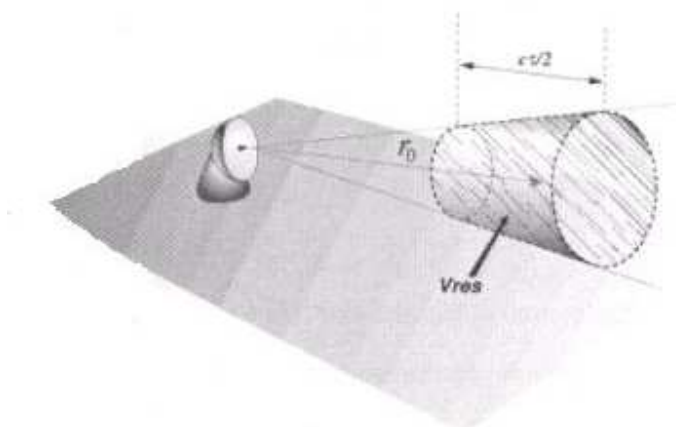


Figura 2: Ilustração do volume iluminado pelo feixe do radar com volume V . Fonte: Santos da Silva (2006).

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 de água localizadas no interior do volume V a uma distância r_0 do radar. A potência média é resultante de n pulsos, tal que o sinal seja estável; C é denominada de constante do radar que contém uma série de características do radar, tais como comprimento de onda, forma e largura do feixe, potência transmitida, ganho da antena, comprimento do pulso. Z é a refletividade das gotas no volume iluminado pelo radar. L é o fator de perda do radar. Este é um valor calculado para compensar a atenuação pela precipitação, gases atmosféricos e limitações da detecção do receptor.

A refletividade é definida como a integral do produto dos diâmetros das gotas (D) no interior do volume elevadas a sexta potência pelo número de gotas de cada categoria N(D), assim expressa:

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

O fluxo de água através de uma superfície expressa a intensidade de chuva, e pode ser obtida da forma que segue:

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

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

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

Os parâmetros a e b variam significativamente, e os métodos mais utilizados para obtê-los são:

- Comparação de dados de postos pluviométricos com os de radar.
- Utilização de um disdrômetro para medição direta do diâmetro das gotas de chuva Doeling et al.(1998).

Na literatura há um grande número de relações ZR experimentais, que variam de acordo com a localização geográfica e tipo de chuva. Algumas destas relações são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 relações ZR encontradas na literatura. Fonte: Santos da Silva (2006).

Z = a x 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	1,21	Neve
WSR-88D	300	1,4	Convecção profunda de verão
Rosenfeld	250	1,2	Sistemas convectivos tropicais

2.2 CAMPOS DE PRECIPITAÇÃO

Os campos horizontais de precipitação são obtidos da refletividade do radar ou da transformação desta em taxa de precipitação em um determinado elemento de área denominado pixel.

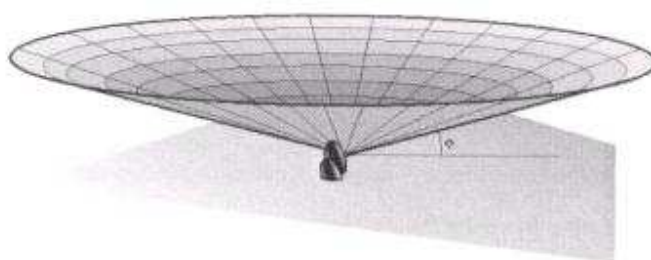


Figura 3: Ilustração de varredura do radar para uma dada elevação ϕ em relação ao horizonte. Fonte: Santos da Silva (2006).

O radar meteorológico varre a troposfera em azimute e elevação por meio de movimentos de rotação e elevação, respectivamente (Fig. 3).

As medições de refletividade em coordenadas esféricas são processadas para originar mapas horizontais de precipitação como:

- a) PPI: Constant Altitude Plan Position Indicator, que corresponde à refletividade numa determinada elevação projetada num plano horizontal (Fig. 4a).
- b) CAPPI: Constant Altitude Plan Position Indicator, cuja refletividade num plano horizontal a uma determinada altitude é obtida por meio de segmentos de diversas elevações mais próximas da altitude de interpolação (Fig. 4b).

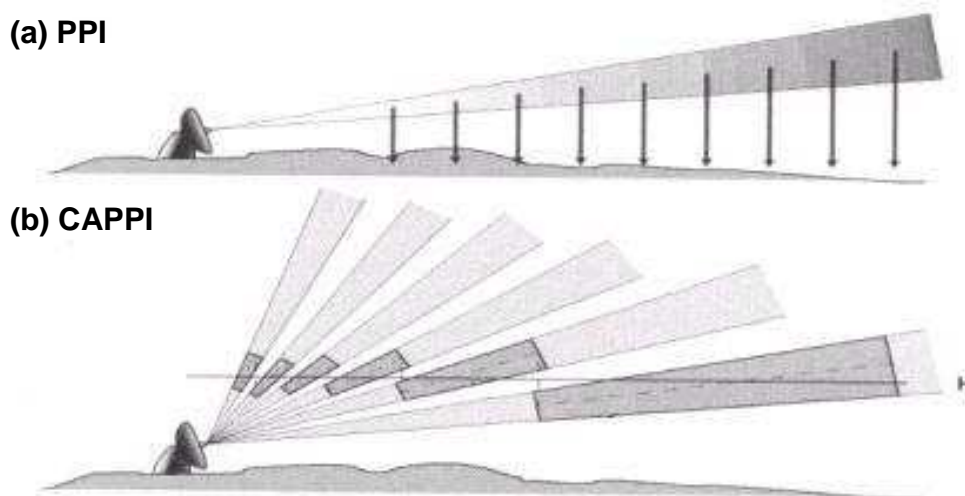


Figura 4: Ilustração de um PPI (a) e CAPPI (b). Fonte: Santos da Silva (2006).

Além da intensidade da chuva, os mapas de precipitação, podem fornecer informações a respeito da natureza das nuvens responsáveis por esta. Por exemplo, quando há ecos homogêneos, estes podem traduzir a presença de nuvens estratiformes. Por outro lado, quando há ecos intensos, isolados e descontínuos, estes geralmente indicam nuvens cumuliformes, do tipo cumulonimbus (Cotton e Anthes, 1989). Dessa forma, o radar meteorológico é um instrumento de teledetecção muito importante, uma vez que proporciona o monitoramento dos sistemas precipitantes, a individualização das áreas de chuva e, dentro destas, os núcleos de maior intensidade de precipitação.

2.2.1 LIMITAÇÕES E ERROS NA ESTIMATIVA DE CHUVA PELO RADAR METEOROLÓGICO

Uma limitação de extrema importância na utilização do radar meteorológico reside no fato deste possuir um alcance limitado, algo em torno de 200 km. Além disso,

quanto maiores estas distâncias, as precipitações tornam-se indetectáveis ou as suas medições são processadas com uma ampla margem de erro.

A resolução e frequência das imagens é outra restrição à utilização do radar, sendo importante, principalmente, no domínio da Hidrologia Urbana, devido à necessidade em tempo real da utilização das imagens, às redes de saneamento, no gerenciamento de águas pluviais (Jacquet, 1986) e para propósitos de previsão de chuva em bacias urbanizadas.

A margem de erro é a limitação que mais influencia as medições de chuva, principalmente a medição quantitativa das intensidades estimadas. As principais fontes de erro nestas estimativas seguem os aspectos de Sauvageot (1982), tais como:

- As relações ZR: válidas para hipóteses muito restritivas quanto à homogeneidade do alvo do radar. A distribuição granulométrica das precipitações pode variar no tempo e espaço, ao longo do mesmo episódio chuvoso.
- Banda brilhante: quando o feixe do radar atinge um nível em que a temperatura é de 0° C (associada às mudanças de estado físico entre gelo e água líquida). Neste caso, as partículas de gelo ficam cobertas por uma fina película de água (o que aumenta o seu diâmetro), o que é traduzido nas imagens de radar por um pico de refletividade, o que superestima as medidas de intensidade da precipitação;

- Atenuação do sinal: quando com o afastamento ao radar o feixe vai-se atenuando, diminuindo o grau de precisão na estimativa das intensidades, principalmente nas regiões de forte intensidade de precipitação;
- Ecos de terreno: quando o feixe do radar é interceptado por obstáculos (construções, relevos) e pode determinar a medição de refletividades sem qualquer relação com as precipitações. É o que se denomina de ecos de solo, que por serem quase constantes e visíveis nas imagens com tempo seco, são fáceis de serem identificados;

A utilização do radar meteorológico na estimativa de chuva constitui uma tarefa muito complexa, o que exige a realização de procedimentos que permitam não só atenuar os erros apresentados, como também superar os problemas de advecção. A advecção é dependente do perfil vertical do vento, o que provoca um deslocamento horizontal das gotas em queda e condiciona também a evaporação parcial desta. Como consequência, a precisão na medição quantitativa da precipitação é afetada.

2.3 RADAR METEOROLÓGICO DE SÃO PAULO

O Radar Meteorológico de São Paulo (RSP), em operação desde 1988, está instalado junto à barragem de Ponte Nova, localizada na cabeceira do Rio Tietê. O RSP varre a atmosfera num raio de 240 km em azimute com 360 radiais e 33 elevações a cada 5 minutos. As refletividades [Z ($\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$)] dos hidrometeoros medidas com o RSP têm uma resolução volumétrica de 2° por 0.5 km. O RSP opera com comprimento de onda de 10 cm, o que o classifica como um radar banda S. Os dados são convertidos para taxas de precipitação [R (mm h^{-1})] por meio da relação $Z=200 R^{1.6}$, de Marshall &

Palmer (1948), e interpolados na altitude de 3 km, com resolução horizontal de 2 km x 2 km. Assim, são gerados campos das taxas de precipitação num raio de 240 km que abrange grande parte do litoral paulista, sul de Minas Gerais, Vale do Paraíba e sul do Rio de Janeiro (Fig. 5). O RSP está localizado nas seguintes coordenadas geográficas:

- latitude: 23° 36' 00" S
- longitude: 45° 58' 20" W
- altitude: $z = 916$ metros

O RSP é constituído por vários componentes, como: antena (refletor), redoma, pedestal, transmissor, receptor, vídeo digitador e sistema processador (Pisani, 1995). O RSP permite acompanhar a evolução espaço-temporal dos sistemas precipitantes que atuam no leste do Estado de São Paulo, principalmente sobre as bacias hidrográficas da região, sendo assim uma ferramenta imprescindível para previsão de chuva até 3 horas de antecedência. O RSP envia seus dados para um microcomputador no centro operacional (CTH – Centro Tecnológico de Hidráulica) na Cidade Universitária em São Paulo.



Figura 5: Área de cobertura do radar meteorológico de São Paulo com destaque para Bacia do Alto Tietê (BAT) e a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Fonte: Pereira Filho (2004).

2.4 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS PRECIPITANTES NA ÁREA DE COBERTURA DO RSP

Os dados do RSP no formato (CAPPI) a um nível de 3 km com resolução espacial de 4 km² e temporal de 5 minutos para o período de 2003 a 2007 foram convertidos em campos de taxa de precipitação por meio de programas desenvolvidos em linguagem Fortran e Shell scripts. Em seguida, os mesmos foram animados e analisados visualmente visando-se a identificação dos diferentes tipos de sistemas precipitantes que atuam na área de cobertura do RSP. Os sistemas identificados foram denominados: Frente Fria (FF), Linha de Instabilidade (LI), Banda Dispersa (BD), Convecção Isolada (CI) e Brisa Marítima (BM). Em adição, os eventos foram classificados quanto a sua intensidade em convectivos e estratiformes.

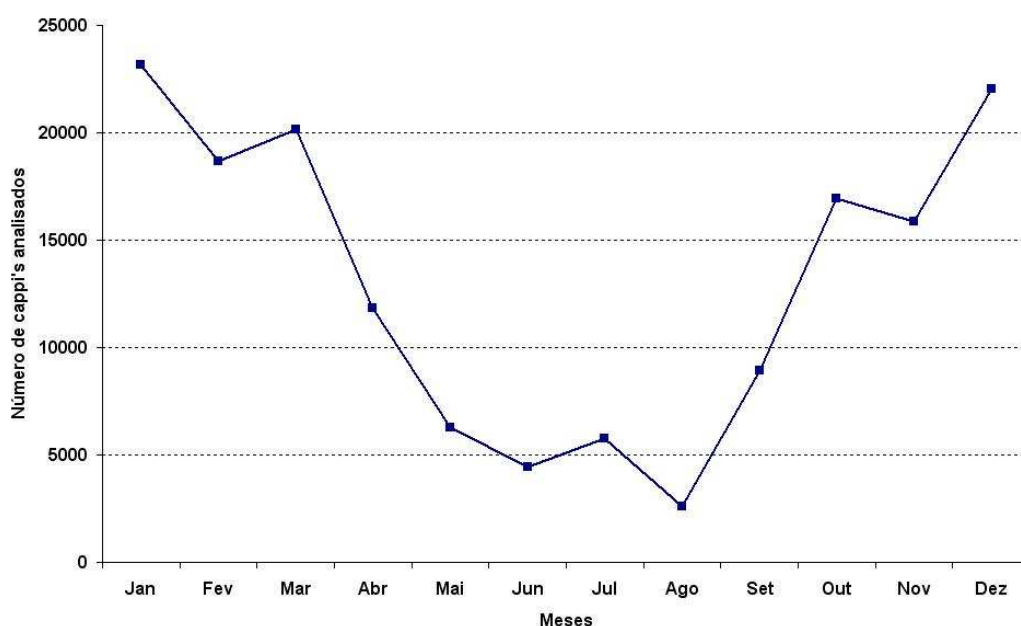


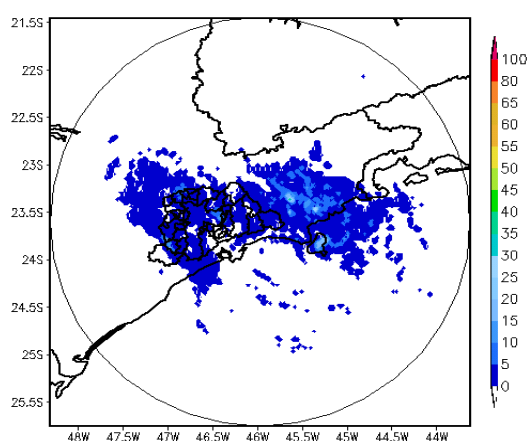
Figura 6: Número total mensal de campos de taxa de precipitação disponíveis para análise para o período de 2003 a 2007.

Foram obtidos 156.668 campos de taxa de precipitação num total de 777 dias, no período entre 2003 e 2007. Os sistemas foram diferenciados entre si, avaliando-se a direção e sentido de deslocamento e horários de início e dissipação dos mesmos. Conforme o ciclo anual de precipitação na região e estudos de Santos da Silva (2006) a maior quantidade de campos de taxa de precipitação disponíveis ocorreu nos meses de verão e, a menor, no inverno (Fig. 6).

Campos de taxa de precipitação para cada tipo de sistema precipitante são mostrados nas Figs. 7 a 11. A Fig. 7 mostra um exemplo de FF, ocorrida no dia 19 de outubro de 2005, às 02:22 e às 04:07 (hora local). Observa-se nesta figura uma área de precipitação estratiforme com orientação predominante de Noroeste para Sudeste e deslocamento de Sudoeste para Nordeste com células convectivas embebidas em seu

interior. A Fig. 8 mostra um evento de BD ocorrida no dia 24 de fevereiro de 2004, entre 21:17 e 23:07 (hora local). Este sistema apresenta deslocamento de Noroeste para Sudeste/Sul a leste do Estado de São Paulo e Sul de Minas Gerais e estava possivelmente associado a um episódio de ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul) em decorrência da persistência da área de precipitação estratiforme nos campos analisados até o dia 28 de fevereiro (campos não mostrados). A Fig. 9 mostra um evento de LI para o dia 18 de setembro de 2004 entre 17:57 e 18:57 (hora local) com células convectivas intensas e deslocamento de Noroeste para Sudeste. A Fig. 10 mostra um evento de CI para o dia 26 de março de 2004 entre 15:12 e 18:03 (hora local) com intensa atividade convectiva sobre o continente. Finalmente, a Fig. 11 mostra um evento de BM para o dia 4 de fevereiro de 2004 entre 17:00 e 22:30 (hora local) com formação e organização das células próximas a costa e deslocamento para Noroeste e interior do continente.

Precipitação (mm h^{-1}) 02:22 de 19/10/2005



Precipitação (mm h^{-1}) 04:07 de 19/10/2005

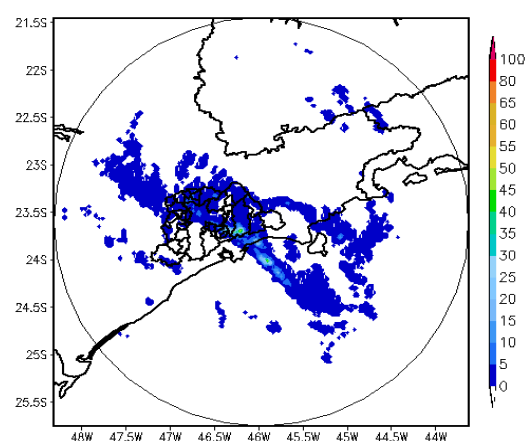


Figura 7: Campos da taxa de precipitação obtidos com o RSP entre 02:22 (esquerda) e 04:07 HL (direita) para evento de Frente Fria do dia 19 de outubro de 2005. Latitudes, longitudes e contornos geográficos estão indicados. As escalas de cores indicam a intensidade da precipitação em (mm h^{-1}).

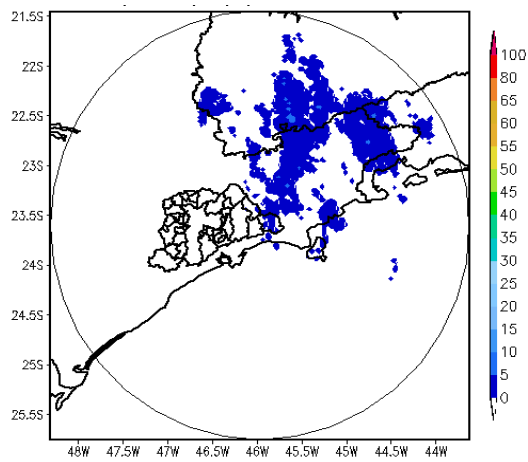
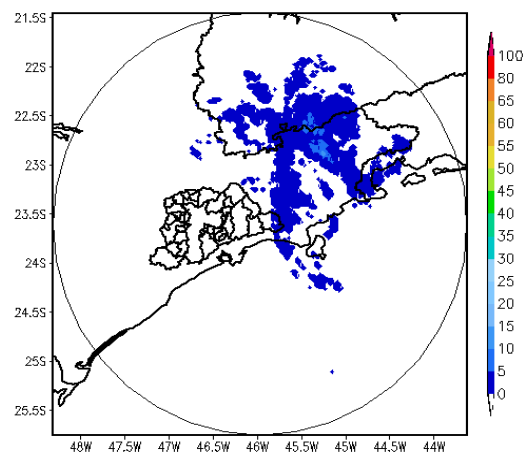
Precipitação (mm h⁻¹) 00:17 de 24/02/2004**Precipitação (mm h⁻¹) 23:07 de 24/02/2004**

Figura 8: Similar à Figura 7, exceto para Banda Dispersa.

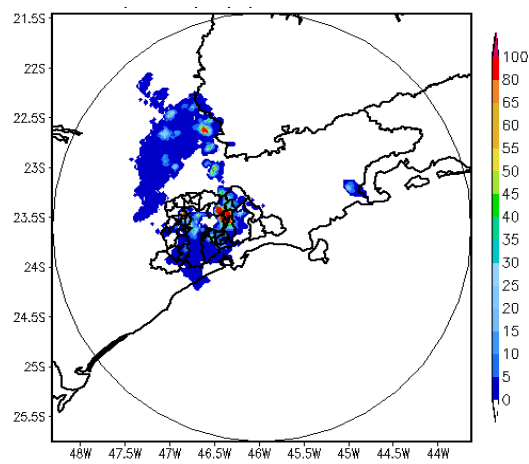
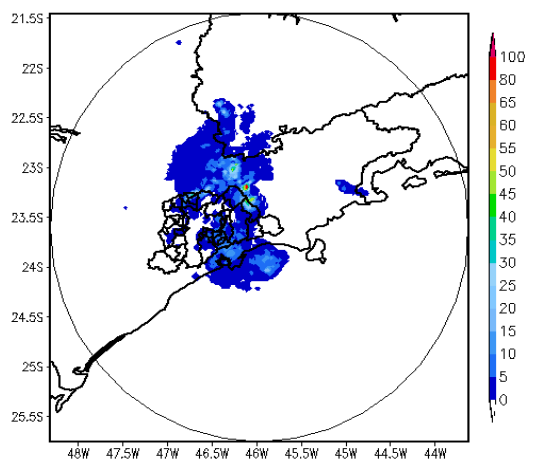
Precipitação (mm h⁻¹) 17:57 de 18/09/2004**Precipitação (mm h⁻¹) 18:57 de 18/09/2004**

Figura 9: Similar à Figura 7, exceto para Linha de Instabilidade.

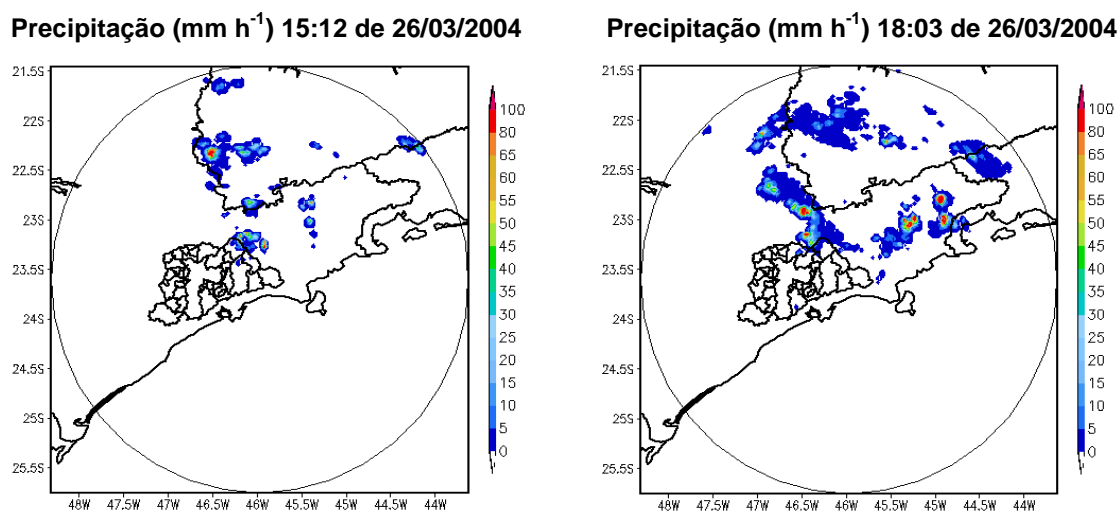


Figura 10: Similar à Figura 7, exceto para Convecção Isolada.

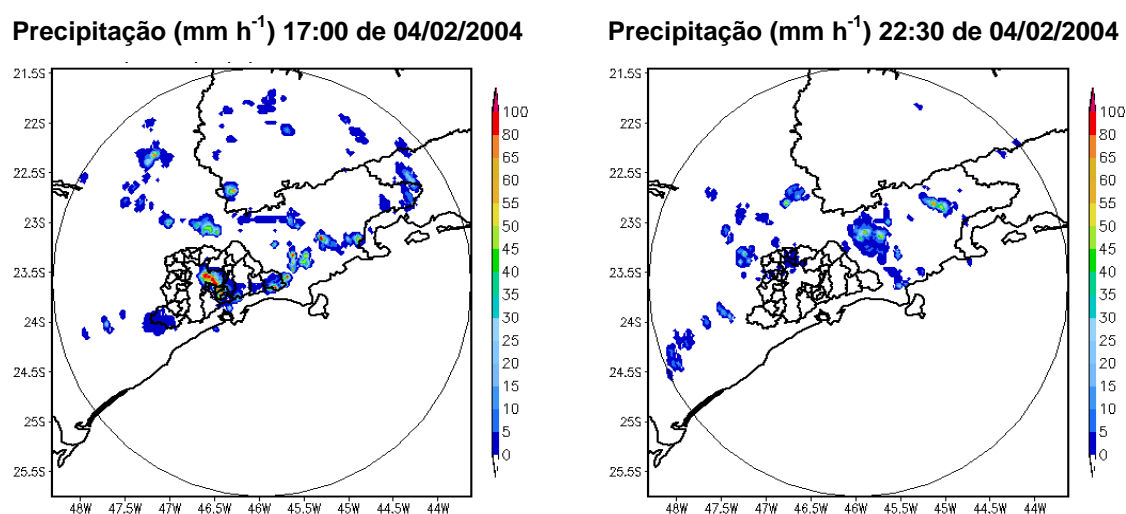


Figura 11: Similar à Figura 7, exceto para Brisa Marítima.

2.5 PREVISÃO DE CHUVA A CURTÍSSIMO PRAZO

O radar meteorológico é um equipamento de sensoriamento remoto ativo da atmosfera adequado para monitorar os sistemas precipitantes, devido à sua alta resolução espacial e temporal (Wilson et al., 1998). O radar é imprescindível para realizar previsão de chuva a curtíssimo prazo (0-3h) associada a sistemas

meteorológicos de mesoescala (Browning e Collier, 1989). A previsão desses sistemas é de fundamental importância no controle e alerta de cheias, principalmente em bacias urbanizadas. O pequeno tempo de concentração decorrente do seu alto grau de impermeabilização ocasiona episódios de chuvas intensas e enchentes.

A previsão de chuva a curtíssimo prazo é realizada a partir do vetor deslocamento do sistema, obtido pelo método SHARP (Short-term Automated Radar Prediction). Neste método, o campo de precipitação atual é advectado dentro da área de cobertura do radar desde sua origem para um determinado ponto de previsão de acordo com o vetor deslocamento. A previsão é realizada para até 3 horas de antecedência. Os melhores resultados ocorrem nos minutos iniciais de advecção no caso de sistemas convectivos, decorrência do seu curto tempo de vida, enquanto que sistemas estratiformes podem ser advectados por um período maior.

2.6 OBTENÇÃO DO VETOR DESLOCAMENTO DO SISTEMA PELO MÉTODO SHARP

O vetor deslocamento do sistema precipitante é obtido pelo método SHARP (Austin e Bellon, 1974), desenvolvido pelo grupo de meteorologia da MCGILL University e também utilizado no RSP. Este método consiste na extrapolação linear dos ecos do radar para até 3 horas de precipitação acumulada, supondo que o sistema precipitante, uma vez identificado na área de cobertura do radar, é deslocado no tempo com vetor deslocamento constante. Portanto, o sistema mantém a mesma estrutura ao longo do deslocamento, sem modificação das suas áreas e taxas de precipitação. Esta simples metodologia de previsão de chuva não retrata o estado real da atmosfera, uma vez que

as fases de crescimento e decaimento dos sistemas não são consideradas durante a extrapolação. Entretanto, a aplicação desta técnica resulta em melhores resultados de previsão quando comparada a outras que levam em consideração o surgimento de novas áreas de precipitação e movimento diferencial das mesmas (Tsonis e Austin, 1981). O erro na previsão não está associado à previsão de deslocamento dos sistemas precipitantes, mas sim atribuído ao desenvolvimento e dissipação dos mesmos. De acordo com os estudos de Austin e Bellon (1982), que utilizaram várias técnicas de previsão, o índice de acerto é desprezível para uma previsão além de 3 horas.

O algoritmo de previsão do radar RSP consiste de:

- 1) Cálculo do vetor deslocamento do sistema precipitante observado como um todo na área de cobertura do radar, determinado pelo coeficiente de correlação cruzada (ρ máximo) entre dois CAPPIs de altitude baixa separados por um intervalo de tempo de 30 minutos,
- 2) Previsão das taxas de precipitação a cada 5 minutos por até 3 horas, em pontos específicos dentro da área de cobertura do radar.

2.7 MODELO ADVECTIVO PARA PREVISÃO DE CHUVA

O modelo advectivo foi desenvolvido para produzir previsão de chuva acumulada a curtíssimo prazo, baseado no deslocamento médio dos sistemas Pereira Filho (1989) que utiliza correlações espaços-temporais dos dados de chuva. Esta técnica pode ser generalizada pela equação da continuidade 2D:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \frac{\partial \phi}{\partial x} + v \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

onde Φ é o campo escalar (aqui, taxa de precipitação em mm h^{-1}) e (u,v) é a componente horizontal do vento (m s^{-1}). A equação (5) é resolvida numericamente pelo Esquema Numérico de Terceira Ordem Corrente Acima (ENTOCA), derivado por Tremback et al.(1987) e implementado e verificado por Pereira Filho et al. (1999). Este método advectivo de simples aplicação apresenta êxito para previsão de enchentes e outras aplicações de recursos hídricos em pequenas e médias bacias. A aplicação do modelo advectivo é baseada na consideração de que os ecos de chuva são aproximadamente constantes enquanto são advectados pelo vetor deslocamento (Pereira Filho, 1989).

Após a identificação de um sistema precipitante na área de cobertura do RSP, a cada 30 minutos iniciou-se uma nova previsão de chuva com o modelo advectivo. A aplicação do modelo foi realizada enquanto o sistema encontrava-se na área de cobertura do radar. O intervalo de 30 minutos entre o início de cada previsão foi utilizado para minimizar a má representação da dinâmica dos sistemas ao longo do deslocamento, evitando-se que eventuais novos núcleos de precipitação que surgissem

na área do radar atingissem seu estágio maduro dentro do período de advecção. O vetor deslocamento obtido pelo RSP foi inserido no modelo advectivo e os sistemas advectados para os mesmos intervalos de tempo utilizados na acumulação, com o objetivo de comparar o campo de precipitação acumulado pelo radar e o campo obtido pelo modelo advectivo. Dessa forma, pôde-se verificar o desempenho das previsões para os diferentes tipos de sistemas precipitantes.

2.8 AVALIAÇÃO DA PREVISÃO DE CHUVA

A avaliação da previsão foi realizada por meio do Índice de Sucesso Crítico (CSI), que é uma ferramenta estatística freqüentemente utilizada para avaliar a previsão de variáveis meteorológicas como no caso da precipitação (Wilks, 1995). Assim, a precipitação acumulada pelo radar num determinado intervalo de tempo foi comparada com a precipitação acumulada prevista por meio de uma tabela de contingência para limites de acumulação pré-definidos. Finalmente, obteve-se o número de acertos, erros e razões de falsos alarmes. O desempenho das previsões foi também avaliado pela Probabilidade de Detecção (POD) e Razão de Falsos Alarmes (FAR). A Tabela 2 mostra o modo da contagem das previsões e das observações realizadas com o RSP. Os valores de P_o para este estudo foram de 0.2; 2.0; 4.0, 8.0 e 16.0 mm. A seguir, são apresentadas as fórmulas de obtenção dos índices CSI, POD e FAR, classificados de acordo com o tipo de evento e resoluções espaciais da previsão.

Tabela 2 Contagem das previsões de curtíssimo prazo com resolução de 2 km para um determinado limite de chuva horária (P_o) contra os respectivos valores observados com o RSP e fórmulas de obtenção dos índices CSI, POD e FAR.

Desempenho	Radar $P > P_o$	Radar $P < P_o$
Previsão Método $P > P_o$	acerto	falso_alarme
Previsão Método $P < P_o$	erro	acerto

$$CSI = \frac{acertos}{acertos + erros + falso_alarme} \quad (6)$$

$$POD = \frac{acertos}{acertos + erros} \quad (7)$$

$$FAR = \frac{falso_alarme}{falso_alarme + erros} \quad (8)$$

A perda da acurácia das previsões no decorrer do tempo para cada tipo de sistema foi avaliada pelo coeficiente de correlação linear. Os erros das previsões em relação às observações com o RSP, para até 3h de precipitação acumulada, foram analisados por meio do Erro Quadrático Médio (EQM), que pode ser escrito conforme Takacs (1985).

$$EQM = EQM_a + EQM_f \quad (9)$$

onde

EQM_a = erro de amplitude entre o valor previsto e observado;

EQM_f = erro de fase entre o valor previsto e observado.

Na forma matemática,

$$EQM_a = [\sigma(P_o) - \sigma(P_p)]^2 + (\langle P_o \rangle - \langle P_p \rangle)^2 \quad (10)$$

$$EQM_f = 2(1 - \rho)\sigma(P_o)\sigma(P_p) \quad (11)$$

onde,

P_o (p) = precipitação observada (prevista);

σ = operador desvio padrão;

$\langle \rangle$ = operador médio;

ρ = correlação entre P_o e P_e

2.9 ESQUEMA NUMÉRICO DE TERCEIRA ORDEM CORRENTE ACIMA (ENTOCA)

Os esquemas numéricos corrente acima têm aplicação em problemas de mecânica dos fluídos. Fisicamente, a curva característica que passa por um determinado instante de tempo e ponto no espaço dentro do domínio de integração é determinada por informações corrente acima do ponto. Logo, é conhecida. Os esquemas de primeira ordem amortecem o sinal, porém os esquemas de maior ordem amortecem as ondas seletivamente. Neste estudo, é apresentado o esquema de terceira ordem derivado por Tremback et al. (1987), que foi obtido por meio de interpolação polinomial lagrangeana. O polinômio é utilizado com o objetivo de prever o campo de uma dada variável (neste caso a taxa de precipitação) nos intervalos de

tempo futuros por meio de interpolação. O ENTOCA é dado por Pereira Filho (2002), e é apresentado abaixo:

$$\begin{aligned} \phi_j^{n+1} = \phi_j^n + \frac{\sigma}{6} &(-\phi_{j-2}^n + 6\phi_{j-1}^n - 3\phi_j^n - 2\phi_{j+1}^n) \\ &+ \frac{\sigma^2}{2}(\phi_{j-1}^n - 2\phi_j^n + \phi_{j+1}^n) \\ &+ \frac{\sigma^3}{2}(\phi_{j-2}^n - 3\phi_{j-1}^n + 3\phi_j^n - \phi_{j+1}^n) \end{aligned} \quad (12)$$

onde

ϕ = campo escalar a ser advectado;

n = nível de tempo;

j = ponto de grade;

$\alpha = U\Delta t/\Delta x$, número de Courant;

U = velocidade do vento, constante e positivo;

Δt = incremento de tempo;

Δx = resolução da grade.

A equação (12) pode ser escrita de forma mais compacta:

$$\phi_j^{n+1} = \phi_j^n + \sum_{i=1}^3 \sigma_i (\vec{C}_i \cdot \vec{P}_i) \quad (13)$$

onde,

$$\sigma_1 = \frac{\sigma}{6} \quad : \quad \sigma_2 = \frac{\sigma^2}{6} \quad : \quad \sigma_3 = \frac{\sigma^3}{6} \quad (14)$$

$$\vec{C}_1 = (-1, 6, -3, -2) : \vec{C}_2 = (0, 1, -2, 1) : \vec{C}_3 = (1, -3, 3, -1) \quad (15)$$

$$\vec{P}_j = (\phi^n_{j-2}, \phi^n_{j-1}, \phi^n_{j+1}) \quad (16)$$

Quando o vento é negativo, as entidades vetoriais são as que seguem

$$\vec{C}_1 = (1, -6, 3, 2) : \vec{C}_3 = (-1, 3, -3, 1) : \vec{P}_j = (\phi^n_{j+2}, \phi^n_{j+1}, \phi^n_j, \phi^n_{j-1}) \quad (17)$$

Esta mudança produz uma imagem espelho da equação (12). Nota-se que o vetor \vec{C}_2 não muda. A análise de estabilidade de Von Neumann indica que: a) o esquema é dominado por erros de fase (derivadas de ordem ímpar na equação modificada do erro de truncamento); b) o critério de estabilidade é $\alpha \leq 1$.

Os fatores de amplificação de ondas curtas até $8 \Delta x$ são apresentados na Fig. 12. Como já fora dito, o esquema numérico ENTOCA apresenta propriedades de amortecimento seletivo de ondas. Por exemplo, o número de Courant de 0,5 remove completamente ondas com comprimento $2 \Delta x$. O intervalo de valores do número com maior amortecimento de ondas curtas está entre 0,3 e 0,7.

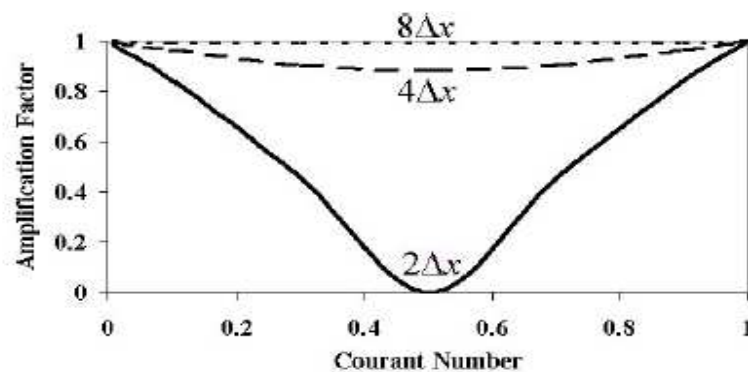


Figura 12: Esquema de amplificação de ondas curtas do ENTOCA. Fonte: Pereira Filho (2002).

A assimetria do ENTOCA requer a determinação da direção corrente acima, o que requer mais processamento do que os esquemas de ordem par (Tremback, et al., 1987). A integração bidimensional é realizada nas seguintes etapas:

(a)

$$\phi_{j,k}^* = \phi_{j,k}^n + \sum_{i=1}^3 \sigma_i(u)(\vec{C}_i \cdot \vec{P}_j)_k \quad (18)$$

(b)

$$\phi_{j,k}^{n+1} = \phi_{j,k}^* + \sum_{i=1}^3 \sigma_i(v)(\vec{C}_i \cdot \vec{P}_k)_j \quad (19)$$

Este método de integração não altera o critério de estabilidade (Tremback et al., 1987). Ainda, há derivadas cruzadas na expansão de Taylor que são consideradas. Porém, se o vento é variável, pode haver uma fraca instabilidade do ENTOCA por causa de derivadas espúrias (Smolarkiewicz, 1982).

2.10 FONTES DE ERROS NAS PREVISÕES POR EXTRAPOLAÇÃO DOS ECOS DE RADAR

A acurácia do modelo advectivo é limitada a fontes de erros, que de acordo com Browning et al. (1982) são divididos em quatro categorias:

- estimativa da distribuição espacial da precipitação real na superfície. Este erro reporta os apresentados na seção 2.2.1;
- estimativa da velocidade real dos padrões da precipitação;
- não-linearidade das variações na intensidade dos padrões da precipitação;
- não-linearidade das variações temporais na velocidade dos padrões da precipitação.

Logo, a fonte principal de erro nas previsões com modelo advectivo é o campo inicial de chuva, sendo este responsável por 50 % da inacurácia das previsões (Collier, 1981).

2.11 METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA PREVISÃO DE CHUVA

As tabelas 3, 4, 5, 6, e 7 apresentam os eventos selecionados para cada tipo de sistema precipitante na área de cobertura do RSP, incluindo data de ocorrência, início e fim dos mesmos. Para estes eventos, foi realizada a acumulação dos dados de radar e a aplicação do modelo advectivo para realizar previsão de chuva para até 3 horas de precipitação acumulada, com início a cada 30 minutos, enquanto os eventos encontravam-se na área do radar.

Tabela 3 Eventos de Frente Fria utilizados para avaliar a previsão de chuva com o modelo advectivo.

Eventos de FF	Início (UTC)	Final (UTC)
06/04/2004	10:00	15:05 (07/04/2004)
09/08/2005	08:39	11:59 (10/08/2005)
18/09/2005	04:17	13:52 (19/09/2005)
26/04/2007	15:35	22:41 (27/04/2007)
09/07/2006	21:11	21:46 (09/07/2006)
22/02/2005	22:14	23:50 (23/02/2005)
06/02/2006	15:38	07:58 (07/02/2006)
08/04/2007	12:27	06:57 (09/04/2007)
26/04/2007	15:35	22:41 (26/04/2007)
18/06/2005	15:14	06:11 (19/06/2005)

Tabela 4 Similar a tabela 2.3, exceto para eventos de Banda Dispersa.

Eventos de BD	Início (UTC)	Final (UTC)
02/02/2005	08:39	11:37 (04/02/2005)
03/03/2005	07:19	12:20 (05/03/2005)
21/12/2005	16:08	04:29 (22/12/2005)
24/02/2004	13:57	23:49 (26/02/2004)
20/12/2006	12:52	03:03 (21/12/2006)
06/02/2007	15:38	07:38 (07/02/2007)
20/04/2005	19:19	21:06 (24/04/2005)
10/12/2004	14:32	06:34 (12/12/2004)
24/12/2004	14:40	12:30 (27/12/2004)
14/01/2004	10:31	23:48 (16/01/2004)

Tabela 5 Similar a tabela 2.3, exceto para eventos de Brisa Marítima.

Eventos de BM	Início (UTC)	Final (UTC)
08/03/2007	17:04	04:29 (09/03/2007)
18/01/2006	16:21	01:21 (19/01/2006)
01/04/2005	18:20	22:40 (01/04/2005)
07/02/2003	14:39	22:39 (07/02/2003)
19/02/2007	14:31	00:56 (20/02/2007)
12/04/2004	18:06	01:51 (13/04/2004)
08/04/2005	18:07	06:43 (09/04/2005)
02/02/2006	17:54	02:19 (03/02/2006)
26/02/2007	18:56	07:46 (27/02/2007)
02/01/2005	14:37	02:17 (03/01/2005)

Tabela 6 Similar a tabela 2.3, exceto para eventos de Convecção Isolada.

Eventos de CI	Início (UTC)	Final (UTC)
01/01/2003	13:36	16:39
06/04/2005	15:30	18:30
12/03/2005	14:59	22:04
23/04/2007	16:49	22:49
09/02/2003	16:18	22:58
23/04/2005	13:05	23:50
20/03/2003	15:39	03:30 (21/03/2003)
12/01/2004	13:16	04:31 (13/01/2004)
04/12/2004	13:34	06:24 (05/12/2004)
24/12/2004	15:10	01:00 (25/12/2005)

Tabela 7 Similar a tabela 2.3, exceto para eventos de Linha de Instabilidade.

Eventos de LI	Início (UTC)	Final (UTC)
16/02/2004	12:35	23:00
26/03/2004	16:17	10:13 (27/03/2004)
07/10/2005	16:19	07:04 (08/10/2005)
17/02/2005	19:01	01:01 (18/02/2005)
20/04/2005	19:29	05:32 (22/04/2005)
25/06/2006	19:31	05:26 (26/06/2006)
05/10/2006	12:34	10:14 (06/10/2006)
26/12/2006	16:28	08:03 (27/12/2006)
18/09/2004	15:37	08:32 (19/09/2004)
11/03/2004	08:04	05:56 (13/03/2004)

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS PRECIPITANTES NO LESTE DE SÃO PAULO

A classificação dos sistemas precipitantes na área de cobertura do RSP foi realizada por meio da inspeção visual dos campos de taxa de precipitação. Os sistemas precipitantes foram classificados inicialmente quanto à organização dos ecos de chuva, distribuição horizontal, deslocamento e duração (ciclo de vida) possibilitando dessa forma, a identificação dos seguintes sistemas meteorológicos: Frentes Frias (FF), Bandas Dispersas de precipitação (BD), Linhas de Instabilidade (LI), Convecção Isolada (CI) e Brisa Marítima (BM). Posteriormente, os sistemas foram classificados em convectivos e estratiformes, sendo o critério utilizado, baseado na intensidade da taxa de precipitação, conforme Santos da Silva (2006) onde sistemas com taxa de precipitação inferior a 20 (mm h^{-1}) foram classificados como estratiformes, e sistemas com taxa de precipitação superior a 20 (mm h^{-1}) como convectivos.

As Frentes Frias (FF) apresentam deslocamento de Sudoeste para Leste/Nordeste e largura da faixa de precipitação com orientação de Noroeste para Sudeste, convectiva ou estratiforme. Estes sistemas apresentaram variação na área de cobertura do radar de poucas horas a até mais de 4 dias (frentes estacionárias). O deslocamento médio das FF foi entre 18-20 Horas. As FF atuam em todos os meses do ano, sendo mais convectivas no verão do que no inverno, quando se deslocam rapidamente na área de cobertura do radar com uma maior extensão de chuva estratiforme. No verão, em alguns casos, elas se tornam estacionárias e o aporte de

umidade vindo da Região Amazônica, faz com que as FF evoluam para ZCAS e, assim, produzam bandas de precipitação intensas e de longa duração. As Bandas Dispersas (BD) geralmente estão associadas a sistemas de grande escala como frentes estacionárias e ZCAS, sendo as BD convectivas de maior duração associadas a estas. As BD se deslocam, em geral, de Noroeste para Sudeste, sem organização espacial, apresentando extensa área de chuva estratiforme e convecção embebida nesta. De acordo com os dados do radar o ciclo de vida deste sistema pode chegar a mais de 5 dias.

As Linhas de Instabilidade (LI) surgem geralmente da fusão de ecos convectivos isolados e podem estar ou não associadas a sistemas de grande escala, como sistemas frontais, podendo estar à dianteira ou a retaguarda destes. Apresentam células convectivas intensas em sua dianteira com área de precipitação estratiforme na sua retaguarda. O horário predominante das LI foi entre 14:00 e 18:00 (hora local) com ciclo de vida entre 4 e 15 horas e deslocamento entre 10 e 12 (m s^{-1}). A direção preferencial de deslocamento das LI foi de Noroeste para Sudeste, perpendicular ou paralelamente ao movimento de sistemas frontais, apesar de haver alguns casos em que o deslocamento das LI ocorreu em outras direções e de forma isolada.

A Convecção Isolada (CI) se forma geralmente à tarde entre 13:30 e 18:30 (hora local) devido ao ciclo de aquecimento diurno e pode ou não estar associada a algum sistema de grande escala. Surge e se dissipa próximo ao local de formação, em sua grande maioria no interior do continente. São células convectivas ordinárias que apresentam deslocamento muito lento, de oeste para leste na maioria das vezes.

Podem dar origem na fase de decaimento a áreas mais extensas de precipitação estratiforme.

A Brisa Marítima (BM) em geral se desenvolve entre 14:30 e 19:00 (hora local) e a presença da Serra do Mar favorece a formação de linhas de células convectivas ao longo da costa. Essas células apresentam deslocamento de oeste para leste na forma de sistemas convectivos isolados semelhantes a CI. Quando a BM alcança a RMSP, geralmente produz precipitação convectiva intensa e, em alguns casos, pode originar áreas de precipitação estratiforme, com pequeno tempo de vida.

As características morfológicas e a evolução temporal de cada tipo de sistema precipitante aqui apresentado dependem da topografia, circulação local associada e processos de mistura. A dimensão horizontal dos sistemas se mostrou bastante variável, sendo os núcleos convectivos associados à convecção isolada e a brisa marítima os menores, seguidos por linhas de instabilidade, frentes frias e bandas dispersas, respectivamente.

A Fig. 13 apresenta duas situações típicas de convecção, ambas sobre o continente. A Figura 13a mostra um dia de convecção isolada, sem organização aparente dos ecos de precipitação. Na Fig. 13b, observam-se células convectivas alinhadas junto à costa, associada à frente de brisa marítima.

Na área de cobertura do radar meteorológico de São Paulo, foi observada a presença de mais de um sistema precipitante num mesmo dia, conforme mostrado na Fig. 14, associada a duas linhas de instabilidade. A primeira, de orientação noroeste-sul (Fig. 14a) e a segunda, à retaguarda de um sistema frontal com deslocamento para leste (Fig. 14b).

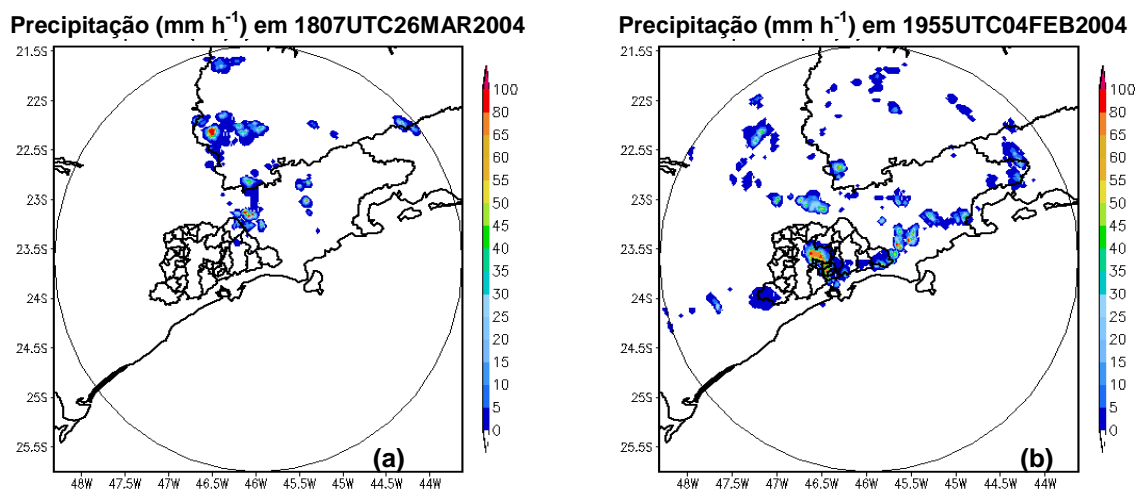


Figura 13: Campos de taxa de precipitação obtidos com o radar meteorológico de São Paulo. (a) convecção isolada e (b) convecção devido à brisa marítima. Horários (UTC), datas, latitudes, longitudes e contornos geográficos incluindo RMSP estão indicados. Escalas de cores indicam a intensidade da precipitação (mm h^{-1}).

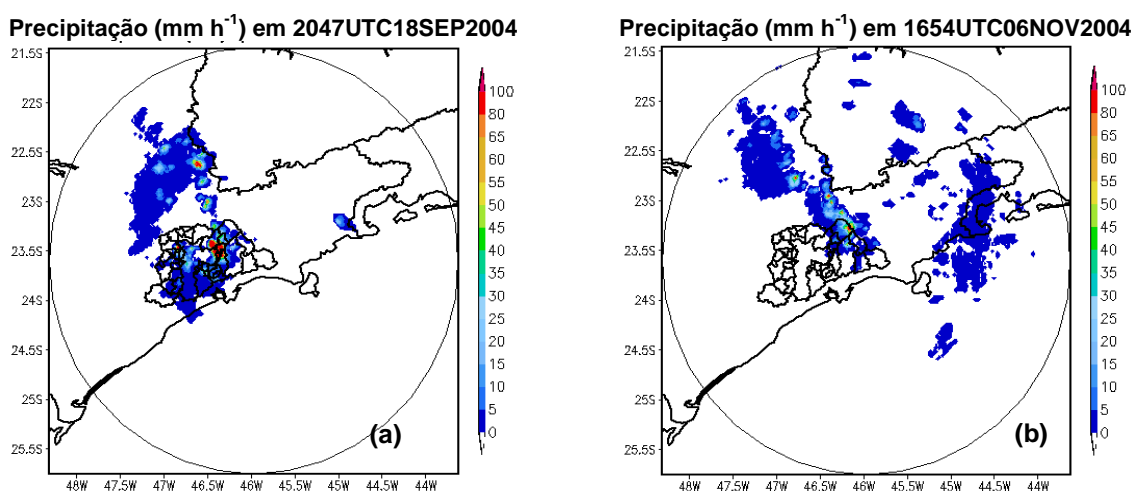


Figura 14: Análogo à Figura 13, exceto para (a) linha de instabilidade isolada e, (b) linha de instabilidade na retaguarda de um sistema frontal.

As Figs. 15a e 15b mostram bandas dispersas em períodos mais estratiformes e convectivos, respectivamente. As análises mostraram que, em geral, as BDs estão associadas a períodos de maior longevidade da precipitação e a episódios de ZCAS.

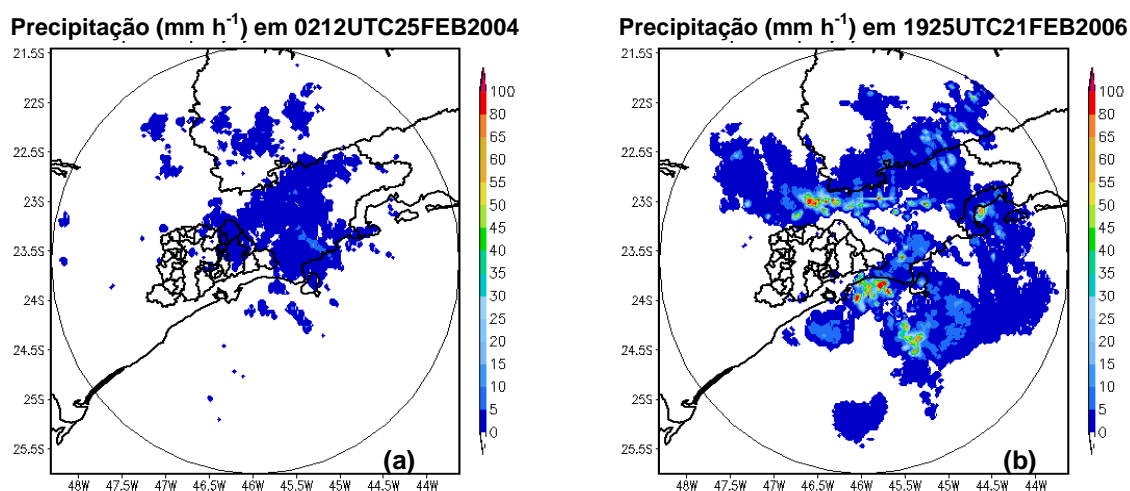


Figura 15: Análogo à Figura 13, exceto para (a) banda dispersa estratiforme e, (b) banda dispersa com células convectivas embebidas.

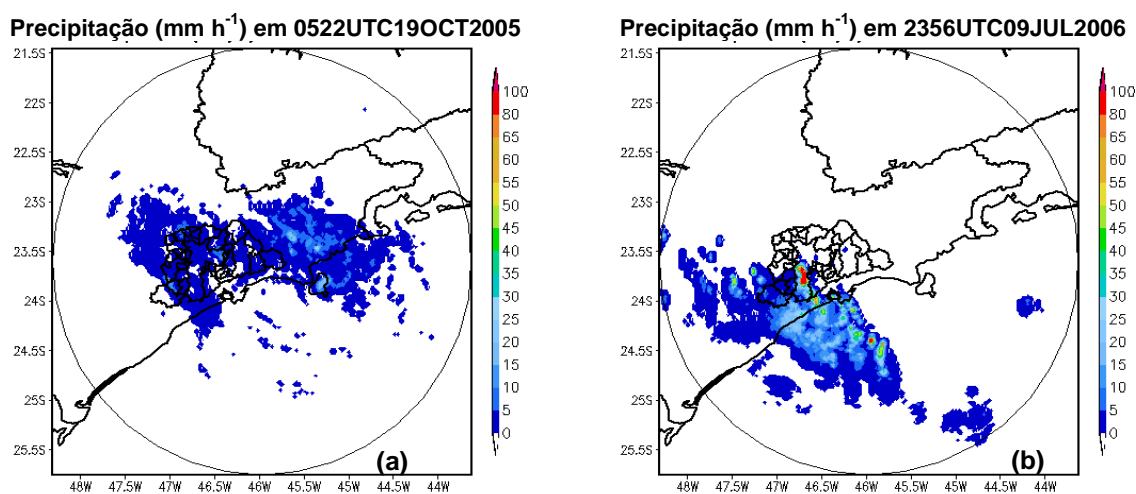


Figura 16: Análogo à Figura 13, exceto para duas frentes frias (a) com precipitação estratiforme, e (b) convectiva.

As frentes frias são muito variáveis morfologicamente ao longo do ano. Em geral, FFs mais estratiformes são encontradas no inverno e mais convectivas no verão e demais estações do ano, conforme mostrado na Fig. 16a b.

A Fig. 17 apresenta as frequências mensais dos eventos estratiformes e convectivos, ao longo do período analisado. A frequência de eventos estratiformes foi

máxima nos meses de Maio e Agosto, superior a 90% enquanto que para eventos convectivos foi máxima nos meses de Fevereiro e Março, em torno de 70%. O aumento de eventos estratiformes observado no mês de Novembro contraria a tendência de queda quase linear da curva e pode ser explicado em vista de um maior número de episódios de ZCAS no ano de 2004. A Fig. 18 apresenta as freqüências mensais para os cinco diferentes tipos de sistemas precipitantes atuantes na área de cobertura do radar RSP. As frentes frias ocorrem durante todas as estações do ano, embora sejam mais dominantes de maio a outubro. As bandas dispersas atuam por todo o ano, com maior ocorrência nos meses de verão devido ao posicionamento da ZCAS e no mês de outubro associadas a frentes frias. A convecção isolada ocorre com maior freqüência entre os meses de novembro e abril. A brisa marítima também apresenta maior ocorrência neste período, com pico máximo no mês de fevereiro. As linhas de instabilidade, da mesma forma que as frentes frias e bandas dispersas, ocorrem durante todo o ano, entretanto, com maior ocorrência entre os meses de setembro e novembro.

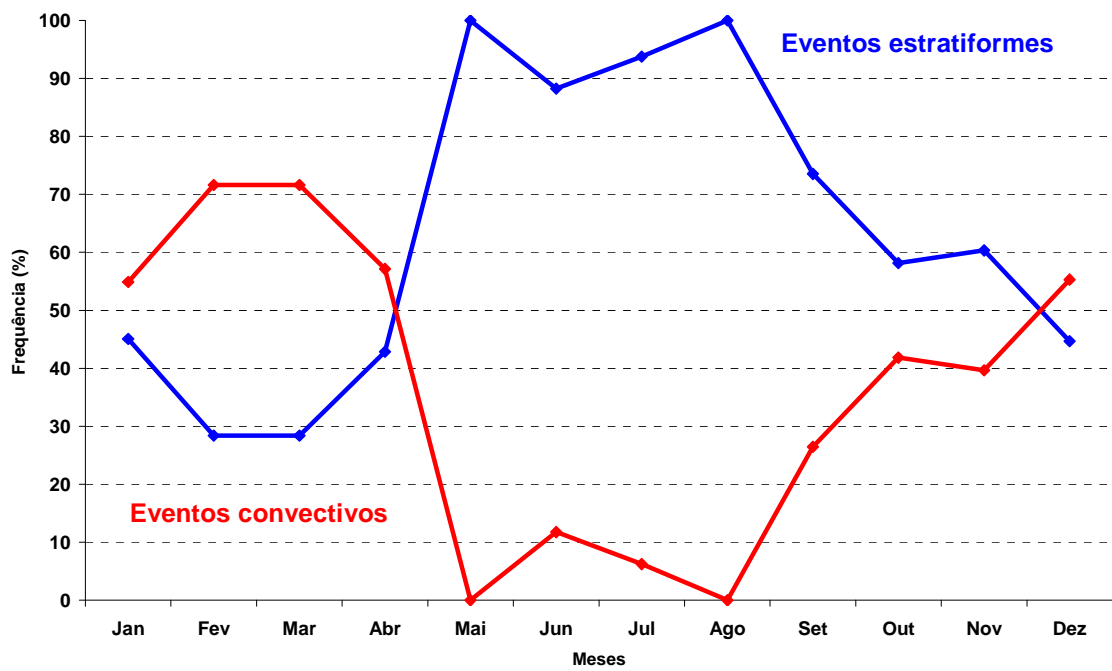


Figura 17: Freqüências mensais de eventos estratiformes e convectivos para o período de 2003 a 2007.

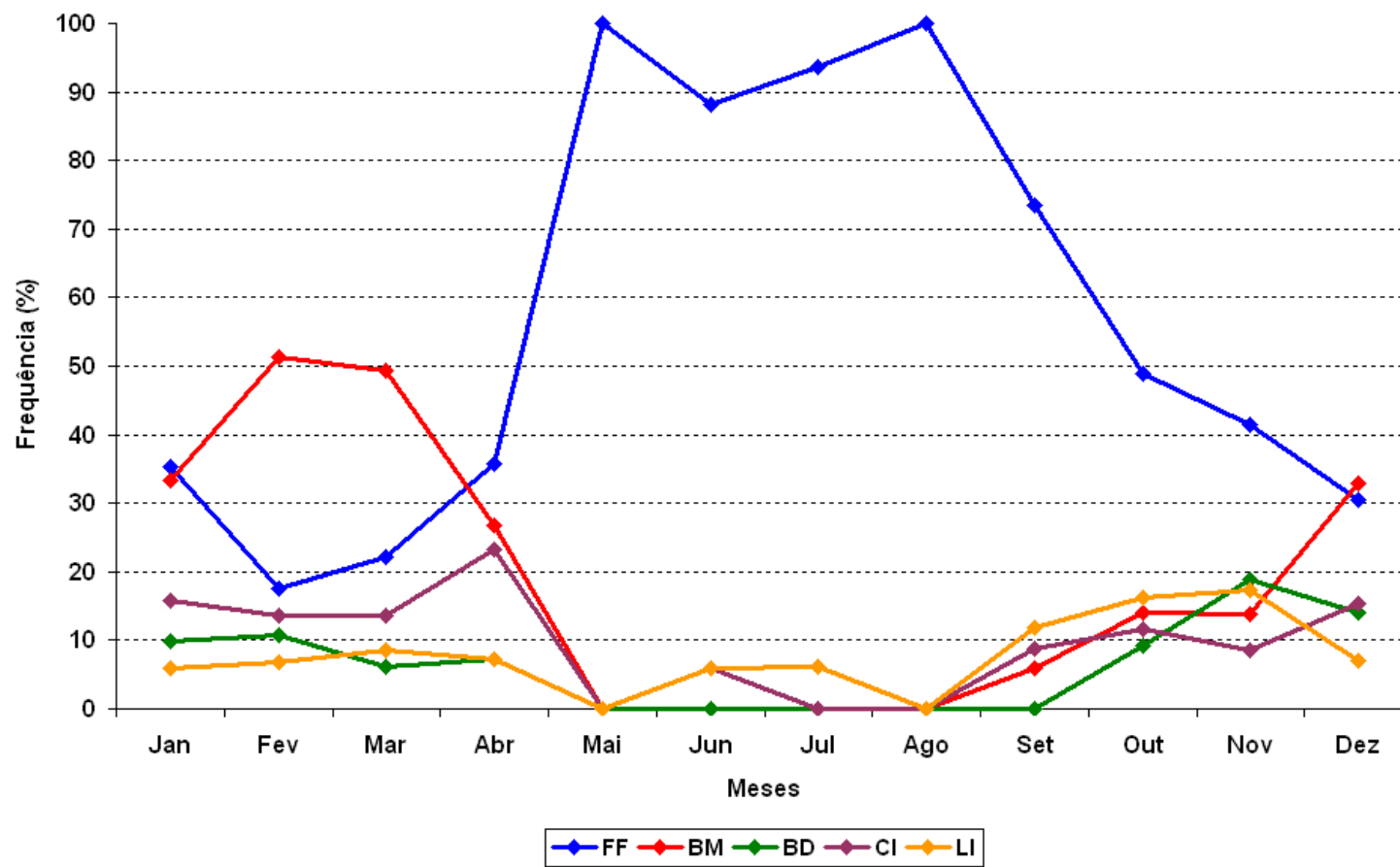


Figura 18: Freqüências mensais dos diferentes sistemas precipitantes para o período de 2003 a 2007.

3.2 COMPARAÇÕES ENTRE CAMPOS ACUMULADOS E PREVISTOS

Após a etapa de classificação dos eventos de chuva nos cinco tipos de sistemas precipitantes, procedeu-se a acumulação da precipitação para até 3h (180 minutos) dos eventos selecionados. A acumulação da precipitação foi obtida pela integração das taxas de precipitação estimadas com o radar ao longo do tempo. As taxas de precipitação também foram inseridas no modelo e advectadas para o mesmo limite de chuva acumulada.

Os campos de precipitação mostrados a seguir (Fig. 19 a 23) são resultados da precipitação acumulada pelo RSP para 3 h (180 minutos) e da precipitação acumulada prevista pelo modelo advectivo para o mesmo intervalo de tempo. Os horários mostrados correspondem às simulações de 30, 60, 90, 120 e 180 minutos. As figuras correspondentes ao horário de 150 minutos foram omitidas por serem semelhantes aos campos correspondentes às de 180 minutos. A análise dos campos acumulados pelo radar e previsto pelo modelo nos cinco tipos de sistemas precipitantes identificados mostra que, em geral, há uma subestimativa dos resultados do modelo advectivo em relação às observações com o radar. Isto é atribuído à limitação do modelo de previsão ao não representar a dinâmica dos sistemas durante a extrapolação dos ecos de radar.

BANDA DISPERSA

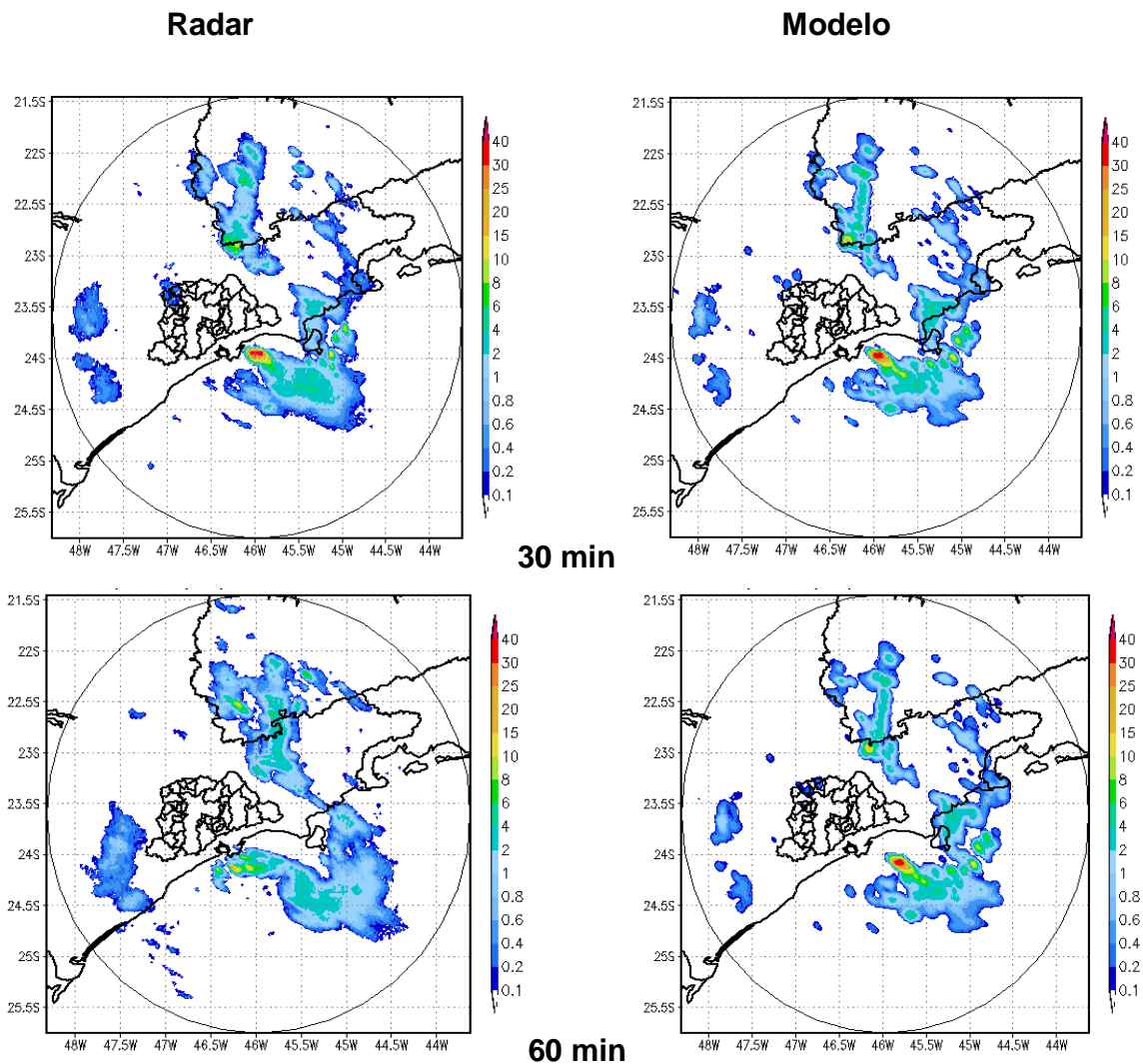


Figura 19: Campos de precipitação acumulados pelo radar para 30, 60, 90, 120 e 180 minutos (esquerda) e previstos pelo modelo advectivo (direita), para evento de banda dispersa do dia 21 de abril de 2005 as 07:47(UTC). Latitudes, longitudes e contornos geográficos incluindo RMSP estão indicados. As escalas de cores indicam a precipitação acumulada em (mm).

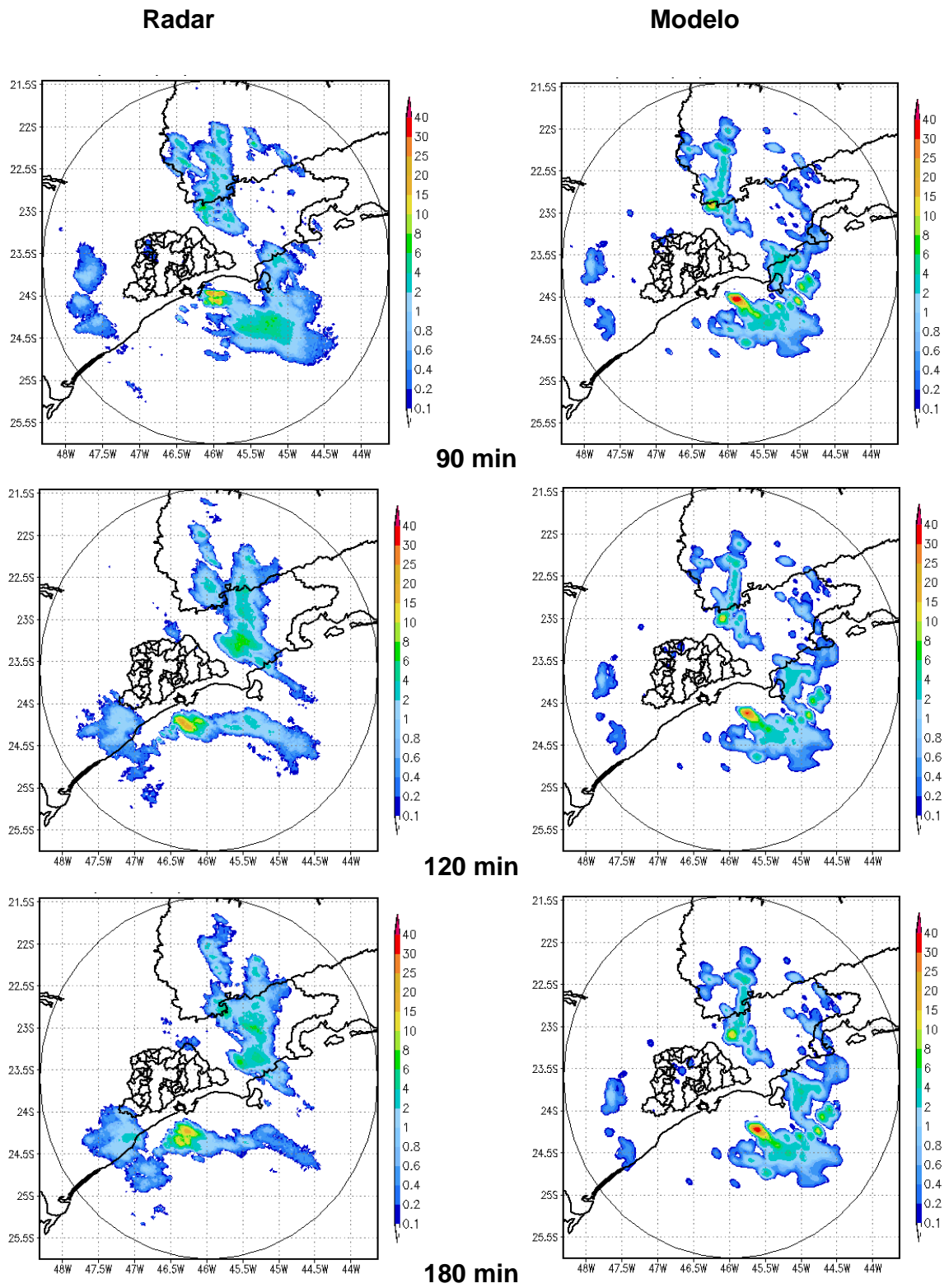


Figura 19: Continuação.

BRISA MARÍTIMA

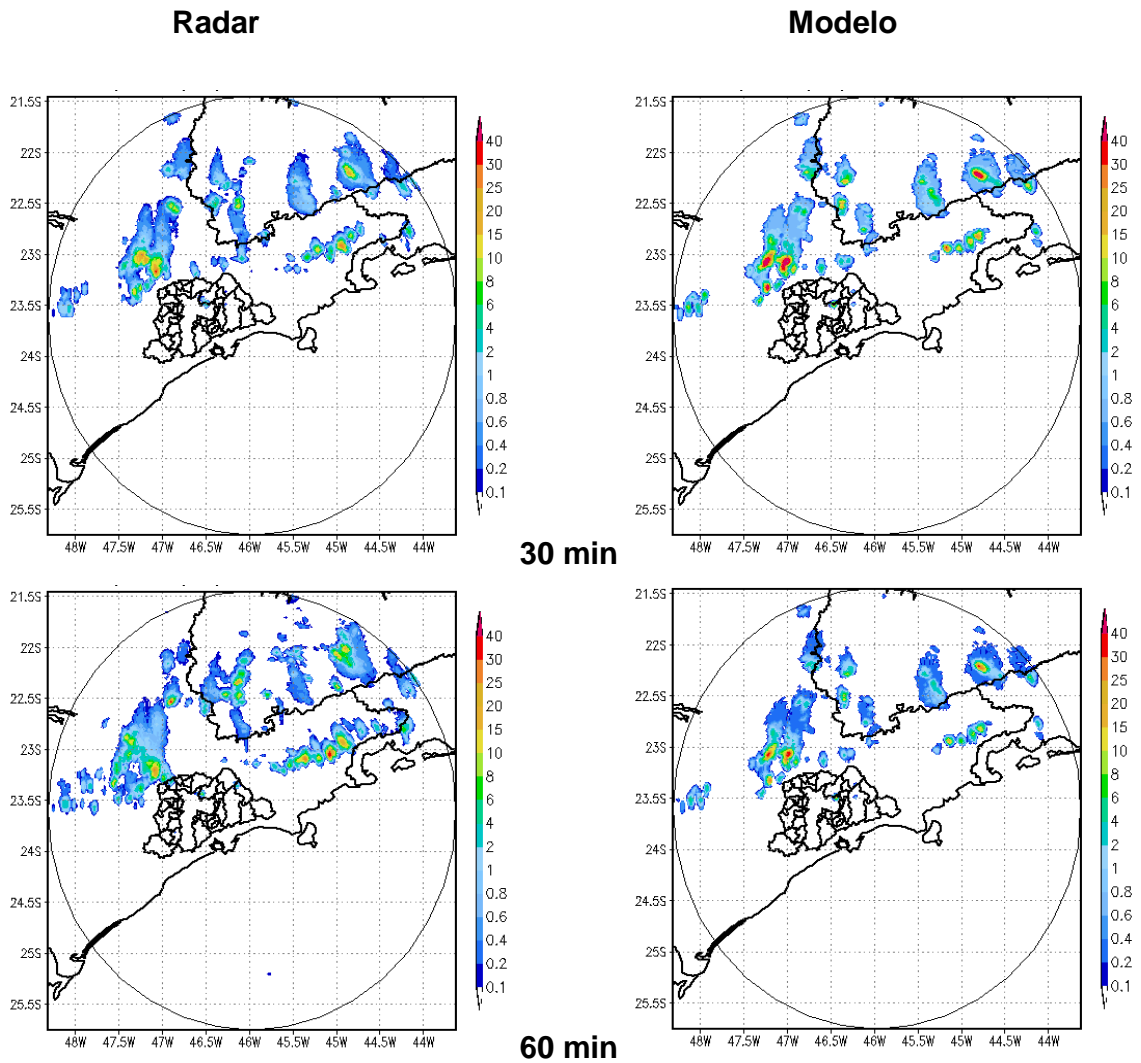


Figura 20: Similar à Figura 19, exceto para evento de Brisa Marítima do dia 02 de janeiro de 2005 às 17:32 (UTC).

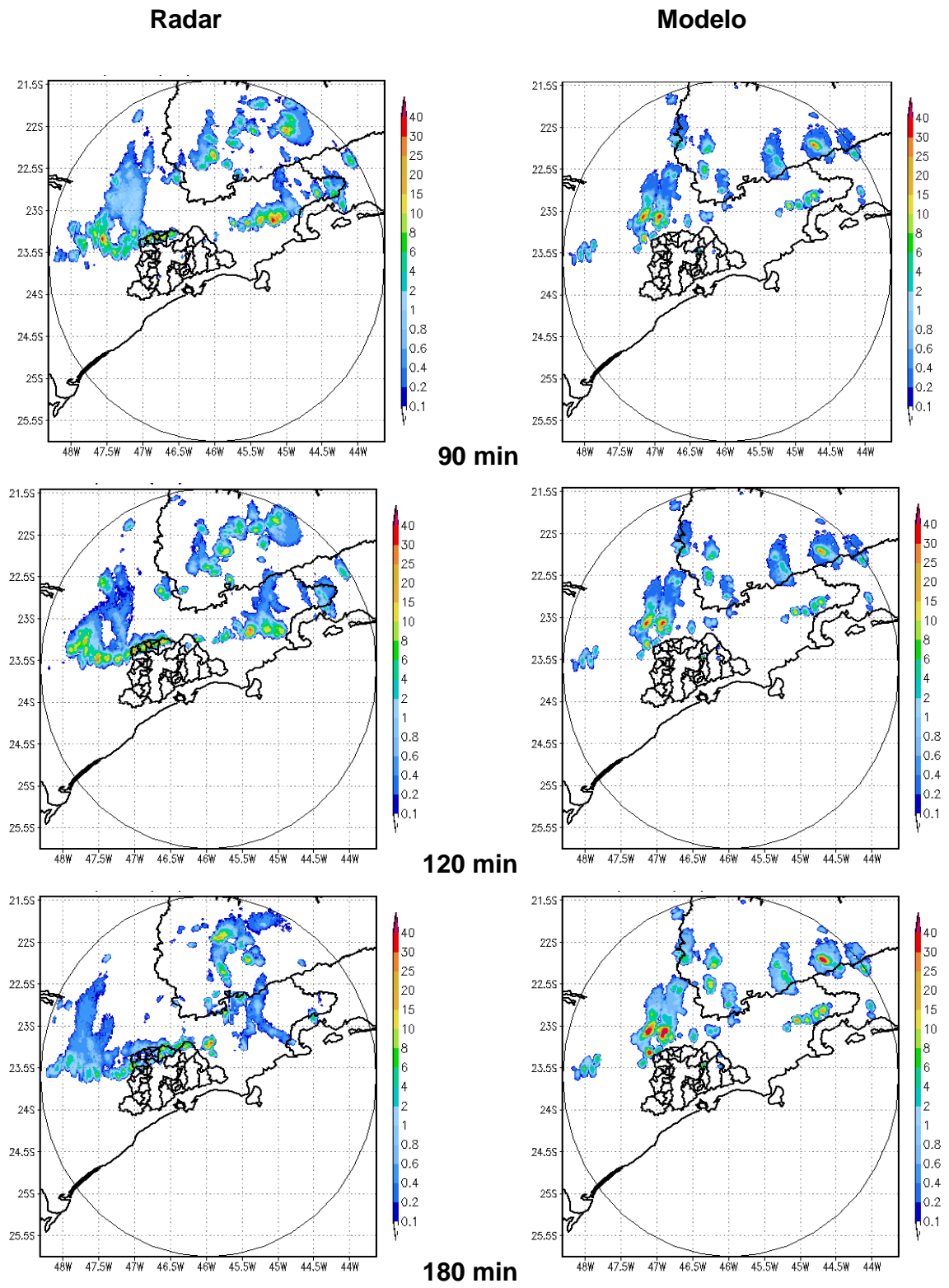


Figura 20: Continuação.

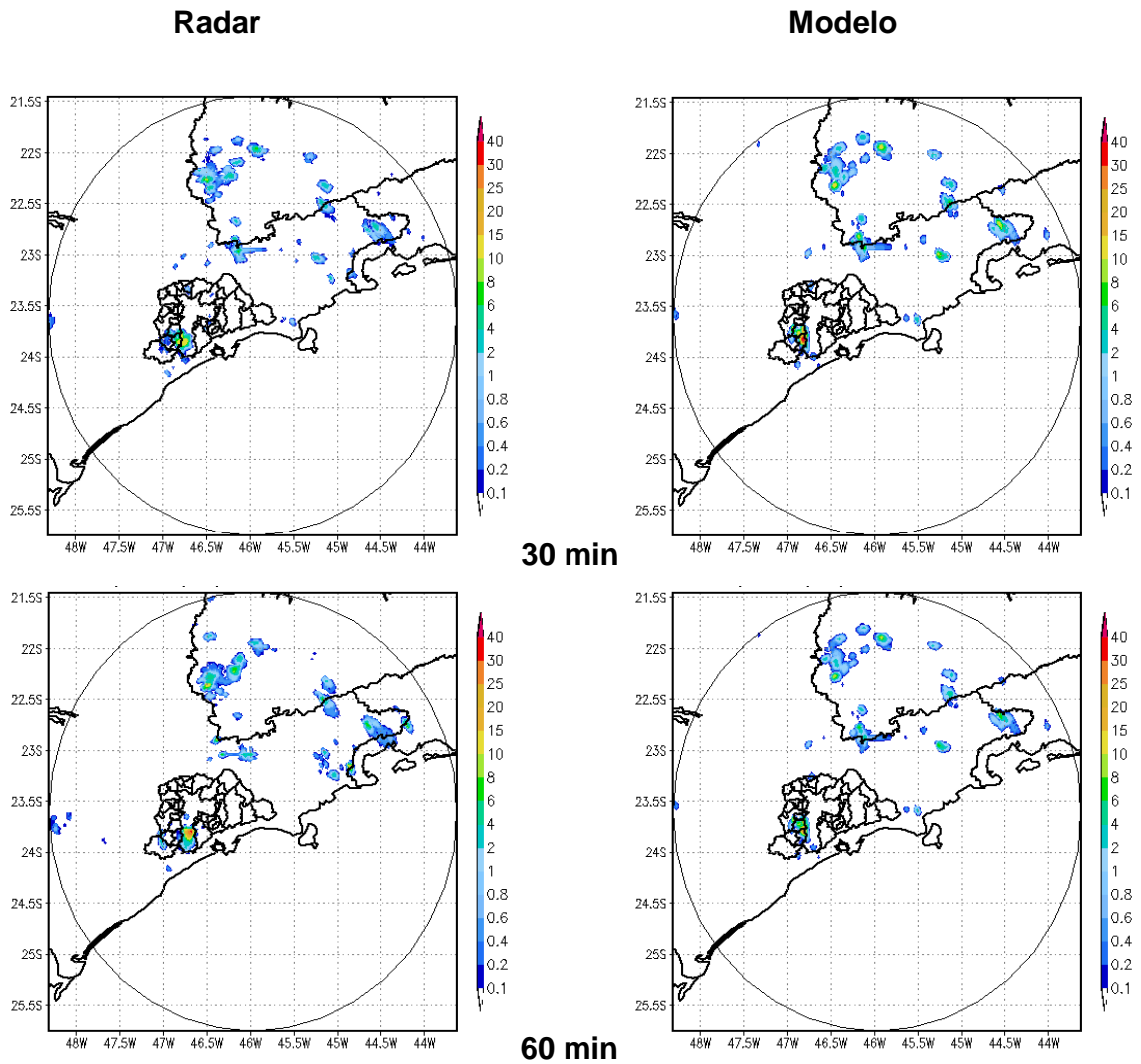
CONVECÇÃO ISOLADA

Figura 21: Similar à Figura 19, exceto para evento de Convecção Isolada do dia 18 de abril de 2004 às 17:12 (UTC).

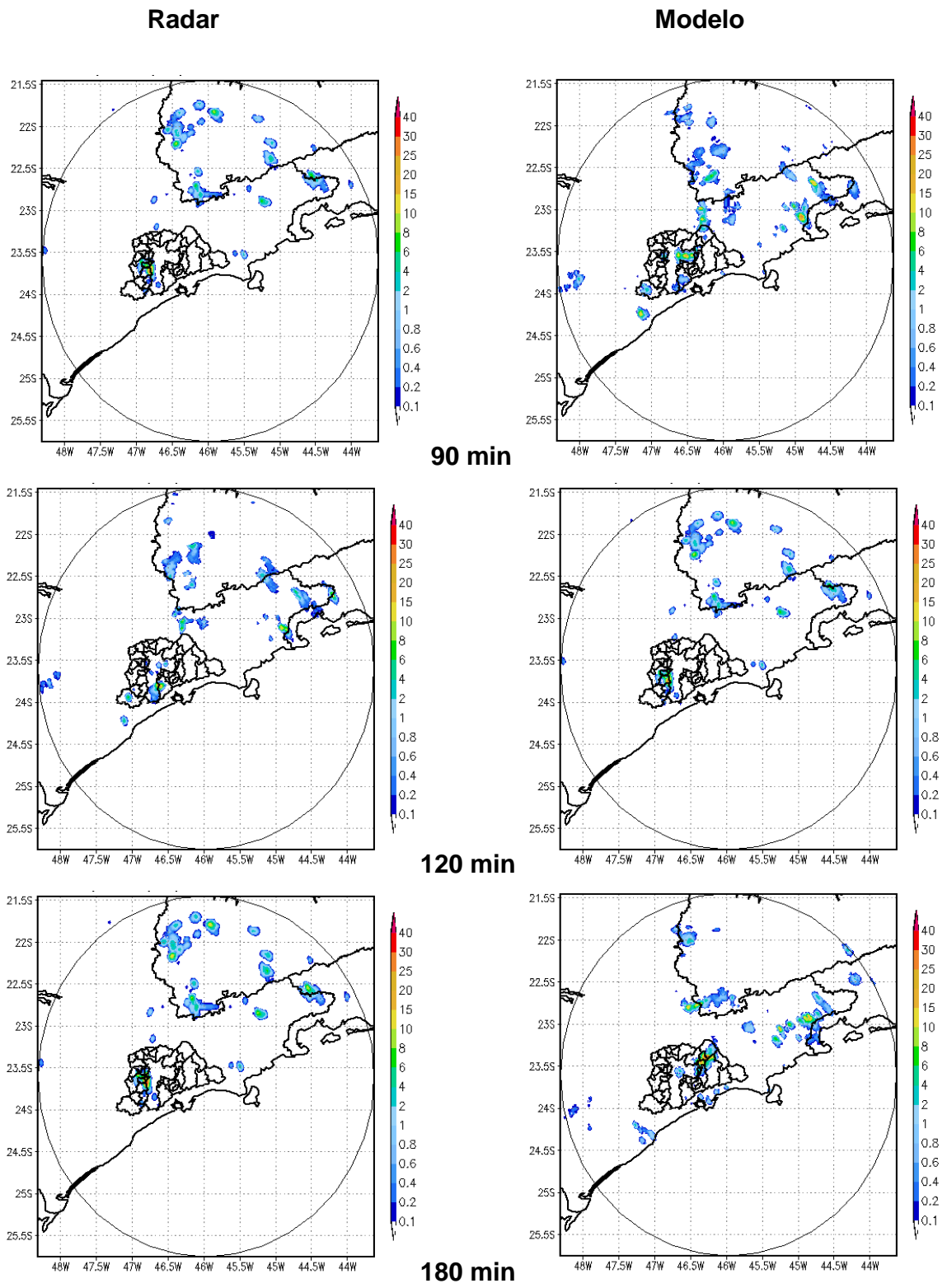


Figura 21: Continuação.

LINHA DE INSTABILIDADE

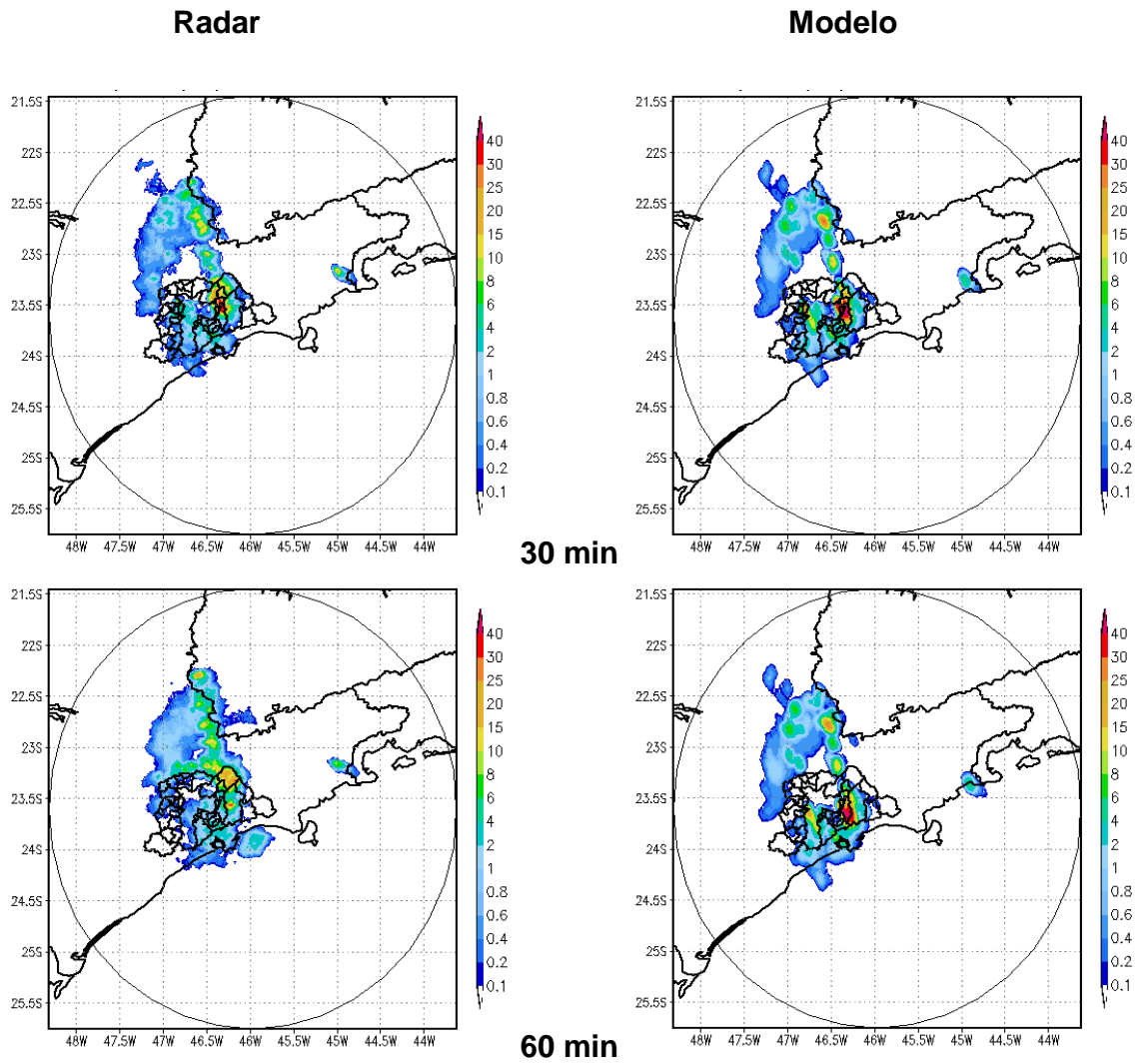


Figura 22: Similar à Figura 19, exceto para evento de Linha de Instabilidade do dia 19 de setembro de 2004 às 20:47 (UTC).

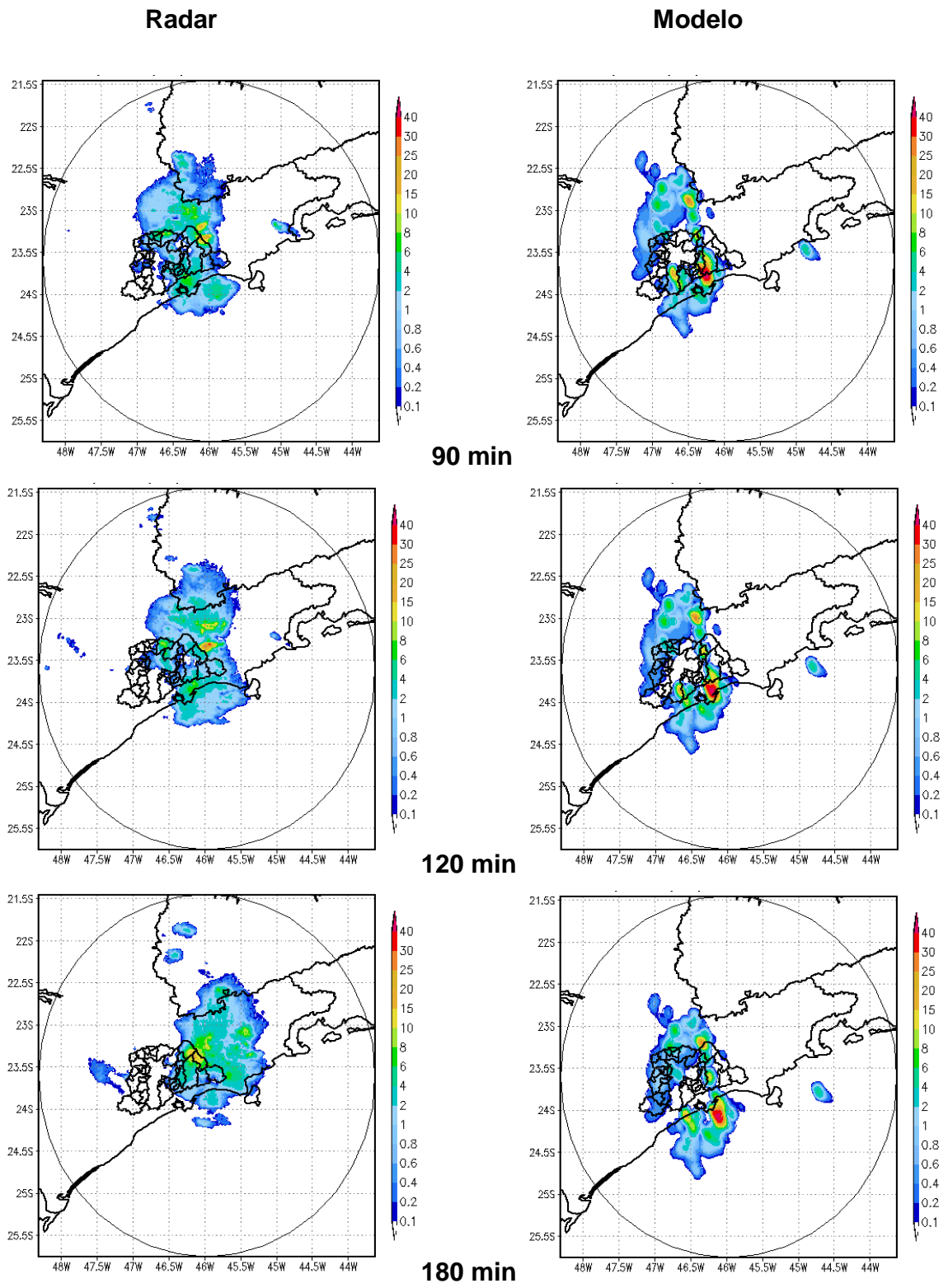


Figura 22: Continuação.

FRENTE FRIA

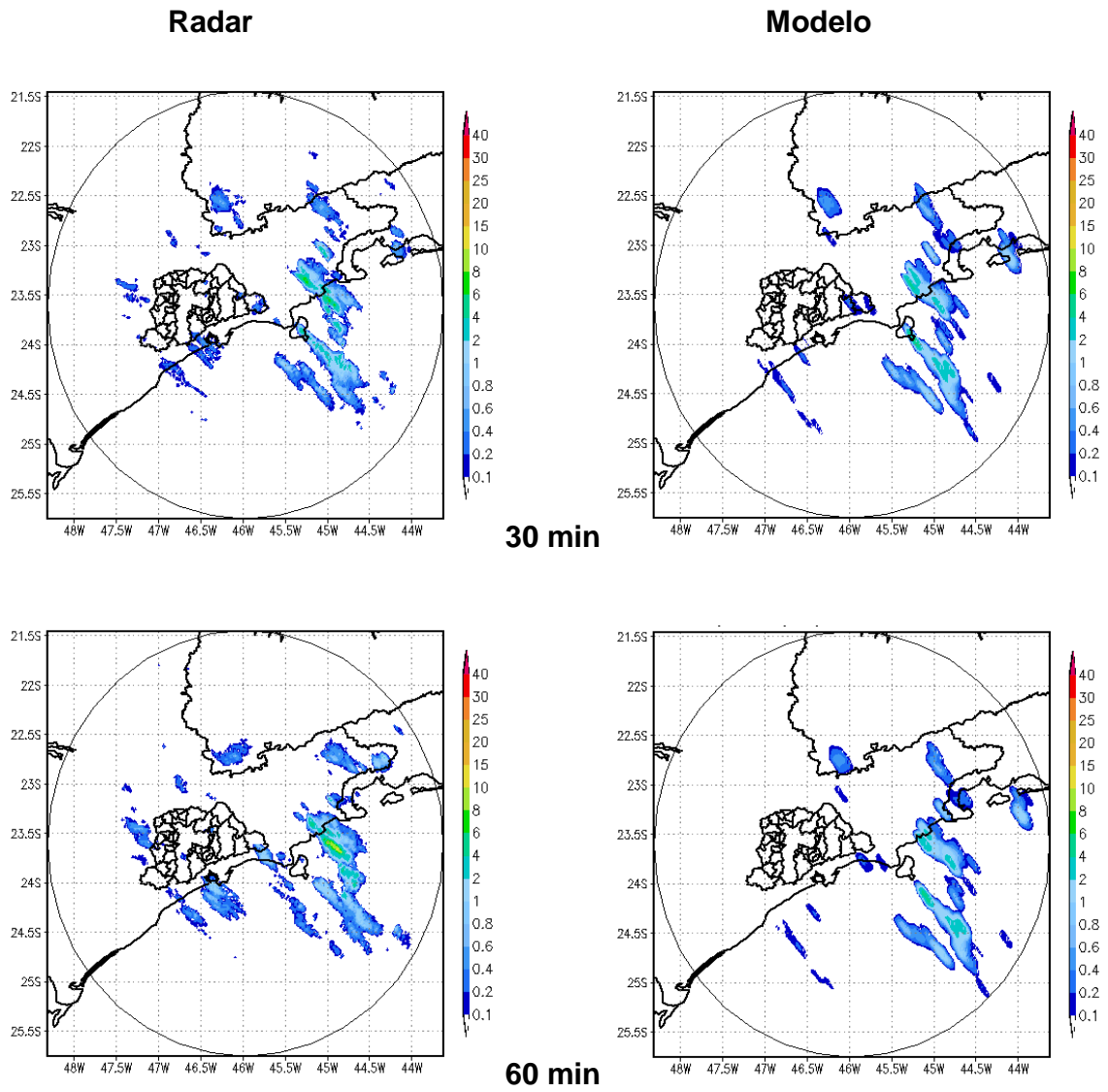


Figura 23: Similar à Figura 19, exceto para Sistema Frontal do dia 19 de junho de 2005 às 00:10 (UTC).

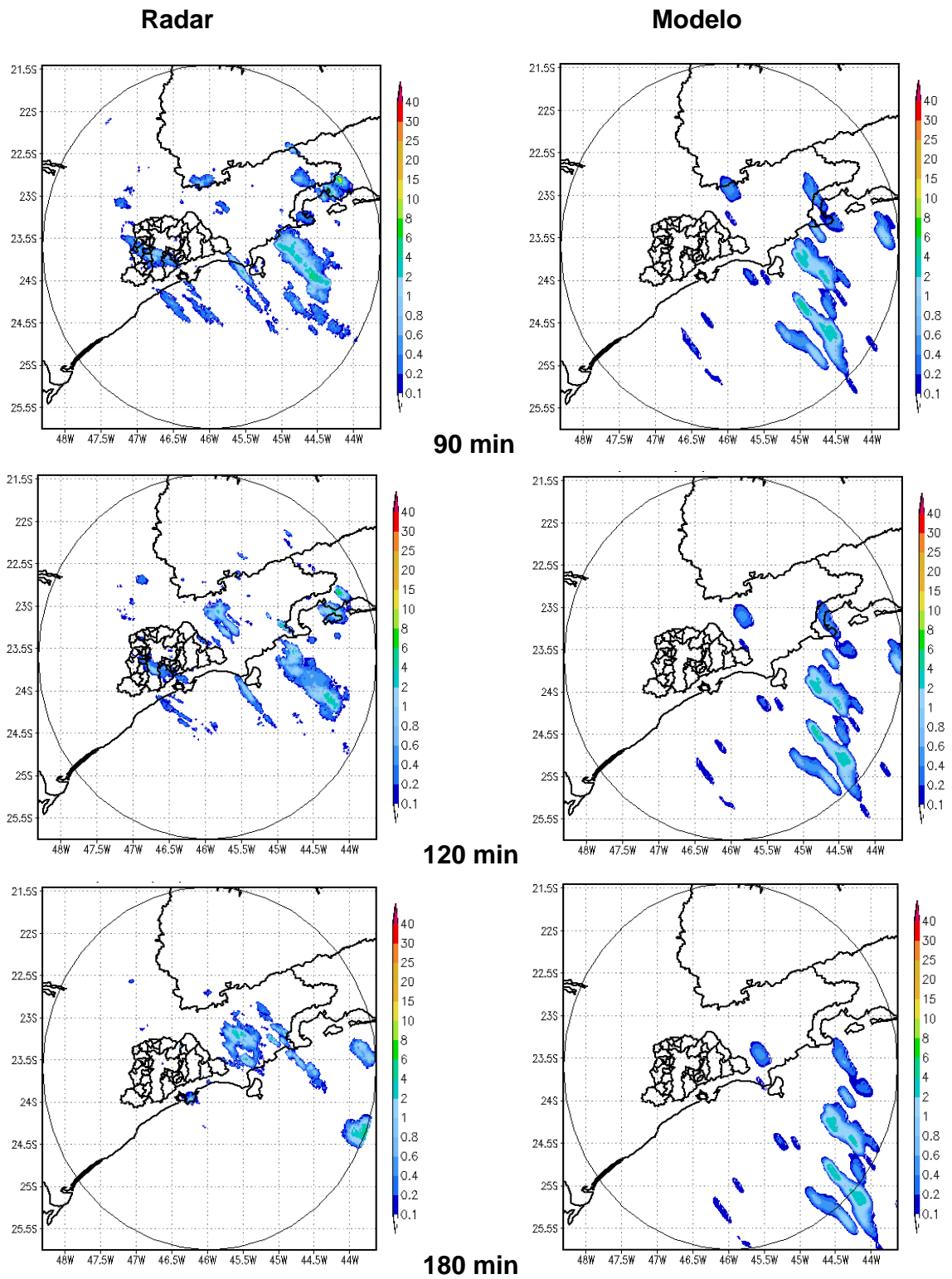


Figura 23: Continuação.

A avaliação do desempenho do modelo advectivo para os 5 estudos de casos apresentados acima, foi realizada por meio do Índice de Sucesso Crítico (CSI), Probabilidade de Detecção (POD), e Razão de Falsos Alarmes (FAR) para o limiar de 0.2 mm de chuva acumulada (Figs. 24 a 28).

Os resultados obtidos nesta análise mostraram que tanto o CSI quanto o POD decrescem ao longo da previsão, ou seja, quanto maior o tempo de extrapolação dos sistemas, menor a acurácia da previsão. Por outro lado, o índice FAR aumenta com o tempo de extrapolação. Esta análise, apesar do restrito número de eventos utilizados, apresentou CSI e POD superior a 0,70 (70%) para os eventos de frentes frias e linhas de instabilidade. Os mesmos índices para evento de brisa marítima apresentaram valores de 0,58 (58%) enquanto que, para banda dispersa e no máximo 90 minutos de extrapolação, o CSI e POD foram de 0,76 (76%) e inferior a 0,70 (70%) ao final de 180 minutos (3 horas) de previsão. O evento de convecção isolada apresentou valores de CSI e POD de 0,78 (78%) e 0,56 (56%) ao final de 180 minutos de previsão, respectivamente. Em relação ao índice FAR, os eventos de FF e LI apresentaram valores inferiores a 0,20 (20%) ao final da previsão e os eventos de CI, BM e BD valores em torno de 0,30 (30%).

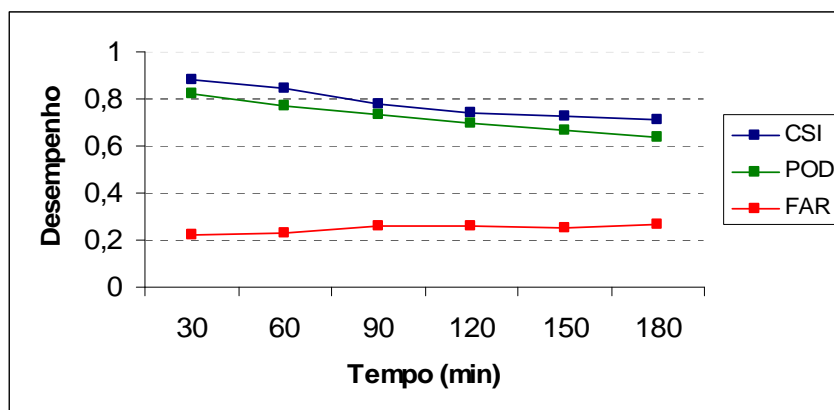


Figura 24: Evolução temporal do desempenho da previsão com os índices CSI, POD e FAR para evento de banda dispersa do dia 21 de abril de 2005, para limite de precipitação de 0.2 mm.

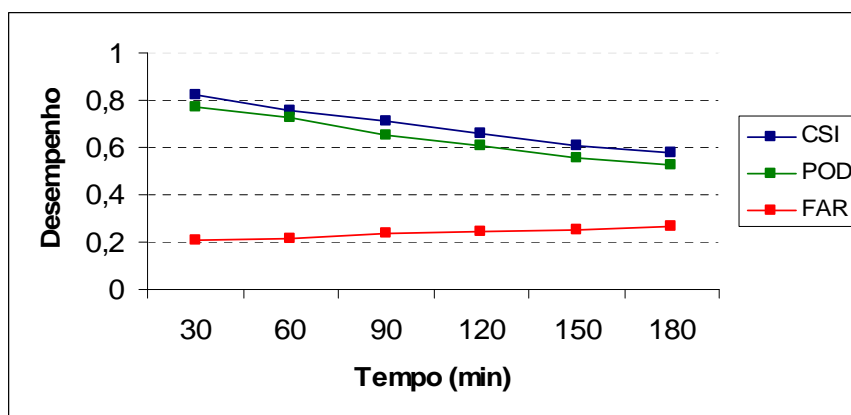


Figura 25: Similar a Figura 24, exceto para evento de brisa marítima do dia 02 de janeiro de 2005.

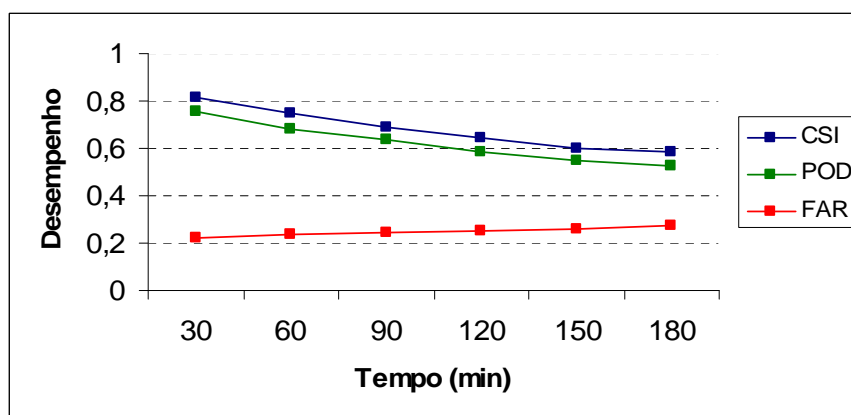


Figura 26: Similar a Figura 24, exceto para evento de Convecção Isolada do dia 18 de abril de 2004.

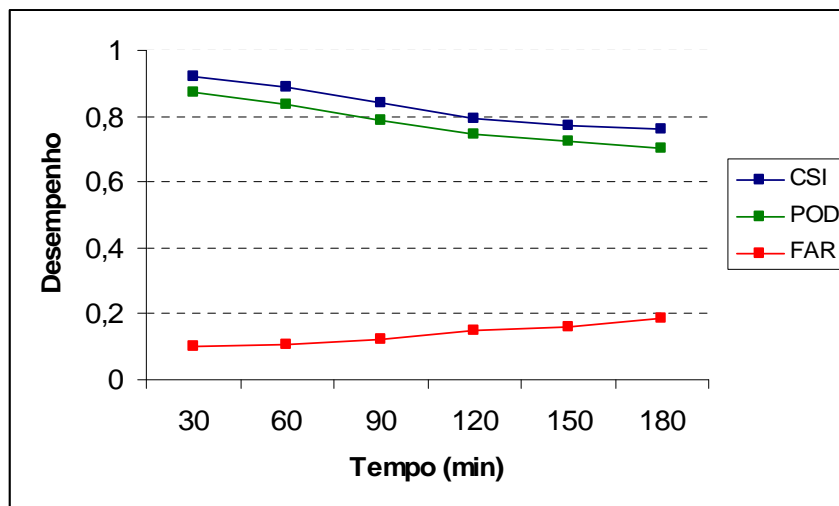


Figura 27: Similar a Figura 24, exceto para evento de Linha de Instabilidade do dia 18 de setembro de 2004.

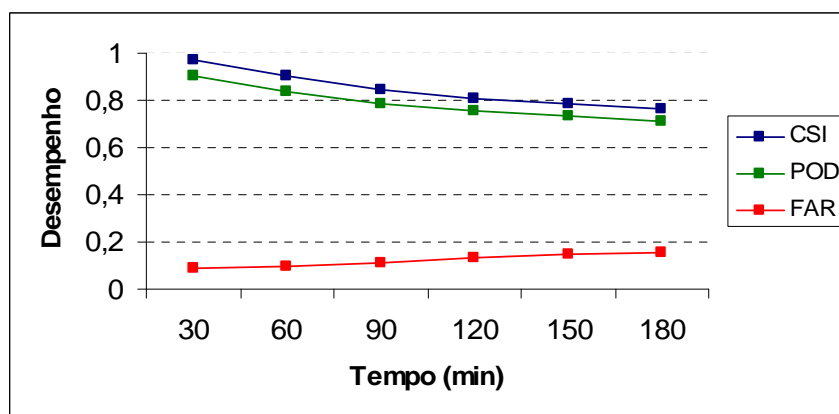


Figura 28: Similar à Figura 24, exceto para o evento de Frente Fria do dia 19 de junho de 2005.

3.3 ANÁLISE DO VETOR DESLOCAMENTO DOS SISTEMAS PRECIPITANTES

A avaliação do vetor deslocamento dos eventos analisados pode ser observada nos gráficos a seguir (Fig. 29 a 33). A Fig. 29a apresenta a mudança ocorrida na intensidade do vento para evento de banda dispersa do dia 21 de abril de 2005 no

período das 07:32 às 14:27 (UTC), com intensidade máxima de 50 km h^{-1} . Quanto à direção de deslocamento do sistema (Fig. 29b), é observado que após as 08:52 (UTC) o sistema praticamente apresentou a mesma direção, variando apenas a intensidade do sistema. As Figs. 30a e b mostram a intensidade e direção, respectivamente, do evento de brisa marítima do dia 02 de janeiro de 2005. Observa-se grande variação tanto na intensidade quanto na direção deste sistema ao longo do tempo, característica apresentada por sistemas precipitantes convectivos. A forte variação na intensidade deste sistema observada na Fig. 30b entre 18:12 e 18:57 (UTC) é explicada por ser este o horário aproximado de entrada da brisa no continente naquele dia. As Figs. 31a e b, para intensidade e direção do evento de convecção isolada do dia 18 de abril de 2004, mostram uma maior organização na intensidade deste sistema, uma vez que, ao longo do período analisado, essas variações não foram tão acentuadas, com valor médio de 3 km h^{-1} e direção de deslocamento de oeste/noroeste. As Figs. 32a e b, referentes à intensidade e direção do evento de linha de instabilidade do dia 18 de setembro de 2004, mostram um predomínio de noroeste no deslocamento deste sistema, denotando uma maior organização da estrutura da precipitação, com intensidade máxima em torno de 40 km h^{-1} . As Figs. 33a e b mostram a intensidade e direção do evento de frente fria do dia 19 de junho de 2005. Nestas figuras, observa-se pouca variação na intensidade de deslocamento do sistema, com valores entre 40 e 60 km h^{-1} , com direção de deslocamento com predomínio de noroeste. Assim como para o evento de linha de instabilidade, uma maior organização na estrutura da precipitação é evidente, fator importante para propiciar uma maior acurácia na previsão de chuva com o modelo advectivo.

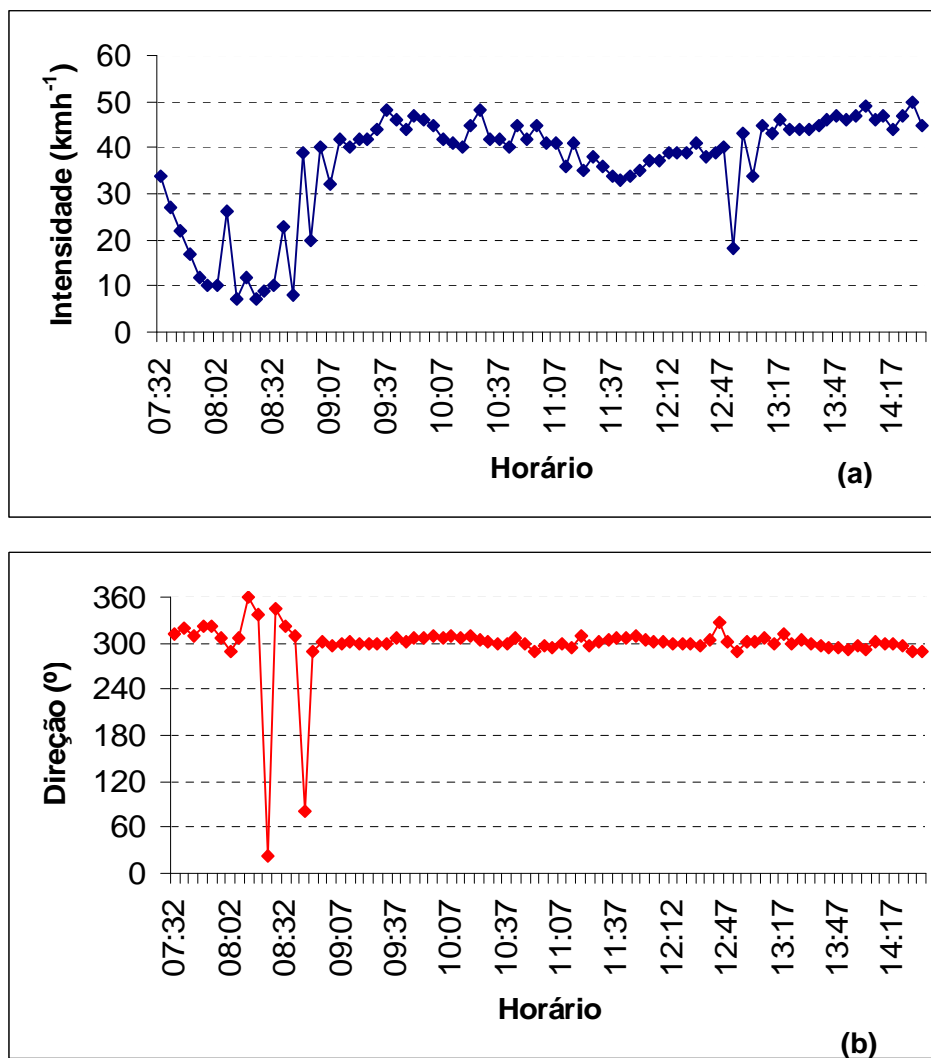


Figura 29: Evolução temporal da intensidade (a) e direção (b) de deslocamento para evento de Banda Dispersa do dia 21 de abril de 2005 entre as 07:32 e 14:27 (UTC). Horários, intensidades e direções estão indicados.

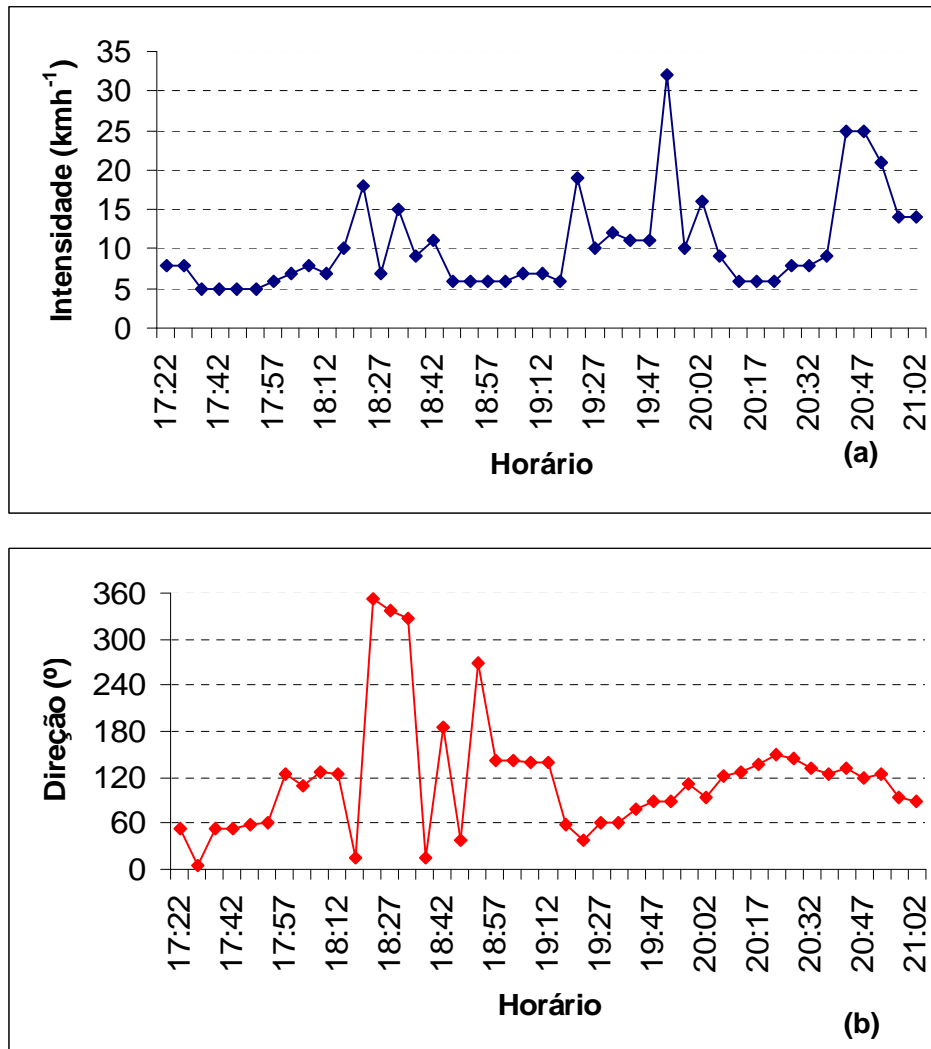


Figura 30: Similar a Figura 29, porém para evento de Brisa Marítima do dia 02 de janeiro de 2005 entre as 17:22 e 21:02 (UTC).

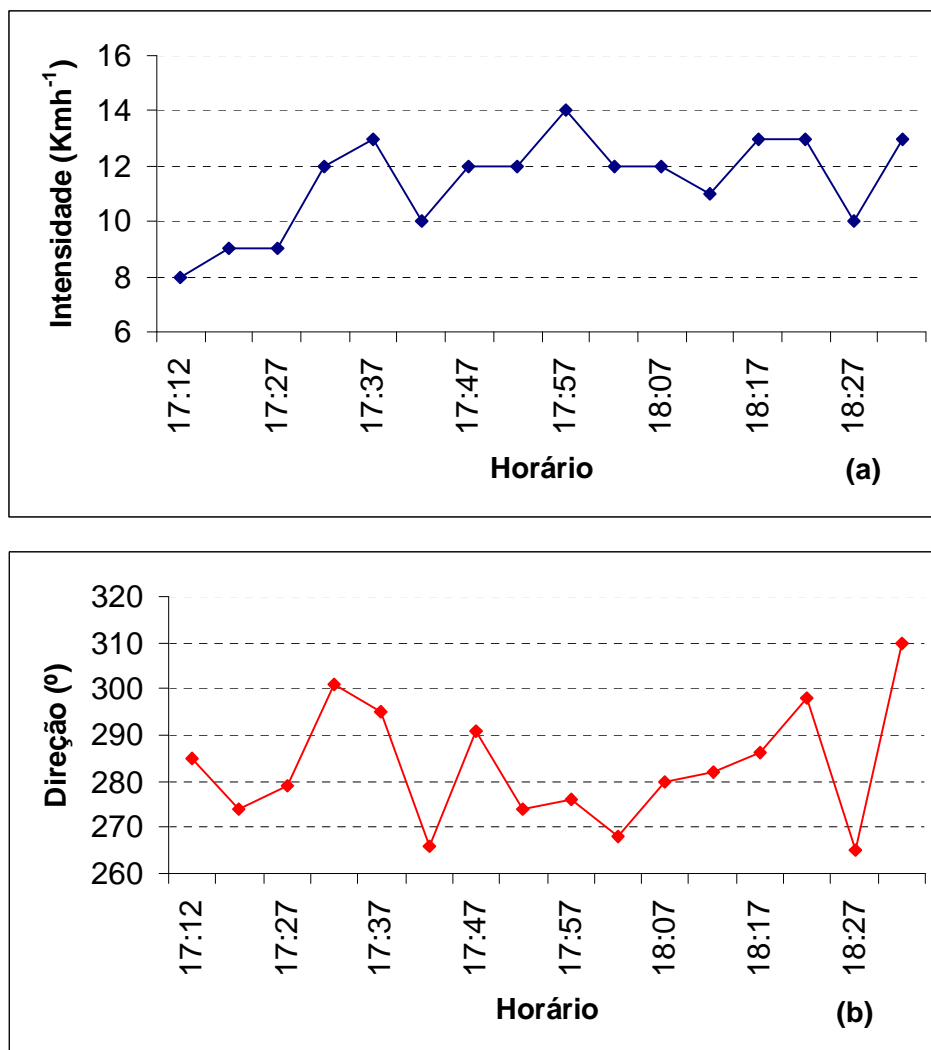


Figura 31: Similar a Figura 29, porém para evento de Convecção Isolada do dia 18 de abril de 2004 entre as 17:12 e 18:27(UTC).

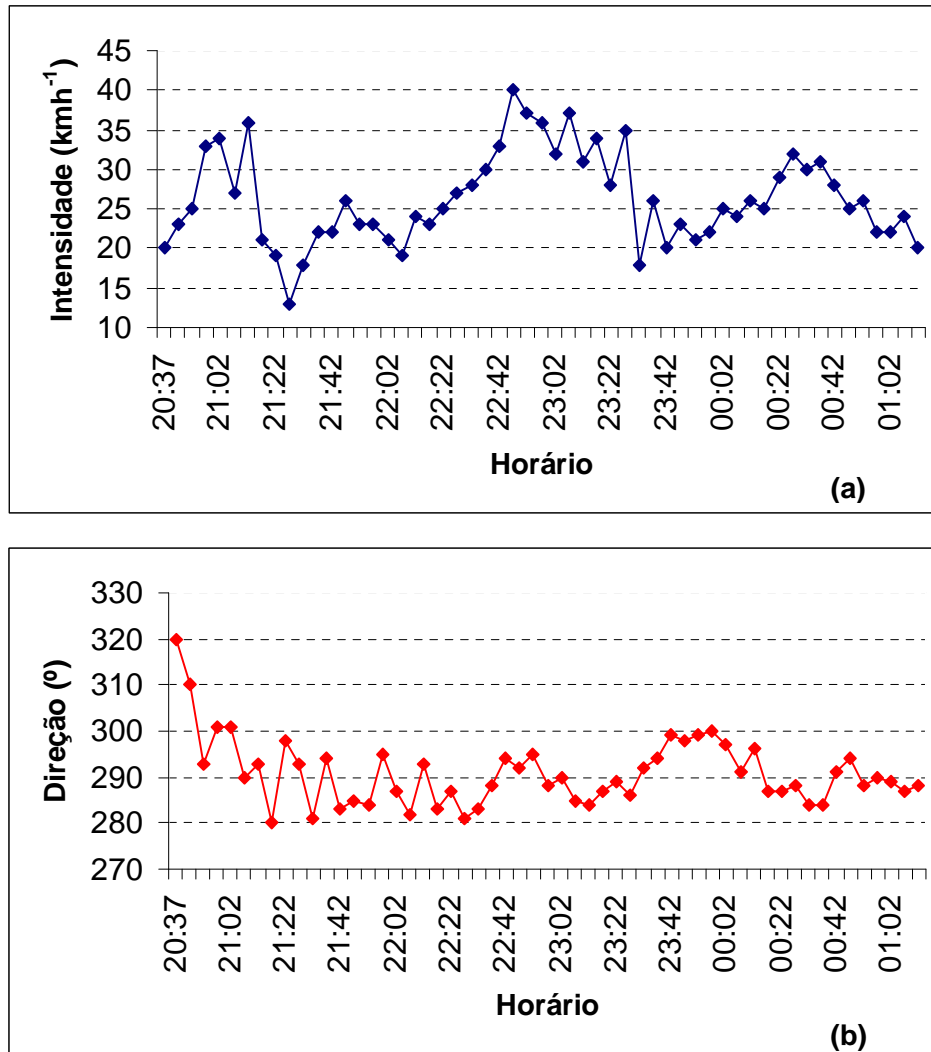


Figura 32: Similar a Figura 29, porém para evento de Linha de Instabilidade do dia 18 de setembro de 2004 entre as 20:37 e 01:02(UTC)

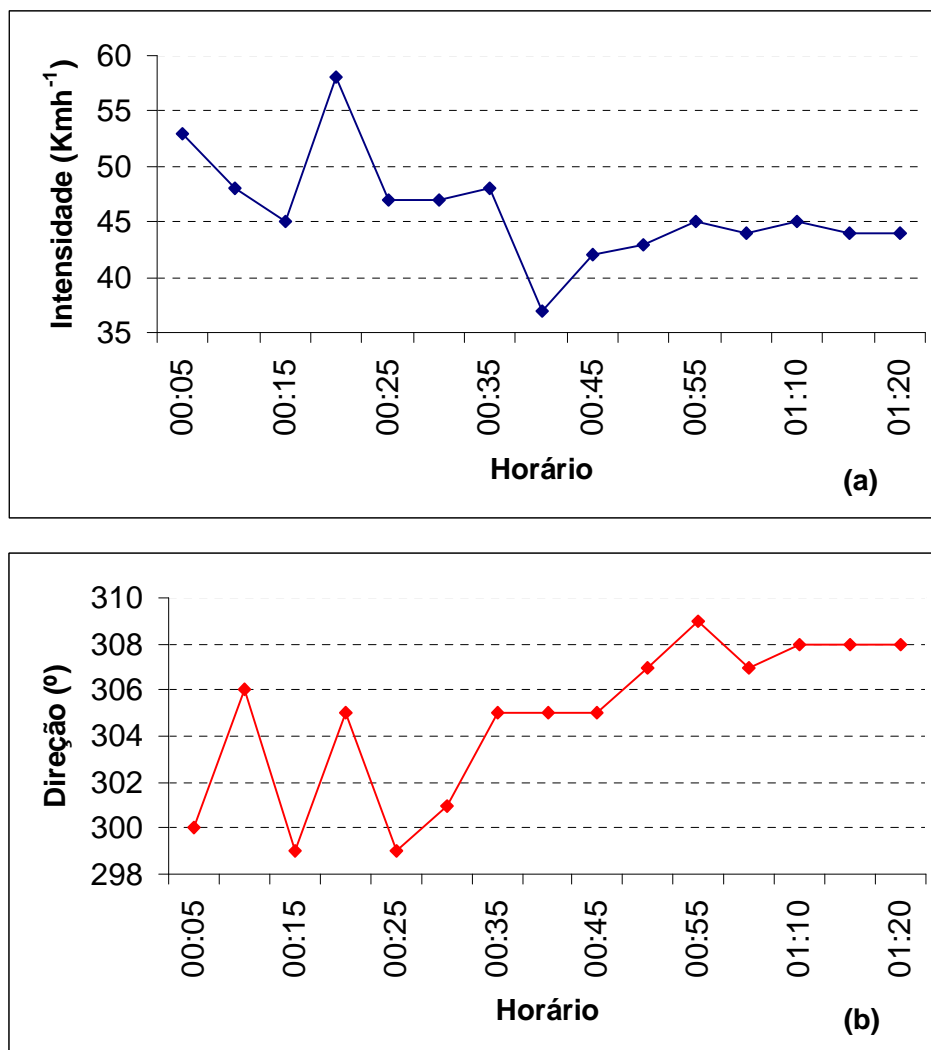


Figura 33: Similar a Figura 29, porém para Sistema Frontal do dia 19 de junho de 2005 entre as 00:05: e 01:20(UTC).

A Tabela 8 apresenta a direção predominante e velocidade média calculadas com todos os sistemas precipitantes avaliados pelo RSP na RMSP para o período de 2003 a 2007. Observa-se que FFs, LIs e CIs mostram deslocamento preferencial do quadrante W para E. Bds apresentam deslocamento do quadrante N enquanto BMs, do quadrante SE (como esperado). As velocidades médias dos sistemas mostradas na

Tabela 8 são máximas para FFs e mínimas para CIs. Para LIs, BDs e BMs, a velocidade média fica entre 37 e 45 km h⁻¹.

Tabela 8 Direção predominante e velocidade média dos sistemas precipitantes para o período de 2003 a 2007.

Sistemas	Direção Predominante (º)	Velocidade Média (km h⁻¹)
FF	SW/NE	70
LI	NW/SE	37
CI	W/E	18
BD	N/S-SE	45
BM	SE/NW	40

O grau de organização dos sistemas precipitantes é imprescindível na determinação do limite da previsibilidade. Portanto, sistemas mais organizados, como frentes frias, podem ser advectados por um período maior, enquanto que sistemas menos organizados, como brisa marítima, por exemplo, apresentam melhor previsão apenas nos primeiros minutos de extrapolação, conforme mostrado na Fig. 34. O sucesso da previsão não depende apenas da frequência do evento, mas também do tipo (convectivo ou estratiforme), sendo a precipitação de origem estratiforme mais fácil de ser prevista, devido sua menor variabilidade temporal e espacial (Sókol, 2008).

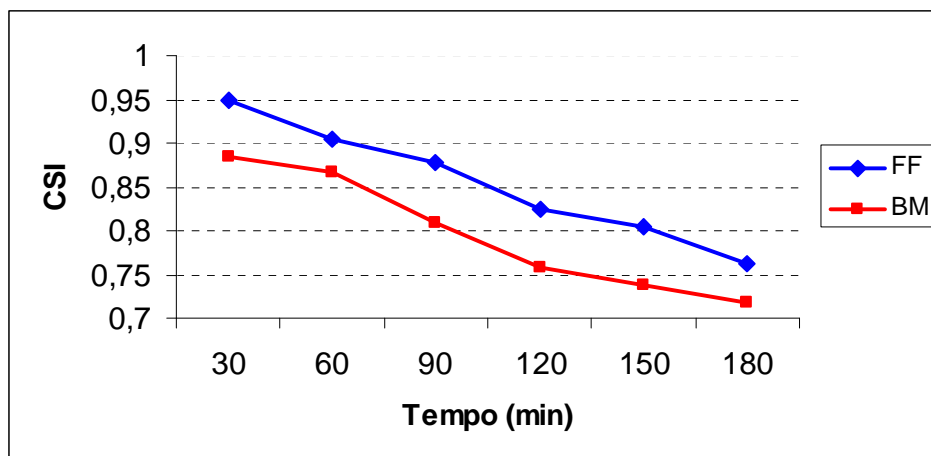


Figura 34: Avaliação do desempenho da previsão de chuva a curtíssimo prazo pelo índice CSI para evento de Brisa Marítima do dia 02 de janeiro de 2005 (curva vermelha) e sistema frontal do dia 19 de junho de 2005 (curva azul) para o limiar de 0,2 mm de chuva acumulada.

3.4 DESEMPENHO DA PREVISÃO DE CHUVA

A avaliação das previsões de chuva com o modelo advectivo aplicado aos diferentes tipos de sistemas precipitantes para todo o período foi realizada por meio dos índices CSI, POD e FAR nos limiares de chuva acumulada de 0.2 (Fig. 35), 2.0 (Fig. 36), 4.0 (Fig. 37), 8.0 (Fig. 38) e 16.0 mm (Fig. 39). Os resultados mostram que, em geral, os sistemas com estrutura da precipitação mais organizada, como linhas de instabilidade, ou estratiforme, como sistemas frontais, apresentaram melhor desempenho para previsão a curtíssimo prazo. Em seguida, aparecem às bandas dispersas de precipitação. Os sistemas com estrutura da precipitação menos organizada, como convecção isolada e brisa marítima, apresentam o menor desempenho quanto aos índices estudados.

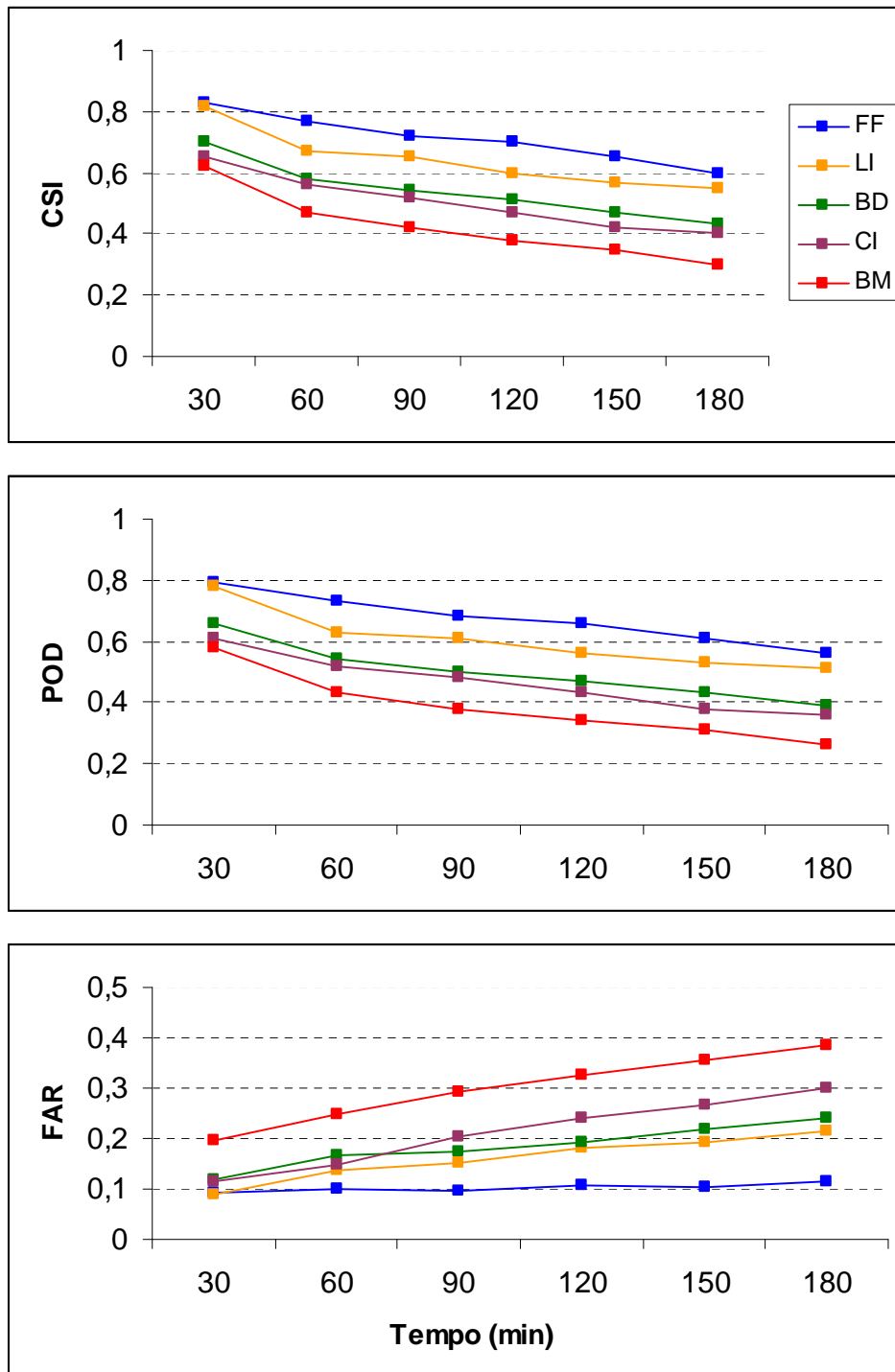


Figura 35: Desempenho da previsão de chuva a curtíssimo prazo para os diferentes sistemas precipitantes, pelos índices CSI, POD e FAR, para o limiar de 0.2 mm de chuva acumulada.

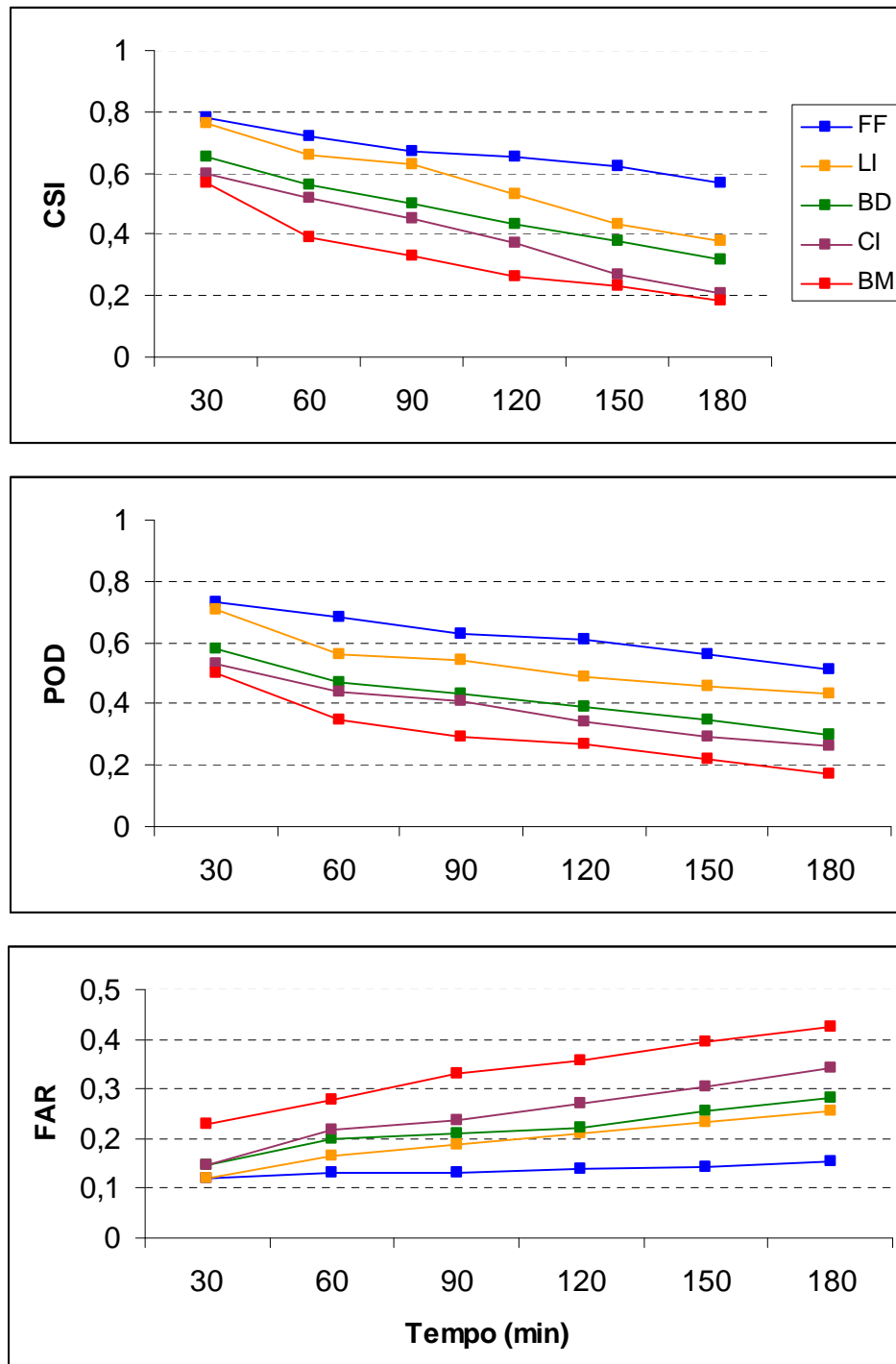


Figura 36: Similar a Figura 35, exceto para o limiar de 2.0 mm de chuva acumulada.

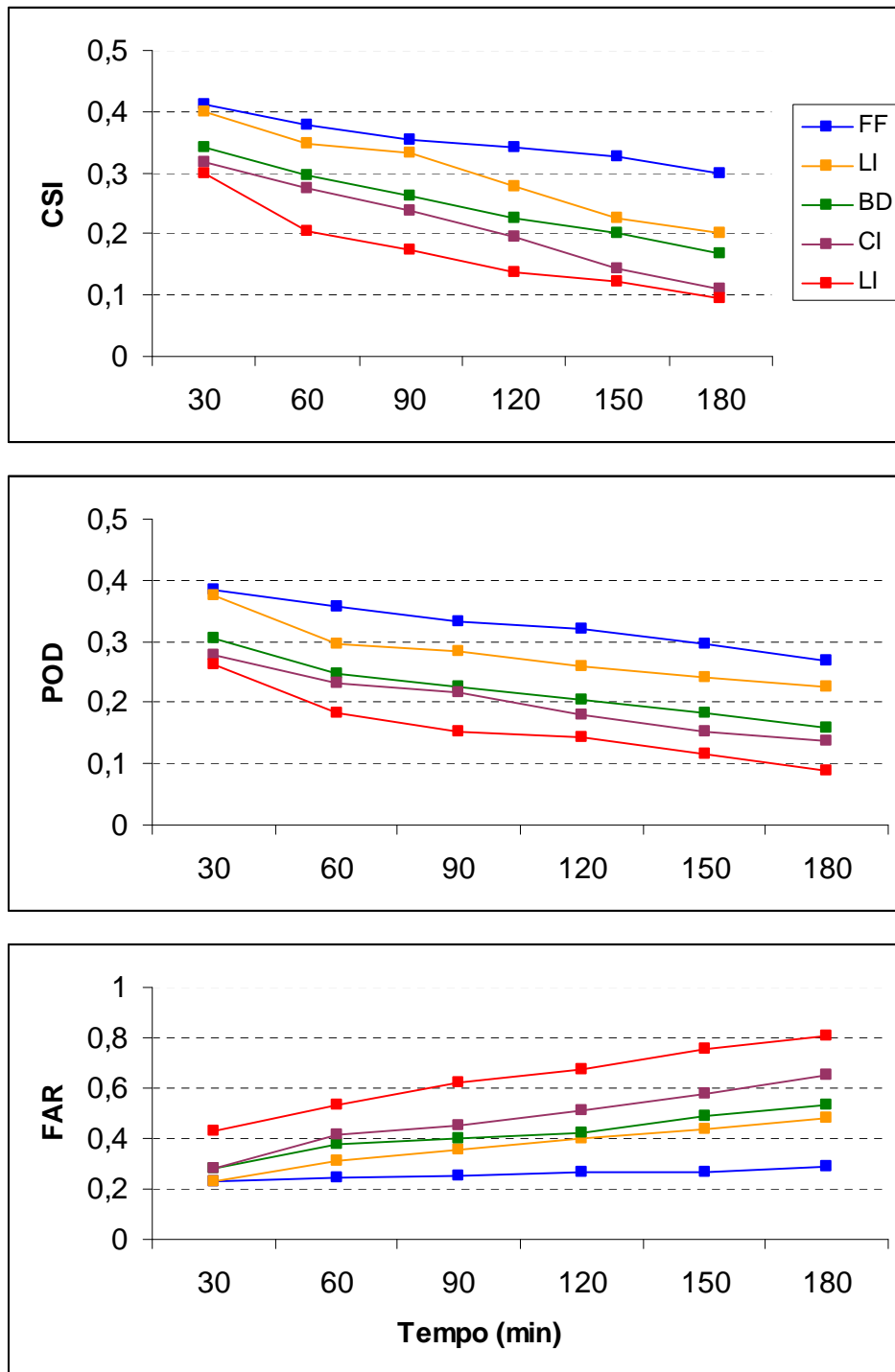


Figura 37: Similar a Figura 35, exceto para o limiar de 4.0 mm de chuva acumulada.

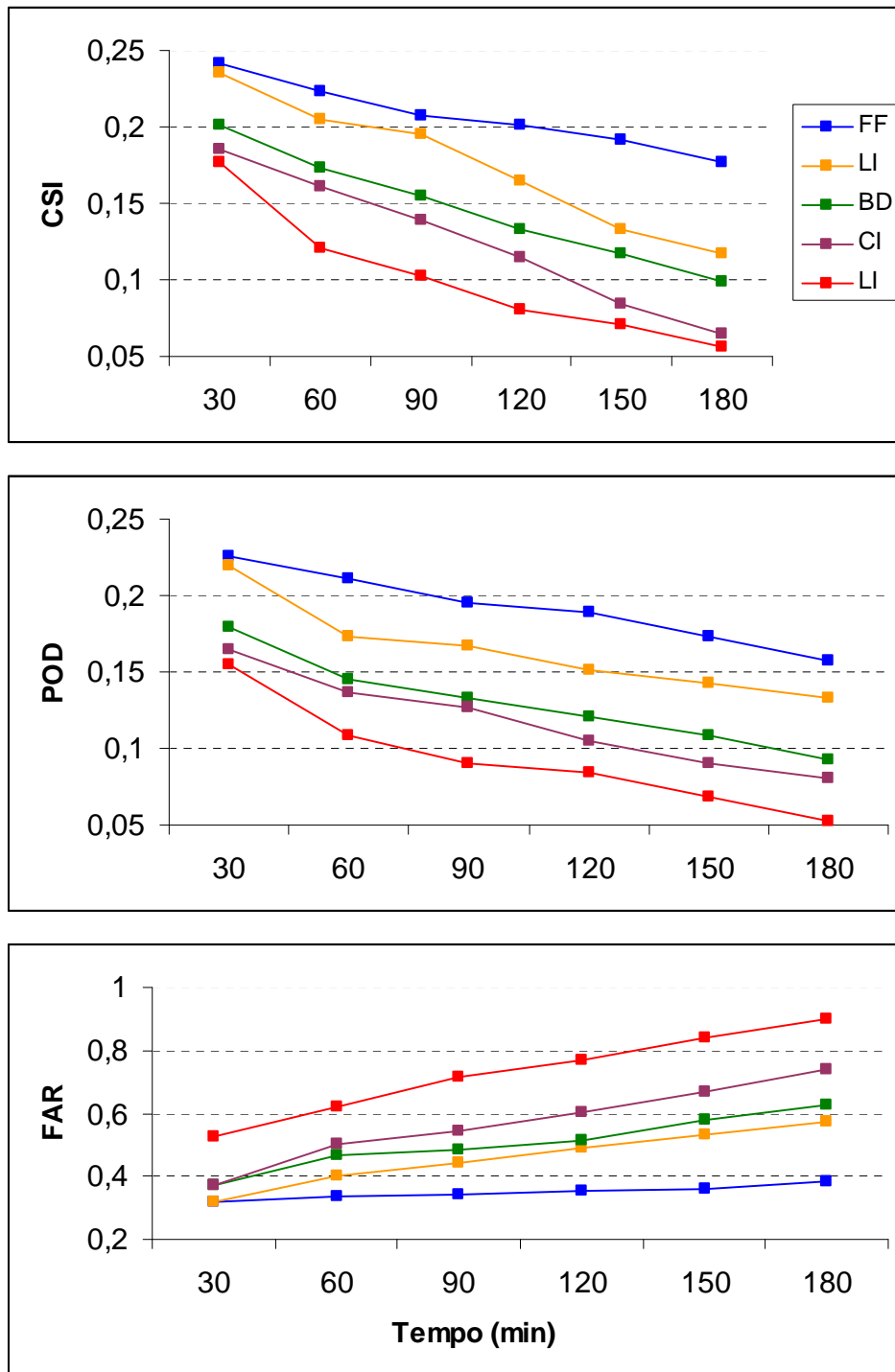


Figura 38: Similar a Figura 35, exceto para o limiar de 8.0 mm de chuva acumulada.

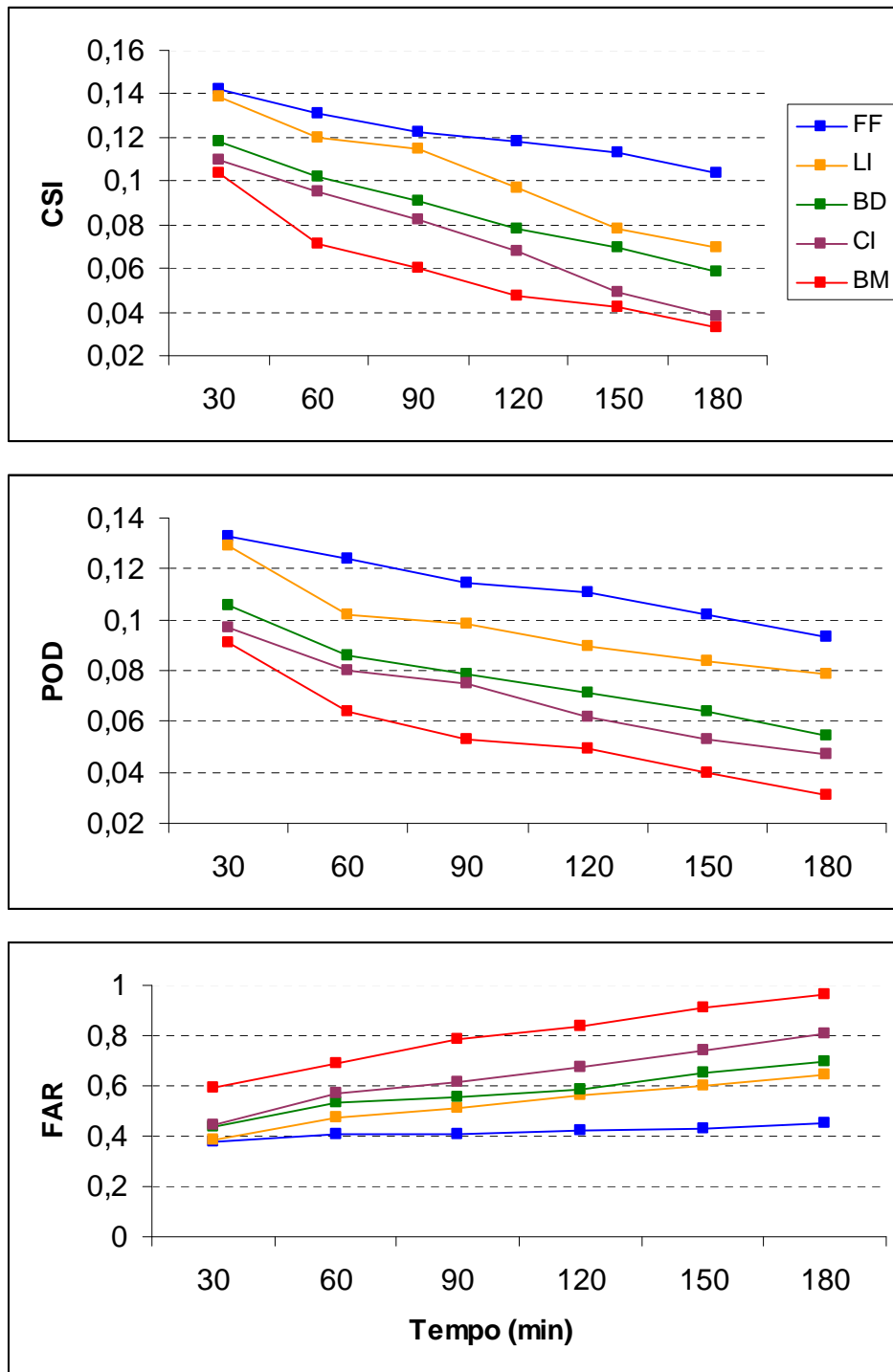


Figura 39: Similar a Figura 35, exceto para o limiar de 16.0 mm de chuva acumulada.

Os resultados das Figuras 35 a 37 para os limiares de 0.2, 2.0 e 4.0 mm de chuva acumulada mostram que frentes frias e linhas de instabilidade podem ser advectadas pelo modelo por um período superior a 90 minutos, enquanto que para convecção isolada e brisa marítima, o melhor desempenho da previsão foi para até 90 minutos de previsão. O pior desempenho da previsão de chuva para cada tipo de sistema precipitante foi apresentado para os limiares de 8.0 e 16.0 mm de chuva acumulada (Figs. 38 e 39), respectivamente. Os resultados das Figuras 35 a 39 mostram que o CSI decresce drasticamente como uma função do limiar de chuva acumulada. Estes resultados mostraram que quanto maior o limiar de chuva acumulada utilizado mais difícil torna-se a previsão devido à natureza variável dos sistemas precipitantes (por exemplo, células convectivas intensas) o que é explicado pela limitação do modelo em não considerar essa natureza durante a extrapolação. As Tabelas 9 a 11 apresentam o desempenho médio da previsão para 60 minutos de precipitação acumulada para os índices CSI, POD e FAR.

Tabela 9 Porcentagem do desempenho médio da previsão de chuva para 60 minutos de precipitação acumulada pelos índices CSI, POD e FAR, para o limiar de 0.2 mm de chuva acumulada para cada sistema precipitante.

Limiar 0.2 mm	CSI (%)	POD (%)	FAR (%)
FF	77	73	09
LI	67,5	63	13
BD	58	54	14
CI	56,4	52	16
BM	47	43	24

Tabela 10 Similar a tabela 9, exceto para o limiar de 2.0 mm de chuva acumulada.

Limiar 2.0 mm	CSI (%)	POD (%)	FAR (%)
FF	72	68	13
LI	62	56	16
BD	56	47	20
CI	52	44	22
BM	39	35	27

Tabela 11 Similar a tabela 9, exceto para o limiar de 4.0 mm de chuva acumulada.

Limiar 4.0 mm	CSI (%)	POD (%)	FAR (%)
FF	38	36	24
LI	35	30	31
BD	30	25	37
CI	27	23	41
BM	21	18	53

Tabela 12 Similar a tabela 9, exceto para o limiar de 8.0 mm de chuva acumulada.

Limiar 8.0 mm	CSI (%)	POD (%)	FAR (%)
FF	22	21	34
LI	20	17	40
BD	17	15	47
CI	16	13	50
BM	12	10	62

Tabela 13 Similar a tabela 9, exceto para o limiar de 16.0 mm de chuva acumulada.

Limiar 16.0 mm	CSI (%)	POD (%)	FAR (%)
FF	13	12	40
LI	12	10	47
BD	10	09	53
CI	09	08	57
BM	07	06	69

Os resultados apresentados nas Tabelas 9 a 11 indicam que o modelo tem desempenho crescente da previsão de brisa marítima para a previsão de frentes frias. Ainda, o desempenho do modelo decresce das mais baixas para as mais altas acumulações de precipitação. Por exemplo, o desempenho máximo obtido pelo índice CSI para 60 minutos de previsão para os limites de acumulação de 0.2 e 16.0 mm são 77% e 12%, respectivamente. O melhor desempenho do modelo advectivo foi obtido para previsões de FFs com CSI de 77 %. O desempenho máximo do modelo para 60 minutos de previsão de chuva acumulada para Lis, BDs, CIs e BMs são 67.5, 58, 56.4 e 47%, respectivamente. O CSI decresce rapidamente com o aumento do limiar de chuva acumulada de 40, 25 % para os limiares de 4.0 e 8.0 mm. Estes resultados são compatíveis com os de Pereira Filho et al. (1999) para uma resolução espacial de 2 km X 2 km.

Os sistemas mais organizados apresentaram o maior grau de correlação linear da previsão, em torno de 0,75 (75%) para 120 minutos de advecção. Menor grau de correlação foi encontrado para os sistemas menos organizados, o que denota a

limitação do modelo advectivo em prever o campo de precipitação ao longo do deslocamento dos sistemas precipitantes, bem como a perda da acurácia da previsão para uma previsão de até 3 horas de chuva acumulada. Esta constatação corrobora a dependência das correlações das previsões para cada um dos tipos de sistemas precipitantes que atuam na área de cobertura do RSP com o grau de organização destes sistemas (Fig. 38).

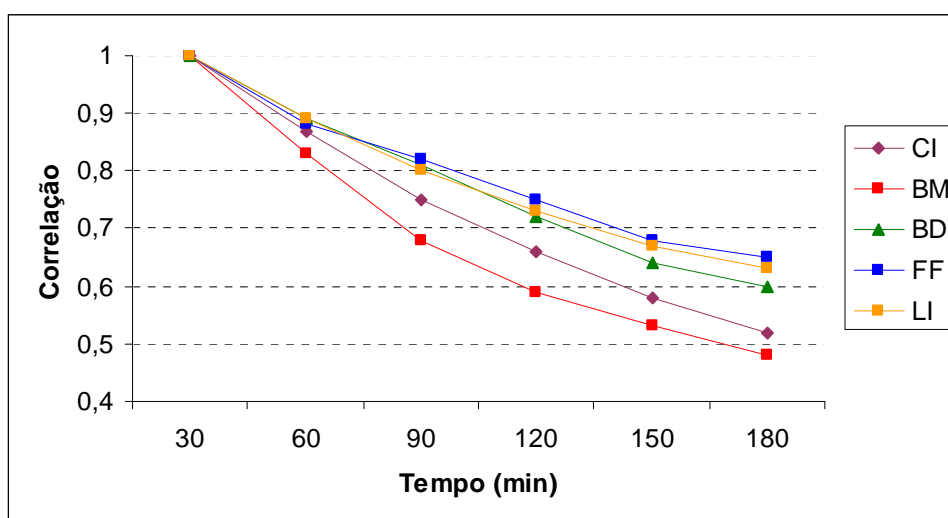


Figura 40: Coeficiente de correlação da previsão para os diferentes tipos de sistemas precipitantes como monitorados pelo RSP.

Os erros das previsões em relação às observações com o RSP para os diferentes sistemas precipitantes que atuam na RMSP foram analisados por meio do EQM e dos seus componentes de amplitude e fase. A acurácia da previsão para até 3h de precipitação acumulada em termos do EQM é apresentada na Fig. 39. Os erros diminuem dos sistemas convectivos para os estratiformes. Esse gráfico quantifica os erros das previsões de chuva com o modelo advectivo.

A Fig. 40 mostra a análise do termo de amplitude do EQM. Este termo indica os erros na quantificação da chuva pelo modelo advectivo para cada tipo de sistema. Os maiores valores no erro da amplitude estão relacionados aos sistemas convectivos e os menores, aos estratiformes. Finalmente, a Fig. 41 apresenta a análise do termo de fase do EQM. Este termo está relacionado à posição do sistema. Os maiores erros na detecção da posição dos sistemas estão associados aos sistemas convectivos e os menores, aos estratiformes. Estas constatações mostram novamente que a acurácia da previsão depende do tipo de sistema (convectivo ou estratiforme). Os resultados das Figuras 40 e 41 mostram que os maiores erros estão relacionados ao termo de amplitude do EQM. Isto constata a dificuldade do modelo advectivo na quantificação da precipitação.

Os erros encontrados para os diferentes sistemas apresentados nesta discussão e a avaliação dos índices CSI, POD e FAR, permitem classificar os sistemas analisados quanto à previsibilidade de chuva a curtíssimo prazo na RMSP com o modelo advectivo na seguinte ordem decrescente: Frentes Frias, Linhas de Instabilidade, Bandas Dispersas, Convecção Isolada e Brisa Marítima.

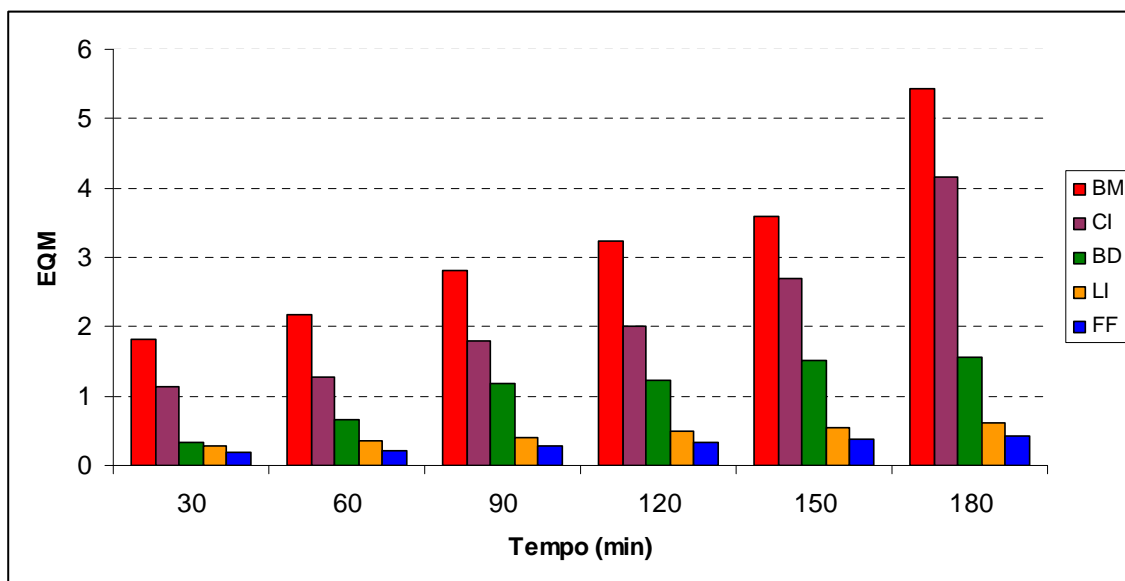


Figura 41: Erro Quadrático Médio da precipitação acumulada em 3 horas prevista pelo modelo advectivo em relação ao estimado pelo RSP.

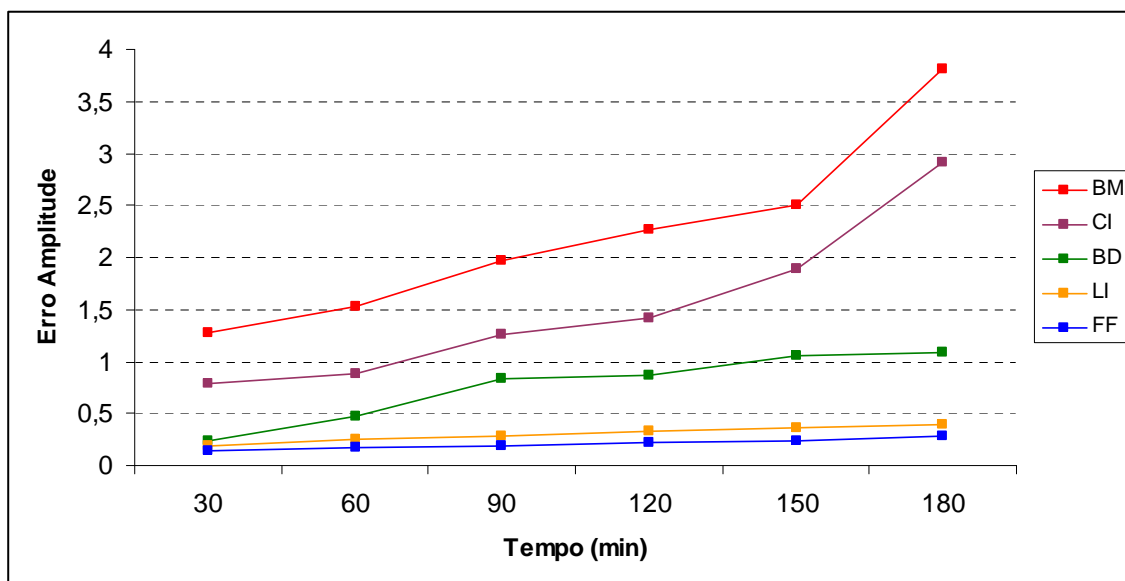


Figura 42: Termo de amplitude do Erro Quadrático Médio da precipitação acumulada em 3 horas prevista pelo modelo advectivo em relação ao estimado pelo RSP.

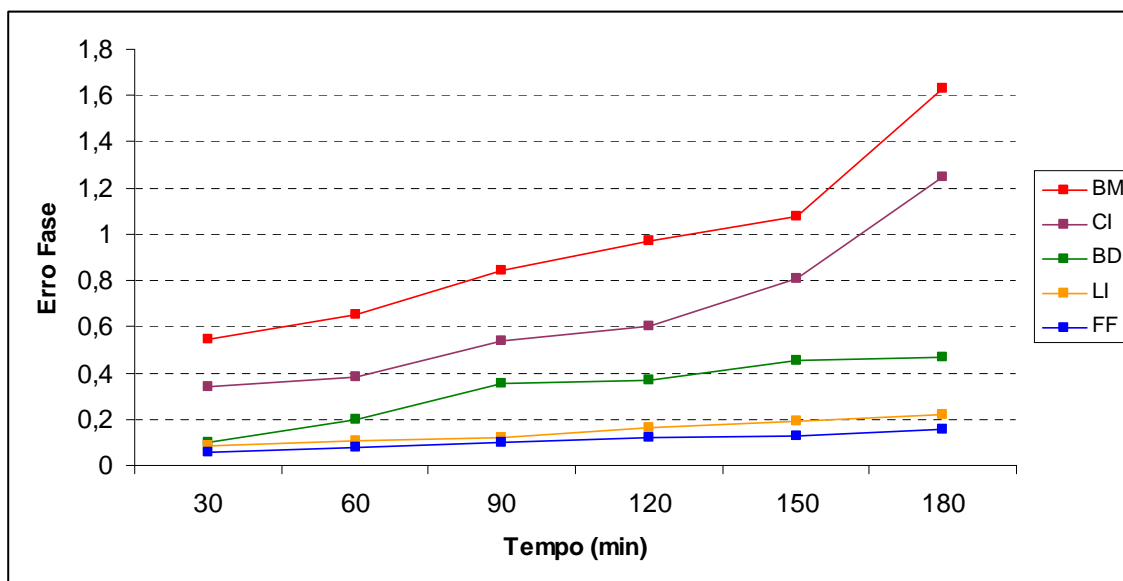


Figura 43: Similar a Fig. 42, exceto para o Termo de fase do Erro Quadrático Médio.

4 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Os dados de chuva do radar meteorológico de São Paulo do período de 2003 a 2007 foram convertidos em campos de taxa de precipitação e uma criteriosa inspeção visual destes possibilitou identificar padrões associados aos diferentes tipos de sistemas precipitantes que atuam na área de cobertura do RSP.

Foram identificados cinco tipos de sistemas precipitantes: Frentes Frias (FF), Bandas Dispersas de precipitação (BD), Linhas de Instabilidade (LI), Convecção Isolada (CI) e Brisa Marítima (BM). A caracterização destes sistemas foi realizada de acordo com a organização dos ecos de chuva, distribuições horizontais destes, deslocamento e duração.

As FFs, assim como BDs, algumas vezes atuam por mais de 5 dias na área de cobertura do radar. O período de duração média das FFs foi entre 18-20 horas. A

característica principal destes sistemas é o deslocamento de sudoeste para nordeste. As BDs são geralmente mais intensas no período de ZCAS e apresentam áreas de precipitação convectiva embebidas numa área maior de precipitação estratiforme, que é contínua no maior período do dia. O sentido de deslocamento característico é de noroeste para sudeste.

As LIs atuam isoladas ou associadas a sistemas de maior escala, como frentes frias. O horário de predominância deste sistema foi entre 14 e 18 (hora local) em virtude da importância do ciclo de aquecimento diurno na formação deste sistema.

CI e BMs são sistemas morfologicamente semelhantes, caracterizados pela presença de células convectivas intensas. Estes são formados geralmente à tarde, entre 13:30 e 18:30 (hora local) e 14:30 e 19:30 (hora local), respectivamente, portanto em horários de forte aquecimento superficial. O que difere estes sistemas são o sentido de deslocamento e a organização. A CI se forma preferencialmente no interior do continente e geralmente apresenta deslocamentos lentos para leste, enquanto que a BM se forma alinhada junto à costa, é organizada pela presença da Serra do Mar tem propagação para oeste e interior do continente.

Estes eventos também foram classificados em estratiformes e convectivos. Os estratiformes dominam no outono e inverno e os convectivos, na primavera e verão. Pela análise dos sistemas, as frentes frias atuam ao longo de todo ano, sendo os maiores picos de atuação entre os meses de maio a outubro. Já a convecção isolada atua preferencialmente entre os meses de novembro e abril. As brisas marítimas atuam o ano inteiro, mas apenas no período entre novembro e abril tornam-se convectivamente ativas. As linhas de instabilidade atuam durante todo ano, com menor

ocorrência em maio e agosto. As bandas dispersas foram observadas durante todo o ano, com maior presença nos meses de verão devido a ZCAS.

A avaliação dos resultados das previsões de chuva obtidas com o modelo advectivo mantendo-se o vetor deslocamento constante durante a extrapolação contra as estimativas do RSP foi realizada para os limiares de chuva acumulada de 0.2, 2.0, 4.0, 8.0 e 16.0 mm. O modelo advectivo apresentou melhor desempenho das mais baixas para as mais altas acumulações de precipitação. Assim, como para os sistemas com estrutura da precipitação mais organizada, como linhas de instabilidade, ou estratiforme, como sistemas frontais.

A correlação linear mostrou que os eventos estratiformes também possuem o maior grau de correlação, decorrência do grau de organização dos sistemas e do ciclo de vida dos mesmos, fatores determinantes no limite da previsibilidade destes, para uma previsão de até 3 horas de chuva acumulada.

Por meio do EQM os erros das previsões em relação às observações com o RSP foram analisados. Os menores erros das previsões de chuva com o modelo advectivo estão relacionados com os sistemas precipitantes que possuem uma estrutura morfológica mais homogênea e mais organizada da precipitação, assim como um ciclo de vida maior. Isto permite que estes sistemas possam ser advectados por um período superior a 90 minutos. Nos sistemas convectivos que apresentam maiores erros, a previsão mais acurada foi obtida para intervalos de tempo acima de 30 minutos nos casos de situação convectiva e entre 60 e 90 minutos, para os casos de convecção mais organizada. O termo de amplitude do EQM apresentou maior erro comparado ao

termo de fase. Isto mostra a dificuldade do modelo advectivo na quantificação da precipitação.

A análise do desempenho da previsão por meio dos índices CSI, POD e FAR, mais a análise do coeficiente de correlação e dos termos de amplitude e fase do EQM para os diferentes sistemas apresentados, permitiram classificar a ordem de acurácia da previsão de chuva a curtíssimo prazo na RMSP com o modelo advectivo, na seguinte ordem decrescente: Frentes Frias, Linhas de Instabilidade, Bandas Dispersas, Convecção Isolada e Brisa Marítima, respectivamente. Pode-se concluir ainda que o inverno é a estação que responde melhor à previsão de chuva a curtíssimo prazo na RMSP com esta metodologia, uma vez que as frentes frias são mais freqüentes nesta estação.

Como sugestões para trabalhos futuros as seguintes questões são propostas

- Avaliar o desempenho da previsão a curtíssimo prazo para cada estação do ano.
- Incluir um maior número de casos para avaliação da previsão.
- Comparar esta metodologia de previsão de chuva contra modelos hidrológicos para estudos na RMSP.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Referências Bibliográficas¹

AUSTIN, G.L., and A. BELLON, 1974: The use of digital radar records for short-term precipitation. **Quart. J. of the Roy. Meteor. Soc.**, 100, 658-664.

AUSTIN, G. L., and A. BELLON, 1982: Very-short-range forecasting of precipitation by objective extrapolation of radar and satellite data. Nowcasting, K. A. Browning, Ed., **Academic Press**, 177–190.

BELLON, A. and AUSTIN, G.L., 1978. The evaluation of two years of real-time operation of a short term precipitation forecasting procedure (SHARP). **J. Appl. Meteorol.**, 17, 1778-1787.

BELLON, A. and AUSTIN, G., 1984. The accuracy of short-term radar rainfall forecasts. **J. Hydrol.**, 70, 35-49.

BRÉMAUD, P.J. and Y.B. POINTIN, 1993: Forecasting heavy rainfall from rain cell motion using radar data. **J.Hydrol.**, 142, 373-389.

BROWNING, K.A. COLLIER, C.G., 1989. Nowcasting of precipitation systems. **Rev. Geophys.**, 27, 345-370.

BROWNING, K.A. COLLIER, C.G., LARKE, P.R., MENMUIR, P., MONK, G.A. AND OWENS, R.G., 1982. On the forecasting of frontal rain using a weather radar network. **Mon. Weather Rev.**, 110, 534-552.

COLLIER, C.G. Nowcasting: Mesoscale Observations and Short-Range Prediction., Proceedings of an International Symposium held 25-28 August, 1981 in Hamburg, Germany. Edited by B. Battrick and J. Mort. ESA SP-165, 1981. p.201

COLLIER, C.G. The combined use of weather radar and mesoscale numerical model data for short-period rainfall forecasting. In: SIMP. INTERN. sobre APLICAÇÕES HIDROLÓGICAS DO RADAR METEOROLÓGICO, Salford, Inglaterra, 1989. – Preprint of the International Symposium on Hydrological Applications on Weather Radar. Salford, 1989. K1.

COTTON W. R. and R. A. ANTHES, 1989. **Storm and cloud dynamics**. Academic Press, 880 pp.

DIXON, M., and G. WIENER, 1993: TITAN: Thunderstorm identification, tracking analysis and nowcasting – a radar based methodology. **J. Atmos. Oceanic Tech.**, 10, 785-797.¹

¹ De acordo com: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**. Apresentada em: Diretrizes para apresentação de dissertação da USP: documento eletrônico e impresso. Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBi. São Paulo, 2004.

- DOELING, I. G., J. JOSS, and J. RIELD, 1998: Systematic variations of Z-R relationships from drop size distributions measured in northern Germany during seven years. **Atmos. Res.** 47-48, 635-649.
- EINFALT, T., DENOLUX, T. and JACQUET, G., 1990. A radar rainfall forecasting method designed for hydrological purposes. **J. Hydrol.**, 114, 229-244.
- ELVANDER, R.C., 1976. An evaluation of the relative performance of three weather echo forecasting techniques. In: Preprint Vol. 526-532 of the 17 th Conf. on Radar Meteorology, Seattle. AMS, Boston.
- 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.
- GEORGAKAKOS, K.P. AND BRAS, R.L., 1984a. A hydrologically useful station precipitation model I. Formulation. **Water Resour. Res.**, 20, 1585-1596.
- GEORGAKAKOS, K.P. AND BRAS, R.L., 1984b. A hydrologically useful station precipitation model 2. Case studies. **Water Resour. Res.**, 20: 1597-1610.
- GERMANN, U., I. ZAWADZKI. 2002: Scale-Dependence of the Predictability of Precipitation from Continental Radar Images. Part I: Description of the Methodology.: **Mon. Wea. Rev.**, 130, 2859–2873.
- HANDWERKER, JAN, 2002: Cell tracking with TRACE3D – a new algorithm. **Atmospheric Research**, 61, 15-34.
- HOUZE, 1993. Cloud dynamics. Academic Press, 573 pp.
- ISHIZAKI, K. ET ALII - A study on short – term rainfall prediction by radar raingauge. In: IAHS. Proceedings of the Baltimore Symposium, 1989 (181).
- JACQUET, G., EINFALT., DENOEU, T., ANDRIEU, H., PIRCHER. V. and DAVID, P., 1986. Principe d' evaluation des methods de mesure et de prevision de pluie par radar en hidrologie urbaine. Conf 'Eau et Informatique', ENPC, Paris, 28-30 May, 1986, PP. 67-75.
- JOHNSON, E.R. and BRAS, R.L., 1980. Multivariate short-term rainfall prediction. **Water Resour. Res.**, 16, 173-185.
- JOHNSON, J.T., PAMELA L. MACKEN, ARTHUR WITT, E. DEWAYNE MITCHELL, GREGORY J. STUMP, MICHAEL D. EILTS AND KEVIN W. THOMAS, 1998: The Storm Cell Identification and Tracking Algorithm: An Enhanced WSR-88D Algorithm. **Wea. Forecasting**, 13, 263-276.
- KEENAN T, JOE P, WILSON J, COLLIER C, GOLDING B, BURGESS D, MAY P, PIERCE C, BALLY J, CROOK A, SEED A, SILLS D, BERRY L, POTTS R, BELL I, FOX N, EBERT E, EILTS M, O' LAUGHLIN K, WEBB R, CARBONE R, BROWNING K, ROBERTS R, MUELLER C. 2003. The Sydney 2000 World Weather Research

Programme Forecast Demonstration Project: Overview and current status. **Bulletin of the American Meteorological Society** 84: 1041-1054.

LIGDA MG. 1954. **The horizontal motion of small precipitation areas as observed by radar**. Technical Report 21, Department of Meteorology, M.I.T., Cambridge Massachusetts, 60 pp.

MUELLER, C., T. SAXEN, R. ROBERTS, J. WILSON, T. BETANCOURT, S. DETTLING, N. OIEN and J. LEE, 2003: NCAR Auto-nowcasting system, **Wea Forecasting**, 18, 545-561.

NOVÁK P. 2007: The Czech Hydrometeorological Institute's Severe Storm Nowcasting System. **Atmos. Res.**, 83,450-457.

PEREIRA FILHO, A. J., 1989: **Uso do radar meteorológico para previsão de chuva a curto-prazo aplicado a previsão hidrológica em bacias urbanizadas**. Tese de mestrado, Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, IAG/USP, 150 pp.

PEREIRA FILHO, A. J.; BARROS, 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. and STENSRUD, D. J., 1999: Mesoscale precipitation fields: part II: hydrometeorologic modeling, **Journal of Applied Meteorology**, Vol. 38(1), 101-125.

PEREIRA FILHO, A. J. Chuvas de verão e as enchentes na Grande São Paulo: El Niño, Brisa Marítima e Ilha de Calor. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA**, 11, 2000, Rio de Janeiro.

PEREIRA FILHO, A. J., 2002: The positive definite and the third-order upstream schemes applied to 2D frontogenesis problem: intercomparison and optimization. 2° Simpósio Brasileiro de Modelagem Atmosférica do XII Congresso Brasileiro de Meteorologia Foz do Iguaçu, PR.

PEREIRA FILHO, A. J., BARROS, M. T. L., HALLAK, R. E GANDU, A. W., 2004: Enchentes na Região Metropolitana de São Paulo: aspectos de mesoescala e avaliação de impactos. XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Fortaleza.

PEREIRA FILHO, A. J., MASSAMBANI, O., HALLAK, R. and KARAM, H., 2005: A hydrometeorological forecast system for the Metropolitan Area of São Paulo. WWRP Workshop on Nowcasting and Very Short Term Forecasting. Toulouse, France.

PEREIRA FILHO, A.J. and SANTOS DA SILVA, F. D. 2005: The morphology of tropical rainfall systems and their hydrological significance. 32nd Conference on Radar Meteorology, Albuquerque, NM. Paper P13R. 10.

PIERCE CE, COLLIER CG, HARDAKER PJ, HAGGET CM. 2000. GANDOLF: A system for generating automated nowcasts of convective precipitation. *Meteorological Applications* 8:341-360.

PISANI, A., 1995, **Avaliação dos Dados do Radar Meteorológico de São Paulo para Aplicação em Hidrologia**, Tese de Doutorado, Dep. de Engenharia Hidráulica /Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SÁLEK M., BREZKOVÁ L., NOVÁK P., 2006: The use of radar in hydrological modelling in the Czech Republic – case studies of flash floods. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, 6, 229-236.

SANTOS DA SILVA, F.D 2006. **Análise Objetiva estatística da precipitação estimada com radar e medida por uma rede telemétrica**. Dissertação de mestrado, Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, IAG/USP, 101 pp.

SAUVAGEOT, H. (1982) – Radar meteorology, télédétection active de l'atmosphère. Editions Eyrolles et. CNET, ENST, Paris.

SMITH, JAMES A., MARY LYNN BAECK, YU ZHANG, and CHARLES A. DOSWELL III, 2001: Extreme Rainfall and Flooding from Supercell Thunderstorms. **J. Hydromet.**, 2, 469-489.

SMOLARKIEWICZ, P.K., 1982: The multidimensional Crowley advection scheme. **Mon. Wea. Rev.**, 11, 1968-1983.

SOKOL, Z., 2008: Nowcasting of precipitation by an advective statistical model ERAD 2008, The Fifth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (2008) ISBN 978-951-697-676-4, CD.

TAKACS, L. L., 1985: A two-step scheme for the advection equation with minimized dissipation and dispersion errors. **Mon. Wea. Rev.**, 113, 1050–1065.

TREMBACK, C. J., POWELL, J., COTTON, W. R. AND PIELKE, R. A., 1987: The forward-in-time upstream advection scheme: extension to higher orders. **Mon. Wea. Rev.**, 115, 540-555.

TSONIS and AUSTIN, 1981. A.A. TSONIS and G.L. AUSTIN. An evaluation of extrapolation techniques for the short-term prediction of rain amounts. **Atmos.- Ocean** 19 (1981), pp. 54–65.

TURNER, B., ZAWADZKI, I. AND GERMANN, U., 2004: Scale dependence of predictability of precipitation from continental radar images. Part 3: Operational implementation. **J. of Appl. Meteorology**, 43, 231– 248.

WALTON, M., E. Johnson, 1986: An improved precipitation projection procedure for the NEXRAD Flash-Flood Potential system. Preprints, 23rd Conf. Radar Meteorology, **Amer. Meteor. Soc.**, JP62-JP65.

WILKS, D.S. (1995) *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences: An Introduction*. Academic Press, 467 pp.

WOLFSON, M.M., B.E. FORMAN, R.G. HALLOWELL, and M.P. MOORE, 1999: The Growth and Decay Storm Tracker. Preprints, Eighth Conf. on Aviation, Range and Aerospace Meteorology, Dallas, TX, **Amer. Meteor. Soc.**, 58-62.

WILSON, J. W., CROOK, N. A., MUELLER, C. K., SUN, J., AND DIXON, M.: Nowcasting Thunderstorms: A Status Report, Bull. **Amer. Meteorol. Soc.**, 79, 2079–2099, 1998.

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](#)