

1 – Introdução

O Vale do Paraíba se situa entre as Serras do Mar e da Mantiqueira e o litoral, abrangendo o extremo leste do Estado de São Paulo e parte do Estado do Rio de Janeiro. Na região paulista, estão as cidades de Aparecida, Arapeí, Areias, Bananal, Caçapava, Cachoeira Paulista, Campos do Jordão, Canas, Caraguatatuba, Cruzeiro, Cunha, Guaratinguetá, Guararema, Igaratá, Ilhabela, Jacareí, Jambuí, Lagoinha, Lavrinhas, Lorena, Monteiro Lobato, Natividade da Serra, Paraibuna, Pindamonhangaba, Piquete, Potim, Queluz, Redenção da Serra, Roseira, Salesópolis, Santa Branca, Santa Isabel, Santo Antônio do Pinhal, São Bento do Sapucaí, São José do Barreiro, São José dos Campos (a maior cidade da região), São Luís do Paraitinga, São Sebastião, Silveiras, Taubaté, Tremembé e Ubatuba. A posição geográfica do vale, combinada com as ilhas de calor urbano, contribui para a formação de células de convecção nos meses quentes do ano, que podem ou não estar associadas a sistemas sinóticos. Com a urbanização e mudança da cobertura vegetal, o vale tem passado por mudanças climáticas ao longo dos últimos anos (Zani dos Santos, 2000). As estruturas urbanas de São José dos Campos acentuaram o calor, que as áreas de mata compensavam. Pretende-se, com este projeto, estudar o comportamento da brisa marítima, afetada pelo ciclo diurno de temperatura, e sua interação com a brisa vale-montanha, de vez que ambos os sistemas são muito importantes na região. A brisa marítima é um tópico de grande interesse, por sua interferência em ambientes urbanos próximos à costa, tanto em termos climatológicos como na formação de tempestades e difusão de poluentes.

1.1 – Motivação e objetivos

Há poucos estudos específicos para esta região sobre fenômenos de meso-escala, como é o caso da brisa marítima. A hipótese de partida foi que, no dia escolhido para o estudo, típico de verão, a penetração da brisa foi o principal indutor das tempestades que ocorreram na região do vale. Na ausência de um sistema sinótico (frente fria), a idéia foi comparar as imagens de radar e satélite com as imagens geradas por simulação

numérica, para detectar a possível relação entre a formação de tempestade e a entrada da brisa.

De modo geral, para que se forme a tempestade é necessário algum mecanismo dinâmico que eleve o ar próximo à superfície para níveis mais altos; correntes ascendentes dão origem às tempestades (Hallak, 2007). Existe uma grande variedade de mecanismos de disparo da convecção inicial. Este projeto visa caracterizar, em especial, a brisa marítima.

É de grande interesse, para as previsões de tempo de curto e médio prazo, definir a ação das circulações de meso-escala. A região da bacia do rio Paraíba do Sul é de grande importância sócio-econômica, com uma população estimada de 3,3 milhões de habitantes. Trata-se de uma região com indústrias, adensamento urbano considerável, e também um dos pólos da agropecuária do Estado.

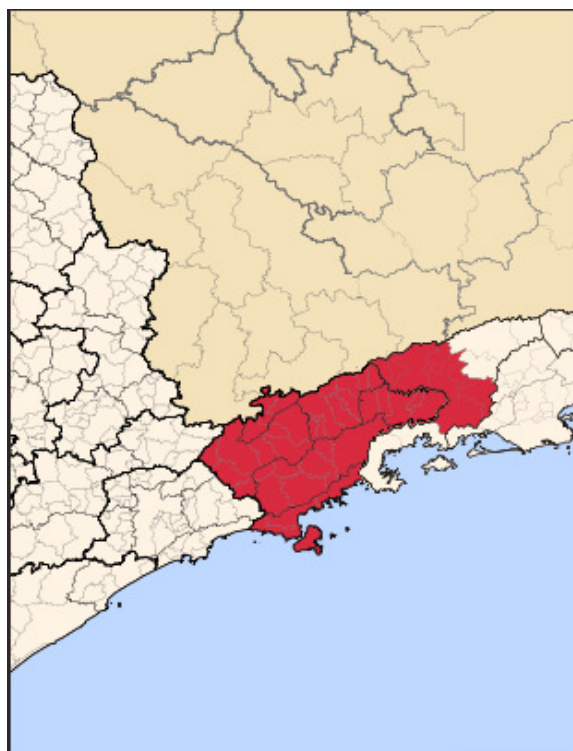


Figura 1.1 – Mapa geopolítico da região do vale.



Figura 1.2 – Localização do Vale do Paraíba.

Um modelo numérico da atmosfera pode ser usado para avaliar o comportamento físico da atmosfera numa escala temporal-espacial pré-determinada (Hallak, 2007). Com isso, consegue-se um conjunto de dados consistente para analisar a evolução da atmosfera.

Os objetivos específicos do projeto são:

I – Simular, usando o BRAMS (Brazilian Regional Atmospheric Modelling System), as condições atmosféricas para o dia 21 de fevereiro de 2008, escolhido para estudo de caso, por ter sido um dia com muita precipitação na região, não causada por frente fria;

II – Avaliar a resposta do modelo, comparando os arquivos gerados com imagens de radar e satélite guardadas desse dia;

III – Verificar a hipótese inicial.

2 – Desenvolvimento

2.1 Fundamentação teórica

A brisa marítima sopra em direção ao continente, ao longo da costa, nos dias de tempo quente. Ela é causada pela diferença entre a temperatura do ar sobre a terra e

sobre o oceano. A condutividade térmica da água e do solo são pequenas, mas o calor específico da água é aproximadamente três vezes maior que o do solo. Significa que o solo responde com uma temperatura mais alta a uma igual quantidade de energia incidente num mesmo intervalo de tempo (Innocentini, 1981). No solo, o ciclo diurno de temperatura é pouco sentido a partir de um metro de profundidade. Já na água, a turbulência distribui o calor verticalmente até 100 m de profundidade. Com isso, a temperatura do oceano pouco varia em 24 horas, enquanto o solo tem uma grande amplitude. Assim, o ar quente sobre o continente se eleva, enquanto o ar frio que está sobre o mar vem ocupar seu lugar, como visto abaixo:

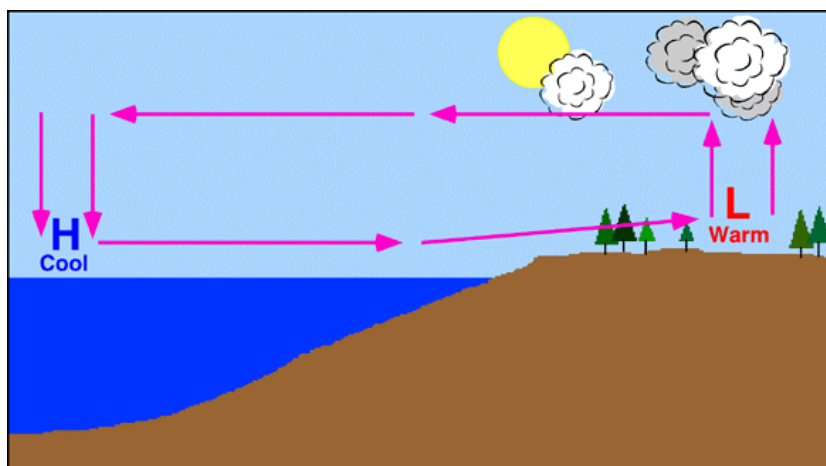


Figura 2. 1 – Esquema da brisa marítima.

A brisa marítima é um fenômeno de meso-escala, ou seja, caracteriza-se por uma escala temporal de até 24 horas, e espacial entre 10 km e algumas centenas de quilômetros.

Em geral, a brisa marítima se estabelece pela manhã, e como o maior contraste entre a temperatura da terra e a da água ocorre no meio da tarde, a brisa marítima costuma ser mais intensa nesse horário. Como o vale está no limite entre o clima tropical e o subtropical, o efeito da brisa é mais significativo nos meses de primavera e verão.

Quando há um grande contraste da temperatura do ar no limite da frente de brisa, o ar quente, mais leve, sobe e converge. Se houver umidade suficiente, uma linha de nuvens

cumulus se forma ao longo da frente de brisa, e, se o ar também estiver numa condição instável (e no verão ele geralmente está), formar-se-ão tempestades (Ahrens, 2003).

O ar marinho, denso e estável, carrega umidade para o continente. Quando se defronta com obstáculos, como uma fileira de montanhas, o ar pesado tende mais a se espalhar do que a subir. Com isso, ocorre a zona de convergência da brisa marítima (Simpson, 1994). O Vale do Paraíba, como dito, está encravado entre duas serras, a da Mantiqueira, ao norte, e a do Mar, ao sul. A região se caracteriza por uma ilha de sombra de chuva, com pluviosidade muito inferior à das áreas vizinhas, especialmente entre São José dos Campos e Taubaté. A precipitação anual fica entre 1.100 e 1.800 mm (Sant'Anna Neto, 1995). Isso ocorre pela ação da circulação vale-montanha. O ar no vale, ao ser aquecido, eleva-se e forma uma zona de convergência. Especialmente na Serra do Mar, privilegiada com o ar ascendente úmido do oceano, a taxa pluviométrica é elevada.

À noite, com o resfriamento, o ar mais frio e denso das montanhas desce em direção ao vale. Isso sugere que a brisa marítima, conseguindo passar a barreira da Serra do Mar, estimula a formação de nuvens de chuva na região. A brisa vale-montanha, por sua vez, a inibe.

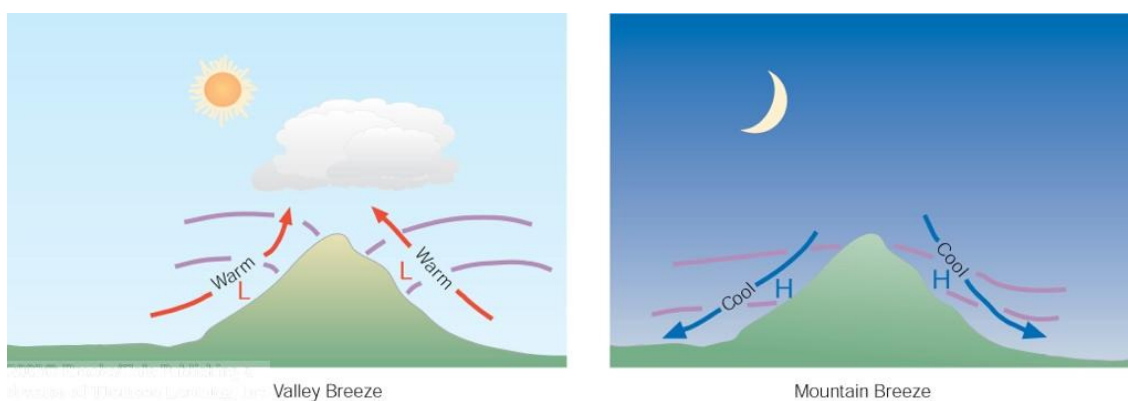


Figura 2.2 – Esquema da circulação vale-montanha

Fonte: Ahrens (2003).

As frentes de brisa marítima formam linhas de convergência, que são um dos vários mecanismos de disparo de tempestades (Hallak, 2007).

3 – Dados e metodologia

Para visualização da cobertura de nuvens de tempestade (cumulonimbus) no Estado de São Paulo, no dia do estudo de caso, foram coletadas e analisadas as imagens do satélite geoestacionário GOES-12. Essas imagens são disponibilizadas pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) e coletadas no laboratório MASTER do DCA/IAG/USP. Foram usadas imagens de infravermelho por sua melhor visualização. Para medida de precipitação no solo, são utilizadas as imagens do radar meteorológicos de São Paulo, coletadas e gentilmente cedidas pelo Laboratório de Hidrometeorologia do IAG.

A simulação numérica é feita com o sistema BRAMS, para cujas condições iniciais e de contorno foram usadas as análises do modelo de circulação global GFS, geradas pelo CPTEC, disponíveis a cada seis horas. Contêm os campos de componente zonal ($m s^{-1}$), meridional ($m s^{-1}$) e vertical do vento ($Pa s^{-1}$), umidade relativa (%) e pressão atmosférica ao nível do mar, em hPa, além de outras variáveis atmosféricas derivadas.

Os resultados finais foram visualizados com o software gráfico GrADS (The Grid Analysis and Display System).

3.1 – Imagens GOES-12 no canal infravermelho

As imagens do satélite GOES-12 são obtidas por meio de sensores que medem a radiação de ondas longas emitidas pelas nuvens e por superfícies continentais e oceânicas (Oliveira et al., 2001). A quantidade de radiação infravermelha detectada é diretamente proporcional à temperatura da superfície observada. Nuvens de topos frios têm tonalidade branca e, nuvens baixas, cinza escura.

Essas imagens são tratadas no laboratório MASTER, que as disponibiliza em tons coloridos segundo a temperatura de cada pixel de imagem.

4 – O modelo numérico

Os modelos numéricos permitem simular várias situações climáticas a partir de modificações nas condições da superfície e da constituição atmosférica. Inicialmente, insere-se no modelo campos globais reais para várias camadas da atmosfera. Esses campos se originam das observações meteorológicas, e são as condições iniciais do modelo. As equações geram os campos atmosféricos para um intervalo de tempo definido, que pode ser de horas ou dias. Esses campos, então, são chamados de prognósticos. Um meteorologista pode usar esses prognósticos para fazer previsão de tempo, ou um climatólogo pode usá-los para fazer estudos de simulação climática ou de variabilidade do clima. Entre os prognósticos há, por exemplo, os campos de temperatura, vento, pressão à superfície e umidade do ar. Soluções matemáticas específicas (parametrizações) geram outros campos, como a precipitação.

Para este projeto, foram estudados os dados gerados para componente zonal e meridional do vento (m s^{-1}), temperatura do ar próximo à superfície ($^{\circ}\text{C}$) e taxa de precipitação de chuva no solo (mm/hora).

4.1 – Aninhamento das grades e descrição da simulação

O experimento numérico foi feito usando-se três grades, concêntricas na região do vale. Suas resoluções eram de 64 km, 16 km e 4 km. Esta última ficou por demais restrita, de modo que optou-se, para este caso, pela grade de 16 km, que permite visualizar todo o vale.

No BRAMS é possível realizar inicialização homogênea e heterogênea. Na homogênea, considera-se que uma única sondagem é válida em todo o domínio no instante inicial, de forma que este seja homogêneo na horizontal (Camargo, 1998). Já a inicialização heterogênea refere-se ao fornecimento de informações sobre o estado da atmosfera através do uso de análises meteorológicas de modelos de larga-escala, ou de escala global. Neste projeto fizemos a inicialização heterogênea, com as análises do GFS, entradas a cada seis horas. Assim, as análises são assimiladas a intervalos de

tempo regulares, de modo que o modelo sempre disponha das imposições das escalas maiores.

Parte do projeto consistiu no treinamento para operar o sistema BRAMS. Para rodá-lo, é preciso criar inicialmente as condições de cobertura do solo – floresta, gelo, cidade, oceano, etc. Para isso, faz-se primeiro uma rodada do tipo MAKESFC (“Make Surface”), indicada no arquivo RAMSIN. Isso cria os arquivos de vegetação, topografia e temperatura da superfície do mar. Depois, faz-se a rodada do tipo INITIAL. Esta, que é a simulação propriamente dita, de 24 horas no caso em estudo, leva algumas horas para ser completada. Isso porque a máquina precisa fazer uma interpolação dos dados globais para a grade definida, de modo a gerar as variáveis para os pontos dentro da grade.

No arquivo RAMSIN são feitas todas as inicializações: define-se o instante inicial da rodada, que intervalo ela abrange, qual a resolução da grade maior, sua localização em latitude e longitude, e o endereço dos arquivos de entrada para a inicialização heterogênea. A idéia é usar o modelo de grande escala, o GFS, para alimentar os dados na fronteira da grade menor, de maior resolução, e assim por diante, até a última grade. Esse processo é chamado de ISAN (Análise Isentrópica).

5 - Resultados

Nesta seção são apresentadas as análises das medições meteorológicas disponíveis e das simulações numéricas. Inicialmente, para estudar o que ocorre no vale, estão as imagens de satélite. Foram selecionadas as imagens do início da manhã até às 21 horas (fuso local), pois este é o período máximo em que a brisa marítima costuma ocorrer. Além disso, a simulação compreende o período de 24 horas entre as 0000 UTC de 21 de fevereiro (isto é, 21 h do fuso de São Paulo em 20 de fevereiro) e 0000 UTC do dia 22 (21 h local do dia 21).

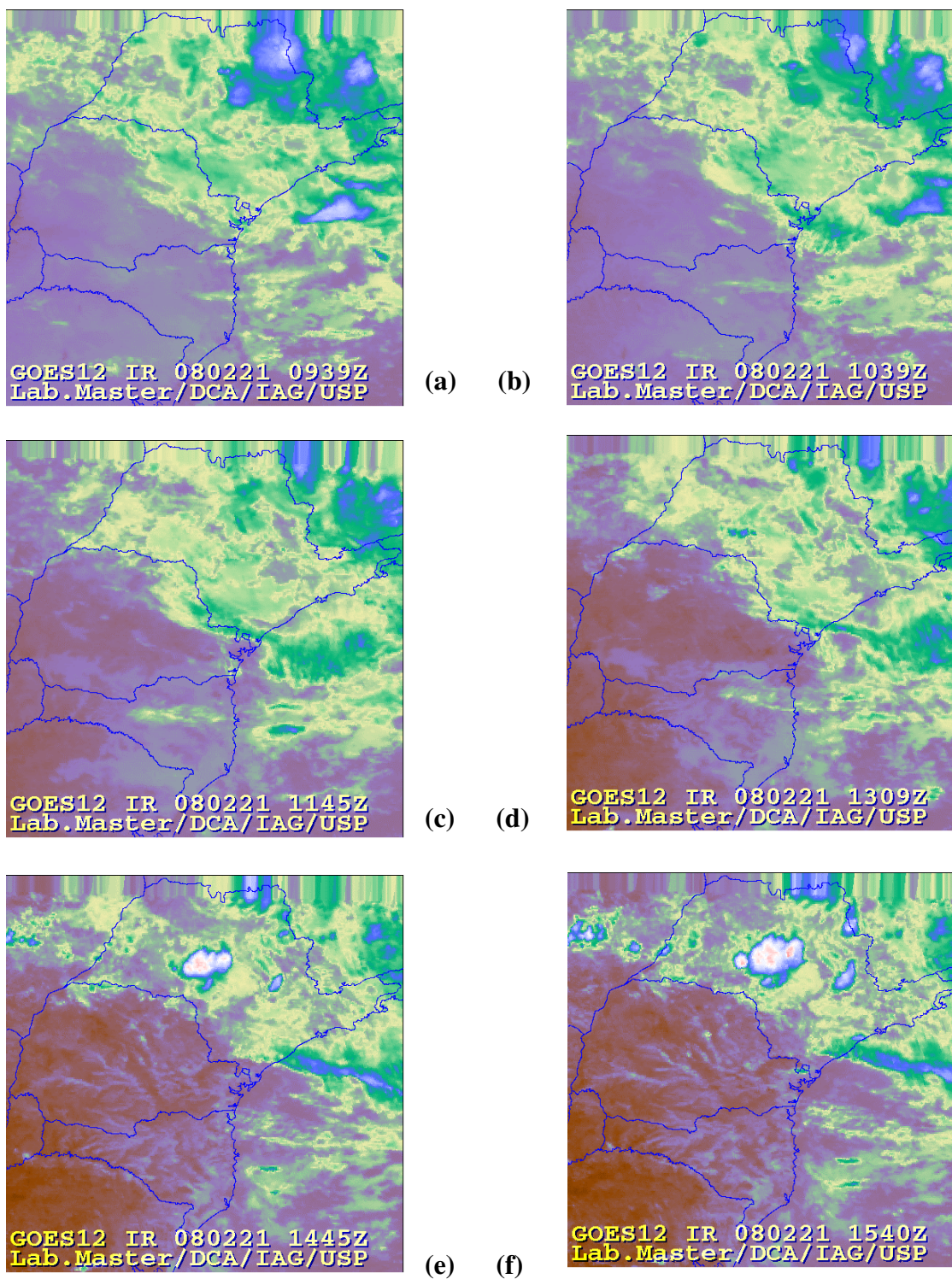


Figura 5.1 – Imagens do satélite GOES-12 no canal infravermelho para 21 de fevereiro de 2008 às (a) 0939 UTC, (b) 1039 UTC, (c) 1145 UTC, (d) 1309 UTC, (e) 1445 UTC e (f) 1540 UTC. (continua)

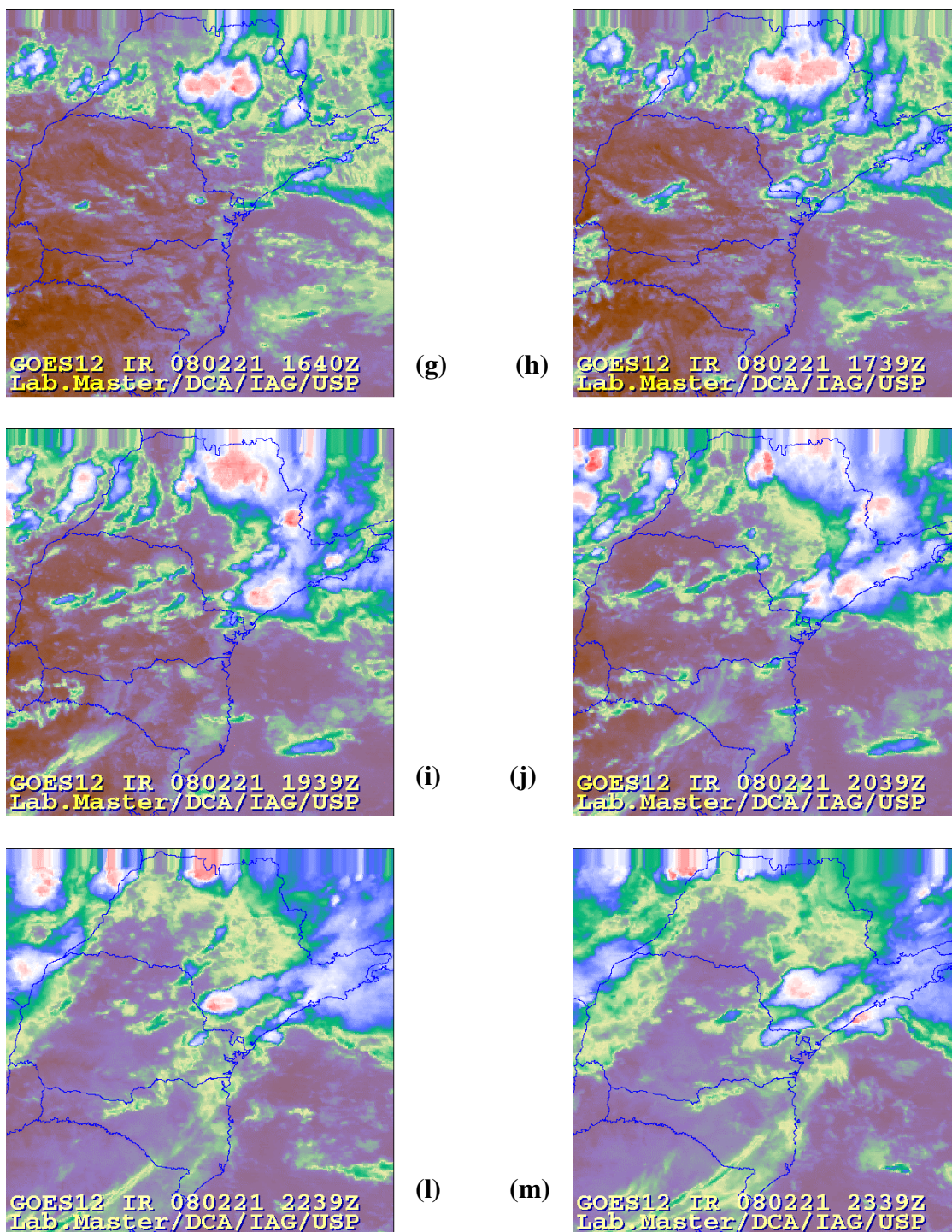


Figura 5.1 – Conclusão: imagens de satélite às (g) 1640 UTC, (h) 1739 UTC, (i) 1939 UTC, (j) 2039 UTC, (l) 2239 UTC e (m) 2339 UTC. Escala de cores indica temperatura. Cores claras estão associadas a topos de nuvens altas.

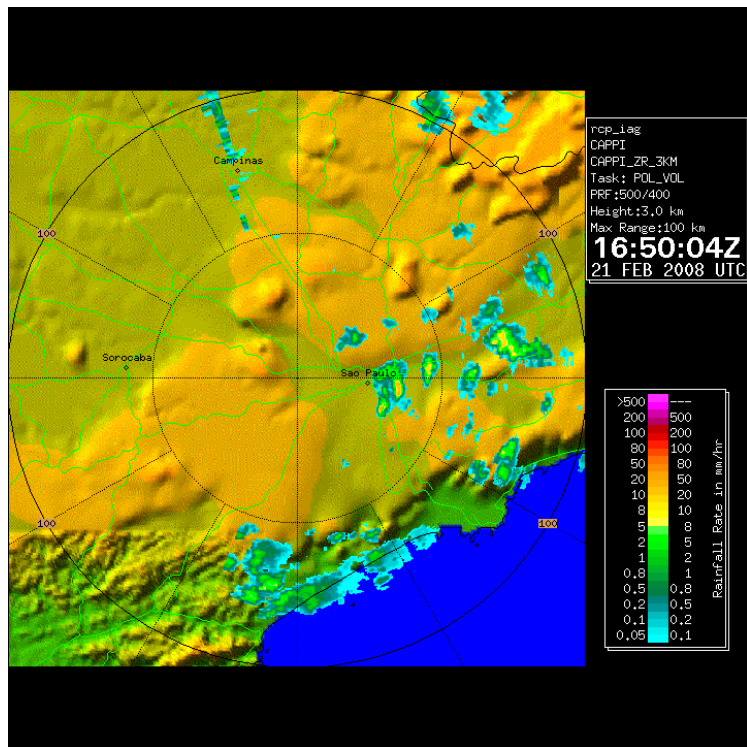
Pode-se observar que o dia 21 de fevereiro foi rico em tempestades. De manhã (Figura 5.1a-e) havia nebulosidade sobre todo o Estado, que, pelo espectro de temperatura, percebe-se serem os chamados cumulus de bom tempo. Nas primeiras horas do dia (Fig. 5.1a e 5.1b) nuvens densas cobriam parte da fronteira entre São Paulo e Minas Gerais, na região da Mantiqueira, tendo-se deslocado para leste depois (não mostrado). O aquecimento diurno fortaleceu a atividade convectiva no interior do Estado no meio da manhã (Figura 5.1e e 5.1f).

O início da convecção no vale foi próximo das 1640 UTC (Fig. 5.1g). Nota-se uma linha de instabilidade paralela à costa uma hora depois (Fig. 5.1h). Durante à tarde, as diversas células se agrupam por todo o leste do Estado (Fig. 5.1i e 5.1j). O máximo no vale ocorreu no fim da tarde (Fig. 5.1j). A dispersão tem início por volta das 2339 UTC (Fig. 5.1m).

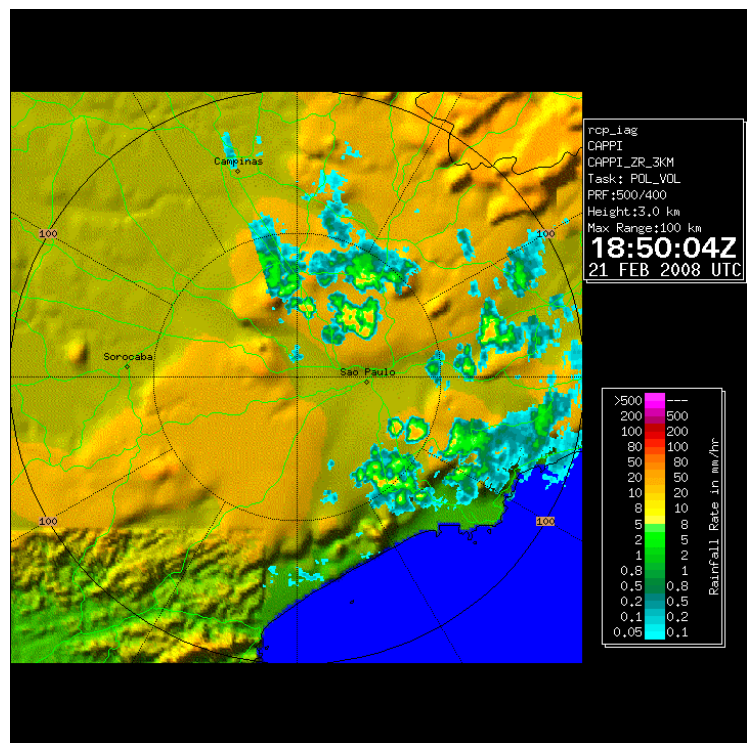
5. 1 – Análises das medições do radar meteorológico

Comparando as imagens geradas pelo radar, de precipitação no solo, com as imagens de satélite, podemos verificar onde e quando estava chovendo com maior precisão.

De fato, às 1650 UTC (Figura 5.2a) já se nota núcleos de precipitação no vale, inclusive sobre São José dos Campos. Eles se intensificam por volta de 1850 UTC (Fig. 5.2b). O máximo registrado no vale, em termos de área sofrendo precipitação, é consistente com as imagens do satélite, às 2055 UTC (Fig. 5.2c).



(a)



(b)

Figura 5.2 – Imagens de precipitação do radar meteorológico de São Paulo para (a) 1650 UTC, (b) 1850 UTC e (c) 2055 UTC. (continua)

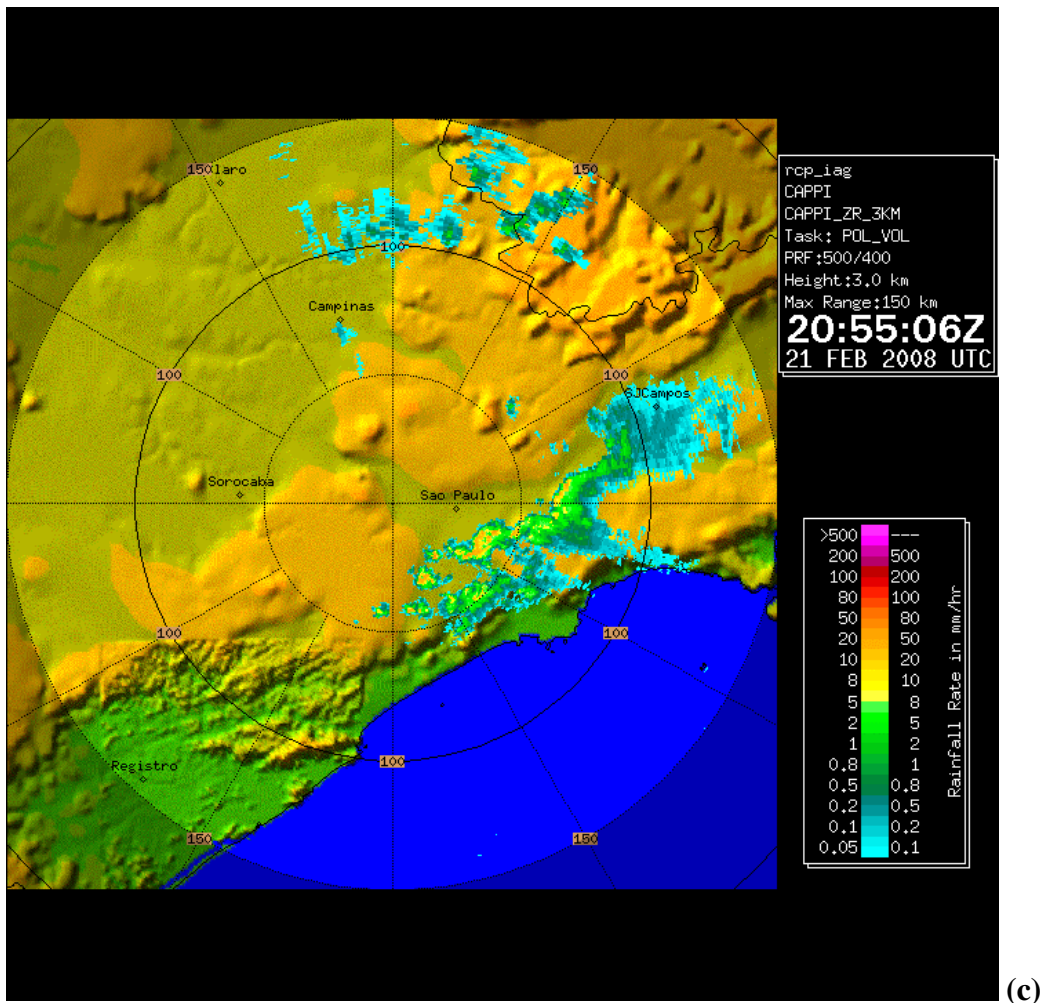


Figura 5.2 – Conclusão.

5. 2 – Simulação com o BRAMS

Apresenta-se a seguir os campos gerados para vento na região do vale, em diferentes horas do dia. Nota-se nitidamente o efeito da brisa marítima, mais intensa à tarde. Vê-se uma convergência, dos ventos da circulação vale, de um lado, e a brisa marítima, de outro, acompanhando a Serra do Mar. No meio da tarde (Figura 5.3b) os ventos se tornam mais intensos, e vemos a zona de convergência da brisa marítima. Por outro lado, os ventos marinhos que penetram no vale, de menor intensidade (menos de 2 m/s) interagem com ventos de oeste, que sopram do continente.

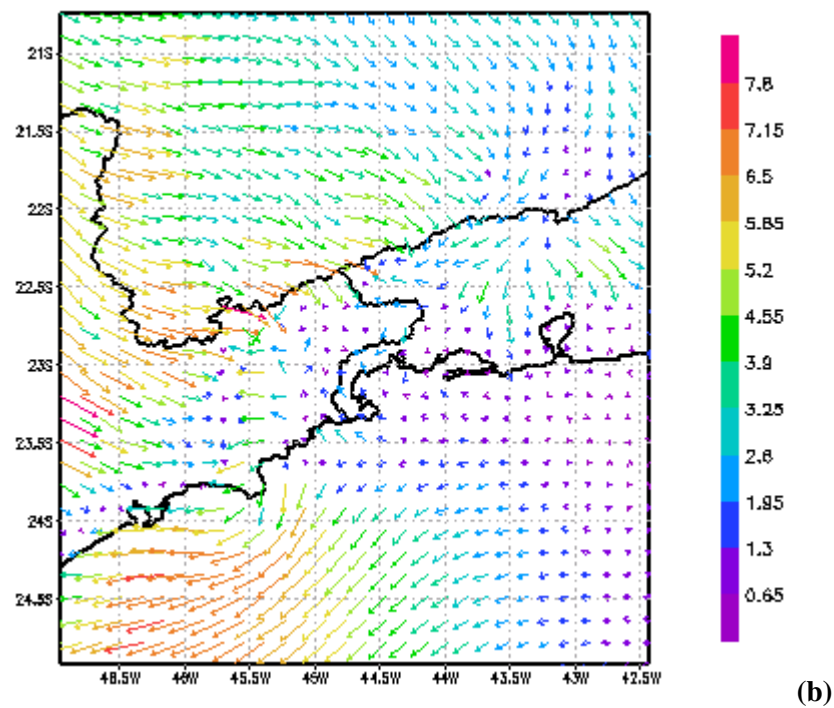
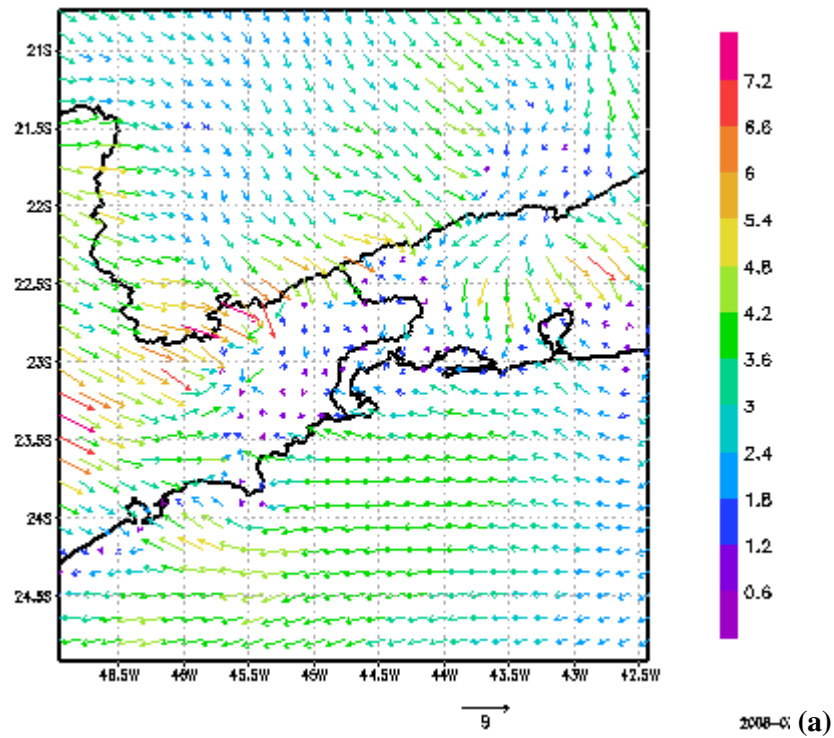


Figura 5.3 – Campos de vento gerados, em metros por segundo, para o dia 21 de fevereiro de 2008 às (a) 1300 UTC e (b) às 1800 UTC.

O modelo estava programado para gerar saídas para cada hora. A figura seguinte mostra o desenvolvimento da precipitação entre 1500 e 2300 UTC.

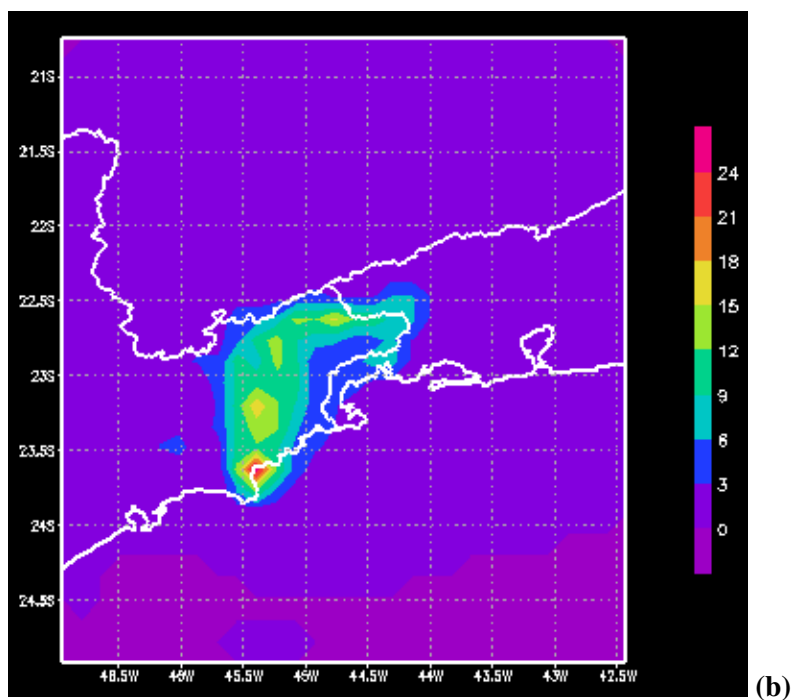
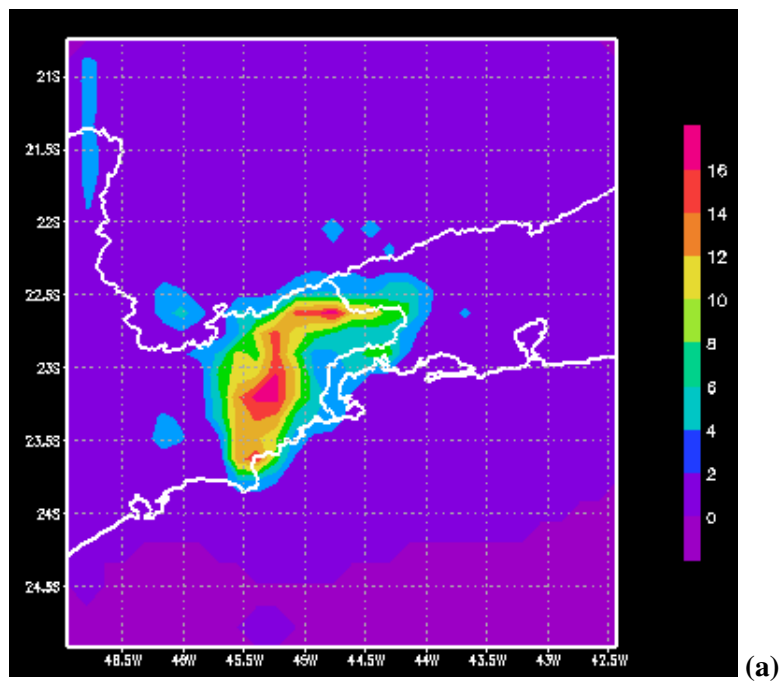


Figura 5.4 – Taxa de precipitação no solo, em mm por hora, às (a) 1500, (b) 1600, (c) 1700, (d) 1800, (e) 1900, (f) 2000, (g) 2100 (h) 2200 e (i) 2300. Horários em UTC. (continua)

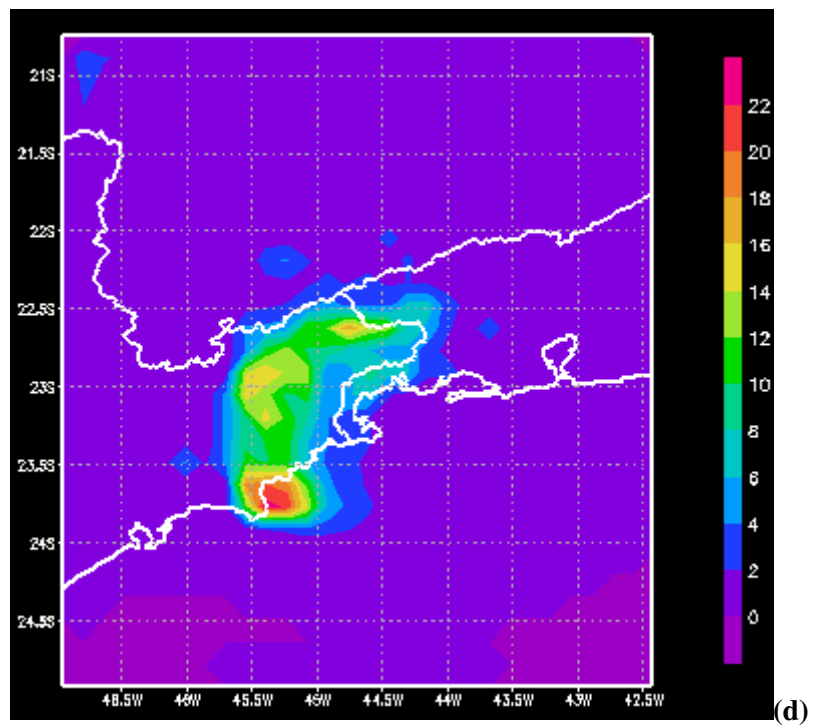
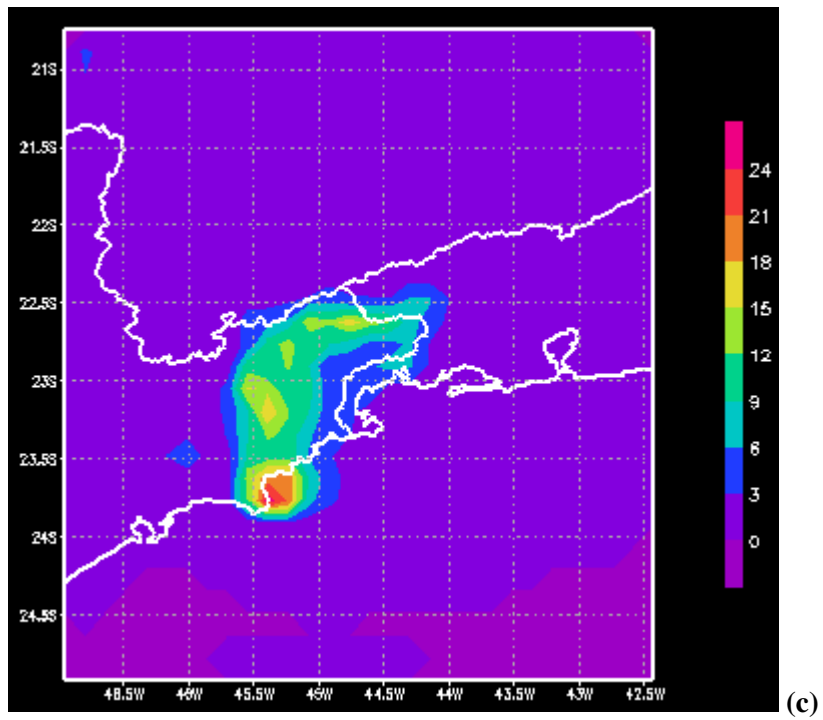


Figura 5. 4 – Continuação. (continua)

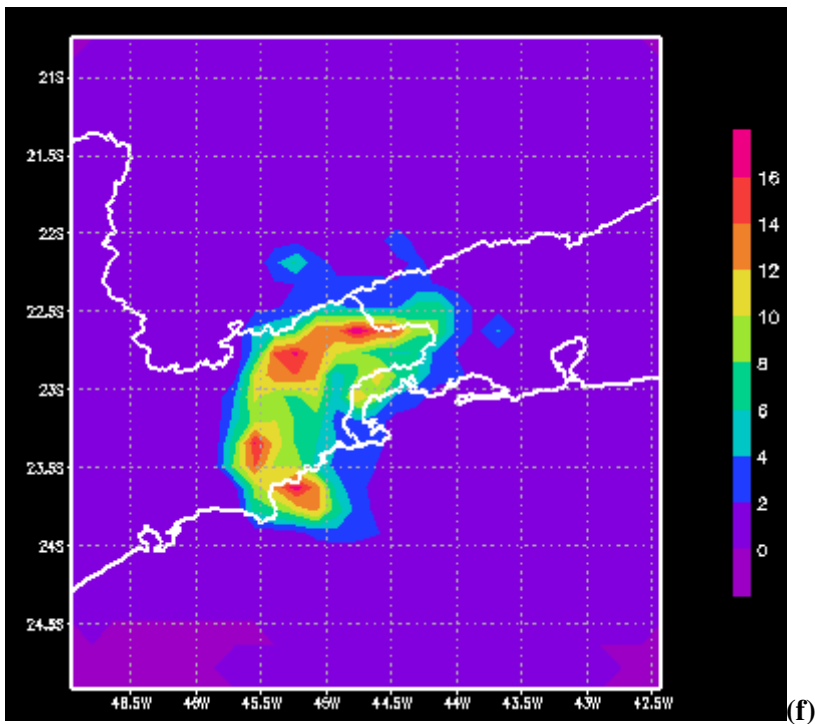
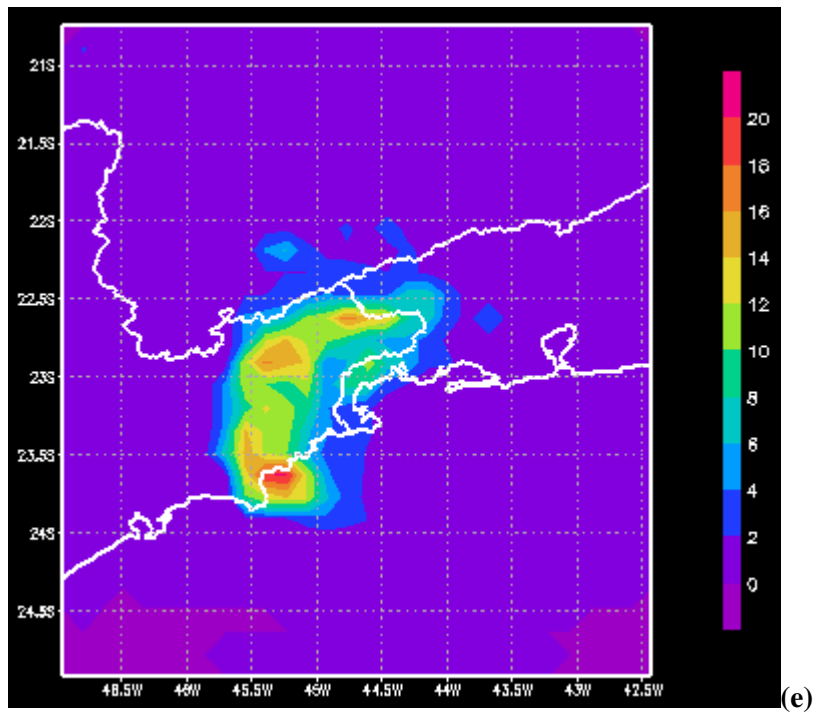


Figura 5.4 – Continuação. (continua)

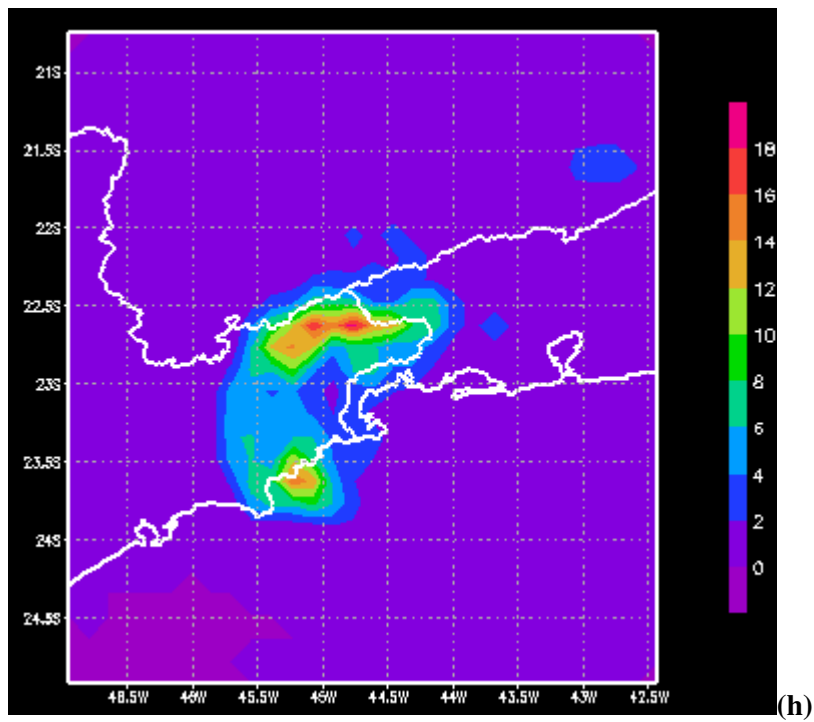
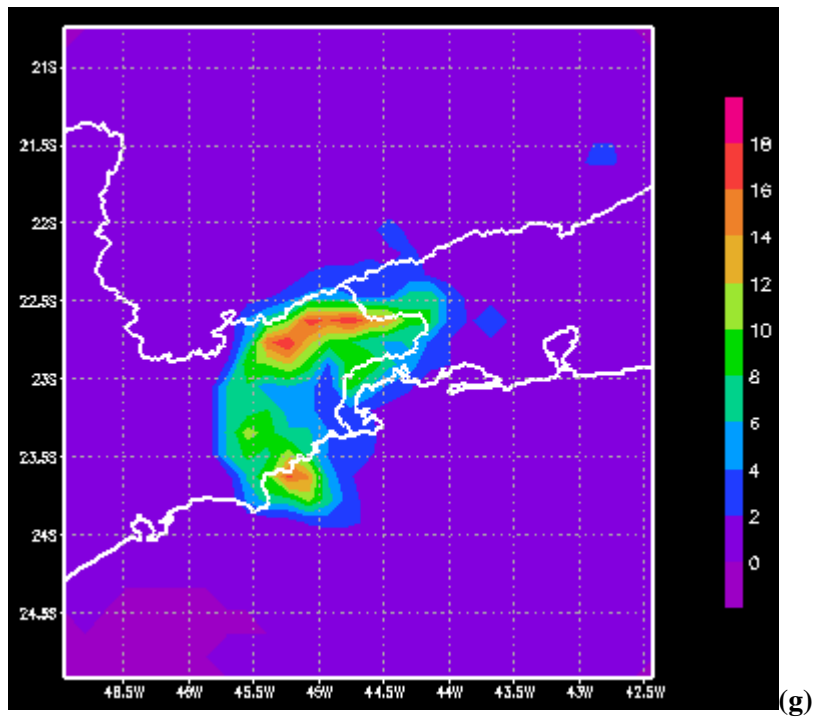


Figura 5. 4 – Continuação. (continua)

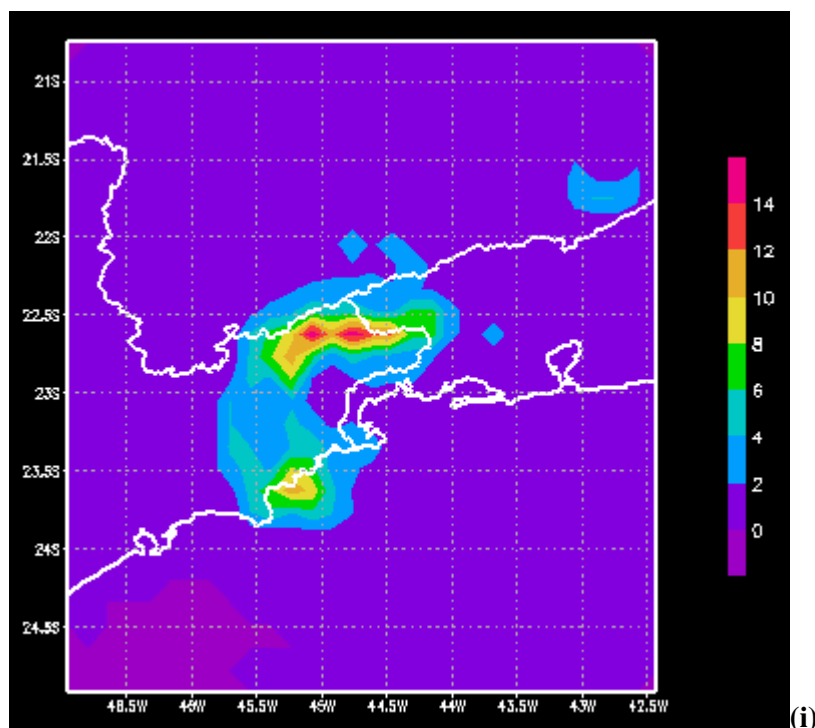


Figura 5. 4 – Conclusão.

As imagens geradas mostram um decréscimo da taxa de precipitação entre 1500 e 1600 UTC. Em seguida, os núcleos de precipitação vão se expandindo, até às 2100 UTC. A partir de então, começam a dispersar. O máximo de precipitação, em quantidade (entre 14 e 16 mm/hora) e área, ocorre às 2000 UTC, isto é, no fim da tarde.

O BRAMS realiza uma simplificação, que é manter a temperatura do oceano, que varia pouco ao longo de um dia, como campo constante durante determinado mês. O modelo usa para essa variável a média climatológica. Na prática, isso pouco afeta as outras variáveis calculadas, tais como a temperatura em baixos níveis. A Figura 5.5 mostra o perfil da temperatura, em graus Celsius, em dois horários distintos.

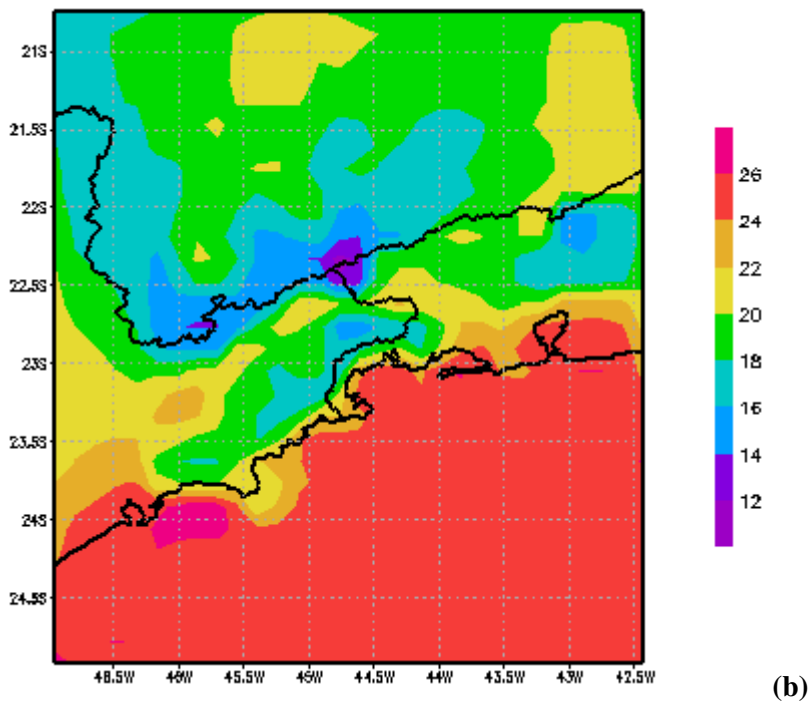
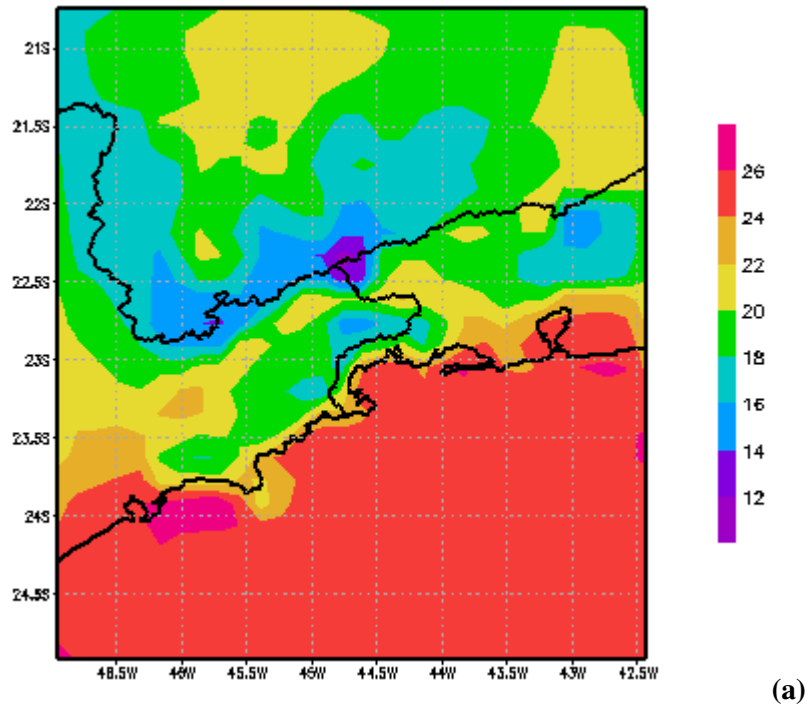


Figura 5.5 – Temperatura próximo à superfície (°C) para o dia 21 de fevereiro de 2008, às (a) 1600 UTC, (b) 1800 UTC e (c) 2000 UTC. (continua)

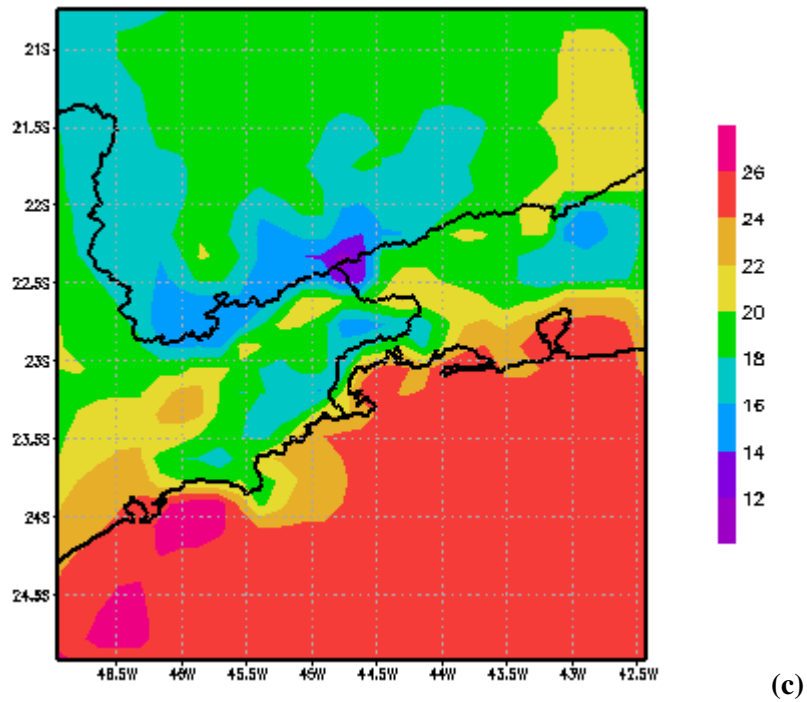


Figura 5.5 – Conclusão.

6 – Discussão dos resultados

Os dados de temperatura gerados pelo modelo, vistos na Figura 5.5, são consistentes com os ventos (Figura 5.3). A parte do vale que mais sofre a penetração da brisa marítima (em azul, Figura 5.5c) é mais fria à tarde do que ao meio-dia. Já a divisa entre São Paulo e Minas Gerais, região serrana, tem temperaturas mais amenas ao longo do dia, que pouco variam.

A chuva prevista pelo sistema (Figura 5.4) também foi coerente com os dados reais de satélite. A modelagem revelou uma tendência da convecção de se fortalecer no meio da tarde (15 h local), efeito típico do resfriamento e umidade que a brisa marítima traz. Depois da forte chuva, já ao anoitecer, a dissipação das nuvens ocorreu na direção do oceano, o que combina com a brisa terrestre, e para leste, o que combina com o efeito esperado da brisa montanha (Figura 5.4h e 5.4i). As imagens observacionais em infravermelho (Figura 5.1m) confirmam esse deslocamento ao sul, em direção ao mar, e para leste, em direção ao Rio de Janeiro.

7 – Conclusão e sugestão para trabalhos futuros

A premissa do projeto foi que a penetração da brisa marítima estaria associada à formação de tempestades no evento de 21 de fevereiro de 2008. Pela comparação dos dados gerados de chuva e de vento, a hipótese foi verificada. As imagens reais desse dia confirmam que a simulação do modelo foi satisfatória para o caso em estudo.

A zona de convergência da brisa marítima foi bem representada pelo modelo. A alta taxa de precipitação na região da Serra do Mar ocorre concomitante com a convergência da brisa marítima, de um lado, e da brisa-vale, de outro. A circulação vale-montanha é um mecanismo local de disparo de tempestades, mas, nesse dia, parece ter desempenhado papel menor do que a frente de brisa marítima.

Existem relações mais complexas de interação das brisas com sistemas sinóticos, tais como frentes frias e ciclones extratropicais. Seria preciso fazer estudos mais aprofundados, para intervalos de tempo maiores, e qualificar de que modo a brisa marítima atua nesses dias.

8 – Referências bibliográficas

AHRENS, C. D. **Meteorology today**. Chicago: Brooks/Cole, 2003. ISBN (0-534-39771-9).

CAMARGO, Ricardo de. **Estudo numérico das circulações atmosférica e oceânica na região da baía de Paranaguá**. São Paulo: IAG, 1998. 181 p. Tese de doutoramento.

CORREIA, M. F. **Impacto das ações antrópicas no clima do submédio do rio São Francisco: um estudo numérico e observacional**. São Paulo: IAG, 2001. 181p. Tese (Doutorado em Meteorologia).

FREITAS, E. D. **Circulações locais em São Paulo e sua influência sobre a dispersão de poluentes**. São Paulo: IAG, 2003. 156 p. Tese de doutorado.

HALLAK, Ricardo. **Simulações numéricas de tempestades severas na RMSP**. São Paulo: IAG, 2007. 194 p. Tese de doutorado.

INNOCENTINI, V. **Simulação numérica da brisa marítima: testes de sensibilidade e efeito de parametrizações de transportes turbulentos**. São Paulo: Departamento de Meteorologia (IAG), 1981. 80 p. Tese de mestrado.

OLIVEIRA, L. L.; VIANELLO, R. L.; FERREIRA, N. J. **Meteorologia fundamental**. Erechim: EdiFAPES, 2001. 423p.

SANT'ANNA NETO, J. L. As chuvas no estado de São Paulo: a variabilidade pluvial nos últimos 100 anos. In: Neto, J. L. S.; Zavatini, J. A. (orgs.) **Variabilidade e mudanças climáticas: implicações ambientais e socioeconômicas**. Maringá, Eduem, 2000, p. 95-119.

SANTOS, M. J. Zani dos. Mudanças climáticas e planejamento agrícola. In: Neto, J. L. S.; Zavatini, J. A. (orgs.) **Variabilidade e mudanças climáticas: implicações ambientais e socioeconômicas**. Maringá: Eduem, 2000, p.65-80.

SIMPSON, J. E. **Sea breeze and local winds**. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. 234p.