



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/05.06.20.10-TDI

SIMULAÇÃO EM ALTA RESOLUÇÃO DO CICLO DIURNO DA PRECIPITAÇÃO EM REGIÃO DE TOPOGRAFIA COMPLEXA

Silvia Manami Yaguchi

Dissertação de Mestrado do Curso
de Pós-Graduação em Meteorolo-
gia, orientada pela Dra. Chou Sin
Chan, aprovada em 10 de maio de
2013.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3E3T8MS>>

INPE
São José dos Campos
2013

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):

Presidente:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Luciana Manacero - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/05.06.20.10-TDI

SIMULAÇÃO EM ALTA RESOLUÇÃO DO CICLO DIURNO DA PRECIPITAÇÃO EM REGIÃO DE TOPOGRAFIA COMPLEXA

Silvia Manami Yaguchi

Dissertação de Mestrado do Curso
de Pós-Graduação em Meteorolo-
gia, orientada pela Dra. Chou Sin
Chan, aprovada em 10 de maio de
2013.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3E3T8MS>>

INPE
São José dos Campos
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Y1s Yaguchi, Silvia Manami.
Simulação em alta resolução do ciclo diurno da precipitação em região de topografia complexa / Silvia Manami Yaguchi. – São José dos Campos : INPE, 2013.
xxvi + 100 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2013/05.06.20.10-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

Orientadora : Dra. Chou Sin Chan.

1. modelagem atmosférica. 2. ciclo diurno. 3. precipitação.
I.Título.

CDU 551.509.313.4

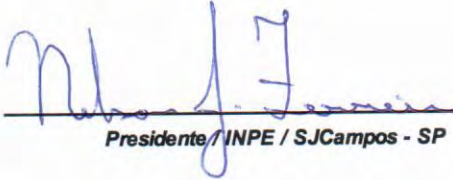


Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](#).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](#).

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
Metereologia

Dr. Nelson Jesuz Ferreira



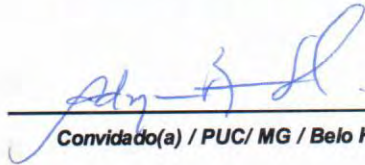
Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dra. Chou Sin Chan



Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dra. Adma Raia Silva



Convidado(a) / PUC/ MG / Belo Horizonte - MG

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

Aluno (a): **Silvia Manami Yaguchi**

São José dos Campos, 10 de Maio de 2013

“As maiores questões da vida não se resumem aos obstáculos, às adversidades ou mesmo às tempestades, mas se exponenciam nos meios em que você adquire coragem para moldar o sucesso através deles.”

Fernando Marques de Melo

A minha irmã Cecília Natsumi Yaguchi, in memoriam

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom e privilégio da vida.

Aos meus pais, Kimiko e Naoshi, pela força e apoio que me deram em todos os momentos da minha vida com amor, carinho, incentivo e por sempre acreditarem na minha capacidade de superar todas as barreiras da vida.

À Dra. Chou Sin Chan, pela orientação, paciência, ensinamentos e oportunidade para realização deste trabalho.

Ao Jorge Gomes, pela atenção, disponibilidade e boas sugestões que foram importantes para o desenvolvimento deste trabalho.

A uma pessoa maravilhosa, Erikson de Oliveira, pelo amor, carinho, paciência em todos os momentos.

Aos meus amigos de pós-graduação do INPE, em especial Aline Bilhalva, Anthony Carlos, Fernando Oliveira e Luciana Tessarolo, pela amizade, apoio e por compartilhar os momentos de luta, conquista e alegria durante toda a trajetória do mestrado.

Aos meus amigos de longa data, desde a graduação, especialmente Daniele Otsuki, Fabio Lekecinkas, João Rafael Dias, Luciana Prado e Simone Valarini, pela grande amizade, força e por dividir todos os bons momentos apesar da distância.

Aos meus amigos, alguns me acompanham de longe, Bianca Maske, Israel Borges, Jéssica Silva, Leonardo Paraíso, Mélory Mônia, Renan Barros e Rômulo Augusto, pela ajuda, apoio e amizade.

Aos colegas e amigos do Projeta, pelo companheirismo e auxílio. Em especial, ao Dragan Latinovic e a Gracielle Chagas pela amizade, força e apoio para me ajudar a superar as dificuldades durante o desenvolvimento do trabalho, e também pelo imenso carinho que tenho até hoje.

Às secretárias da Pós Graduação em Meteorologia (PGMET), Simone Umeno e Luana Schmidt, pela ajuda e pelo ótimo trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Associação dos Pesquisadores do Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (APLBA) pela concessão da bolsa de mestrado e pelo apoio financeiro, respectivamente.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) pela oportunidade da realização do curso de mestrado e disponibilização dos seus recursos computacionais para a execução do trabalho.

A Eletronuclear pela disponibilização dos dados meteorológicos das torres instaladas na Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA).

Ao Grupo de Previsão de tempo (GPT) pela ajuda e disponibilização dos seus produtos que foram importantes para realização do trabalho.

RESUMO

A região de Angra dos Reis, e a região da Serra do Mar como um todo, é caracterizada pela complexa topografia que favorece a formação e na intensificação de tempestades severas que causam altas taxas de precipitação. A proximidade com o mar adiciona grande quantidade de umidade aos sistemas precipitantes. A maioria dos modelos numéricos de previsão de tempo tem dificuldade em prever fenômenos meteorológicos de mesoescala a pequena escala acuradamente, em particular sistemas convectivos. Alguns modelos apresentam dificuldades na representação do ciclo diurno de precipitação, seja na quantidade seja no horário. Geralmente, em modelos de alta resolução, a precipitação pode ser toda gerada pelo esquema de microfísica de nuvens. O principal objetivo desse trabalho é avaliar o desempenho do modelo Eta em capturar o ciclo diurno da precipitação na região de Serra do Mar em Angra dos Reis, comparando com os dados de observação de estações próximas a região, a partir de testes com os esquemas de parametrização de convecção e de microfísica de nuvens, e de testes com a resolução horizontal. Os resultados mostraram que o aumento da resolução de 5 para 3 km indicou uma melhor representação do ciclo diurno de temperatura e de precipitação para todas as estações, onde a maior produção de chuva ocorreu no período da tarde, apesar da pouca quantidade prevista. O modelo mostrou também que as melhores representações de quantidade e distribuição de chuva foram obtidas pelas simulações com 60 níveis e sem a atuação de parametrização de convecção. Somente a atuação esquema explícito conseguiu captar a chuva com maior intensidade, porém, o modelo ainda teve dificuldade em prever as maiores taxas de precipitação de dias seguidos observadas durante o evento de Angra dos Reis. A presença das brisas que predomina sobre a região foi bem representada com o aumento da resolução espacial, porém, não foi significativo o suficiente para alcançar a magnitude do vento observada.

HIGH RESOLUTION SIMULATION OF DIURNAL CYCLE OF PRECIPITATION IN REGION OF COMPLEX TOPOGRAPHY

ABSTRACT

The Angra dos Reis and Serra do Mar regions are characterized by complex topography that further the formation and intensification of severe storms that induce high precipitation rates. The sea proximity adds high quantity of moisture to the precipitation systems. Most of numerical weather prediction models have difficulty in predicting small and mesoscale meteorological systems with accuracy, particularly convective systems. Some models have difficulties in representing the diurnal cycle of precipitation, either in quantity or in time. Generally, in high resolution models, the precipitation can be generated by the entire cloud microphysics scheme. The main objective is to evaluate the representation of Eta model to capture the diurnal cycle of precipitation in the Serra do Mar region and Angra dos Reis, comparing with observation data from meteorological stations near the area, with cloud microphysics and convection parameterization schemes and with horizontal resolution tests. The results show that increasing the resolution of 5 to 3 km indicated a better representation of the diurnal cycle of the temperature and precipitation for all stations, in which the highest production of rainfall occurred in the afternoon, although in a little quantity. The model also showed that the best representations of rainfall distribution were obtained by the simulations with 60 levels vertical resolution, and without the interaction of convective parameterization. Only with the explicit scheme, the rain was captured with higher intensity; however, the model still had difficulty in predicting the high rates of precipitation in consecutive days, which were observed during the Angra dos Reis event. The presence of the breeze which predominates over the region was well represented by spatial resolution increase; however, it was not significant enough to reach the magnitude of the observed wind.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 3.1 – Localização das torres meteorológicas: Torre A da CNAA (1); Estações de Cunha (2) e Santa Virgínia (3) da PCD.	12
Figura 3.2– Exemplos de estruturas verticais do modelo Eta, de 50 e 60 camadas.....	14
Figura 3.3 – Seção vertical idealizada da topografia do modelo Eta. Fonte: Black (1994).	15
Figura 3.4 – Domínio espacial das grades na resolução horizontal de 15 km (grade maior) e de 5 e 3 km (grade menor).	20
Figura 4.1 – Imagens de satélite do GOES-12 realçada no infravermelho da América do Sul (a) e setorizada (b) dos dias: 31/12/2009 às 21:00Z (esquerda), e 01/01/2010 às 00:00Z (centro) e 03:00Z (direita). (Fonte: CPTEC-INPE).....	26
Figura 4.2 – Cartas sinóticas do dia 31 de Dezembro de 2009 às 00Z, 12Z e 18Z, centradas na América do Sul em 250 hPa (a), com linhas de corrente de vento, destacando jatos de altos níveis, campos de pressão; 500 hPa (b), com linhas de corrente, campos de pressão; 850 hPa (c), com campos de pressão e espessura do geopotencial (Fonte: CPTEC-INPE).....	28
Figura 4.3 – Umidade específica do ar (g/kg) em 850 hPa nos dias 31 de Dezembro de 2009 às 12Z e 18Z, e 1 de Janeiro de 2010 às 00Z.....	30
Figura 4.4 – Umidade relativa do ar (%) em 850 hPa nos dias 31 de Dezembro de 2009 às 12Z e 18Z, e 1 de Janeiro de 2010 às 00Z.....	31
Figura 4.5 – Linha de corrente (m/s) e Divergência do vento ($10^{-5}/s$) em 250 hPa do dia 31 de Dezembro de 2009 às 12Z e 18Z, e 1 de Janeiro de 2010 às 00Z.....	33
Figura 4.6 – Omega (Pa/s) e vento em 850 hPa do dia 31 de Dezembro de 2009 às 12Z e 18Z, e 1 de Janeiro de 2010 às 00Z.....	35
Figura 4.7 – Imagens de radar do Pico do Couto desde o dia 31 de Dezembro de 2009 (00Z) até o dia 01 de Janeiro de 2010 (00Z) com frequência de 3 horas. (Fonte: REDEMET)	36

Figura 4.8 – Séries temporais de precipitação acumulada (mm/h) para os meses de (a) Dezembro de 2009 e (b) Janeiro de 2010 para estação de Angra dos Reis.	38
Figura 5.1 - Séries temporais da temperatura a 2 m previstas pelo Eta-5km (a) e Eta-3km (b), nos intervalos de 25-48h (azul) e 49-72h (vermelho) e observadas a 10 m (roxo) de Angra dos Reis no período de dia 20 de Dezembro 2009 até 02 de Janeiro de 2010.	41
Figura 5.2 – Ciclo diurno médio da temperatura em 2 metros (°C) das previsões de 25-48h e 49-72h com Eta-5 km e Eta-3km, e temperatura observada em 10 m observações obtidas pela estação de Angra dos Reis.	42
Figura 5.3 – Séries temporais de precipitação acumulada (mm/h) previstas com Eta-5km (a) e Eta-3km (b) e observadas em Angra dos Reis no período de dia 20 de Dezembro 2009 até 02 de Janeiro de 2010.	43
Figura 5.4 – Ciclo diurno médio da precipitação acumulada (mm/h) das previsões de 25-48h e 49-72h com Eta 5 e 3km, e observações obtidas pela estação de Angra dos Reis entre o período do dia 20 de Dezembro 2009 até 02 de Janeiro de 2010.	44
Figura 5.5 – Séries temporais de direção e intensidade do vento em 10 m do Eta-5km, com previsões de 25-48h (a) e 49-72h (b), e as observações em Angra dos Reis.	46
Figura 5.6 – Séries temporais de direção e intensidade do vento em 10 m do Eta-3km em 50 níveis verticais, com previsões de 25-48h (a) e 49-72h (b), e as observações em Angra dos Reis.	47
Figura 5.7 – Série temporal de temperatura em 2 m previstas pelo Eta-5km (a) e Eta-3km (b), nos intervalos de 25-48h (azul) e 49-72h (vermelho) de previsão e observação de temperatura em 2 m (roxo) de Cunha do dia 20 de Dezembro 2009 até 02 de Janeiro de 2010.	49
Figura 5.8 – Ciclo diurno médio da temperatura em 2 metros (°C) das previsões de 25-48h e 49-72h do Eta-5 km (a) e Eta-3 km (b), e observações obtidas pela estação da Cunha.....	50
Figura 5.9 – Séries temporais de precipitação acumulada (por hora) observadas e previstas com Eta-5km (a) e Eta-3km (b) do dia 20 de Dezembro 2009 até 02 de Janeiro de 2010 para Cunha...	51

- Figura 5.10 – Ciclo diurno médio da precipitação acumulada (mm/h) das previsões de 25-48h e 49-72h do Eta-5 km e Eta-3 km, e observações obtidas pela estação de Cunha..... 52
- Figura 5.11 – Séries temporais da temperatura em 2 m prevista, do Eta-5km (a) e Eta-3km (b), nos intervalos de 25-48h (azul) e 49-72h (vermelho) e observada (roxo) de Santa Virgínia do dia 20 de Dezembro 2009 até 02 de Janeiro de 2010. 54
- Figura 5.12 – Ciclo diurno médio da temperatura em 2 metros (°C) das previsões de 25-48h e 49-72h com Eta-5km (a) e Eta-3km (b), e das observações obtidas pela estação da Santa Virgínia..... 55
- Figura 5.13 – Séries temporais de precipitação observada e prevista da versão Eta-5km (a) e versão Eta-3km (b) no período de dia 20 de Dezembro 2009 até 02 de Janeiro de 2010 em Santa Virgínia. 56
- Figura 5.14 – Ciclo diurno médio da precipitação acumulada (mm/h) das previsões de 25-48h e 49-72h com Eta-5km e Eta-3km, e observações obtidas pela estação de Santa Virgínia..... 57
- Figura 5.15 – Séries temporais de precipitação acumulada (por hora) observada e prevista (25-48h e 49-72h) de resolução horizontal 3 km do experimento M2 do dia 20 de Dezembro 2009 até 02 de Janeiro de 2010 obtidas pela estação de Angra dos Reis. 59
- Figura 5.16 – Ciclo diurno médio da precipitação acumulada (mm/h) das previsões de 25-48h e 49-72h do modelo Eta, de resolução horizontal 3 km) do experimento M2, e observações obtidas pela estação de Angra dos Reis. 59
- Figura 5.17 – Séries temporais de precipitação acumulada (por hora) observada e prevista (25-48h e 49-72h) de resolução horizontal 3 km do experimento M2 do dia 20 de Dezembro 2009 até 02 de Janeiro de 2010 em Cunha. 61
- Figura 5.18 – Ciclo diurno médio da precipitação acumulada (mm/h) das previsões de 25-48h e 49-72h do modelo Eta, de resolução horizontal 3 km do experimento M2 e observações em Cunha... 61
- Figura 5.19 – Séries temporais de precipitação acumulada (por hora) observada e prevista (25-48h e 49-72h) de resolução horizontal 3 km do experimento M2 do dia 20 de Dezembro 2009 até 02 de Janeiro de 2010 em Santa Virgínia. 62
- Figura 5.20 – Ciclo diurno médio da precipitação acumulada (mm/h) das previsões de 25-48h e 49-72h do modelo Eta, de resolução

horizontal 3 km do experimento M2 e observações em Santa Virgínia.....	63
Figura 5.21 – Séries temporais de precipitação acumulada (mm por hora) observada e prevista (25-48h e 49-72h) de resolução horizontal 3 km com esquema de convecção ligado (a) e apenas com esquema explícito (indicada como NOCNVC) (b) no período do dia 20 de Dezembro 2009 até 02 de Janeiro de 2010 para Angra dos Reis.....	65
Figura 5.22 – Ciclo diurno médio da precipitação acumulada (mm/h) das previsões de 25-48h e 49-72h do modelo Eta de resolução horizontal 3 km e resolução vertical de 60 níveis, do esquema implícito ligado e esquema explícito (indicada como NOCNVC), e observações obtidas pela estação de Angra dos Reis.....	66
Figura 5.23 – Séries temporais de precipitação acumulada (mm/h) observada e prevista (25-48h e 49-72h) de resolução horizontal 3 km com esquema de convecção ligado (a) e apenas com esquema explícito (indicada como NOCNVC) (b) no período do dia 20 de Dezembro 2009 até 02 de Janeiro de 2010 pela estação de Cunha.	68
Figura 5.24 – Ciclo diurno médio da precipitação acumulada (mm/h) das previsões de 25-48h e 49-72h do modelo Eta de resolução horizontal 3 km e resolução vertical de 60 níveis, do esquema de convecção ligado e do esquema explícito (indicada como NOCNVC), e observações obtidas pela estação de Cunha.	69
Figura 5.25 – Séries temporais de precipitação acumulada (por hora) observada e prevista (25-48h e 49-72h) de resolução horizontal 3 km com esquema de convecção ligado (a) e apenas com esquema explícito (indicada como NOCNVC) (b) do dia 20 de Dezembro 2009 até 02 de Janeiro de 2010 para Santa Virgínia.	70
Figura 5.26 – Ciclo diurno médio da precipitação acumulada (mm/h) das previsões de 25-48h e 49-72h do modelo Eta de resolução horizontal 3 km e resolução vertical de 60 níveis, do esquema de convecção ligado e esquema explícito (indicada como NOCNVC), e observações obtidas pela estação de Santa Virgínia.	71
Figura 5.27 – Séries temporais de temperatura em 10 m observada (roxo) e de temperatura 2 m prevista, de 25-48h (azul) e de 49-72h (vermelho), com resolução vertical de 60 níveis do dia 20 de Dezembro 2009 até 02 de Janeiro de 2010 para Angra dos Reis.....	73

- Figura 5.28 – Ciclo diurno médio da temperatura em 2 metros (°C) das previsões de 25-48h e 49-72h do modelo Eta, com resoluções verticais de 50 e 60 níveis, e da temperatura em 10 m das observações obtidas pela estação de Angra dos Reis..... 74
- Figura 5.29 – Ciclo diurno médio da precipitação acumulada (mm/h) das previsões de 25-48h e 49-72h do modelo Eta, com resoluções verticais de 50 e 60 níveis, e observações obtidas pela estação de Angra dos Reis..... 74
- Figura 5.30 – Séries temporais de direção e intensidade do vento em 10 m do Eta-3km em 60 níveis verticais, com previsões de de 25-48h (a) e 49-72h (b), e as observações em Angra dos Reis..... 76
- Figura 5.31 – Ciclo diurno médio das previsões da velocidade do vento em 10 m (m/s) de 25-48h e 49-72h do Eta-5km e Eta-3km, de 50 e 60 níveis, e observações obtidas pela estação de Angra dos Reis..... 77
- Figura 5.32 – Séries temporais de temperatura 2 m prevista, de 25-48h (azul) e de 49-72h (vermelho), e observada (roxo) com resolução vertical de 60 níveis do dia 20 de Dezembro 2009 até 02 de Janeiro de 2010 para Cunha..... 78
- Figura 5.33 – Ciclo diurno médio da temperatura em 2 metros (°C) das previsões de 25-48h e 49-72h do modelo Eta, com resoluções verticais de 50 e 60 níveis, e temperatura em 10 m das observações obtidas pela estação de Cunha..... 79
- Figura 5.34 – Ciclo diurno médio da precipitação acumulada (mm/h) das previsões de 25-48h e 49-72h do modelo Eta, com resoluções verticais de 50 e 60 níveis, e observações obtidas pela estação de Cunha..... 79
- Figura 5.35 – Séries temporais de temperatura em 2 m observada (roxo) e prevista, de 25-48h (azul) e de 49-72h (vermelho), com resolução vertical de 60 níveis do dia 20 de Dezembro de 2009 até 02 de Janeiro de 2010 para Santa Virgínia..... 81
- Figura 5.36 – Ciclo diurno médio da temperatura em 2 metros (°C) das previsões de 25-48h e 49-72h do modelo Eta, com resoluções verticais de 50 e 60 níveis, e observações obtidas pela estação de Santa Virgínia..... 81
- Figura 5.37 – Ciclo diurno médio da precipitação acumulada (mm/h) das previsões de 25-48h e 49-72h do modelo Eta, com resoluções verticais de 50 e 60 níveis, e observações obtidas pela estação de Santa Virgínia..... 82

Figura 5.38 – Ciclo diurno médio da precipitação acumulada (mm/h) das previsões de 25-48h e 49-72h do modelo Eta, com resoluções verticais de 50 e 60 níveis, com esquema explícito (indicada como NOCNVC), e observações obtidas pela estação de Angra dos Reis.	83
Figura 5.39 – Ciclo diurno médio da precipitação acumulada (mm/h) das previsões de 25-48h e 49-72h do modelo Eta, com resoluções verticais de 50 e 60 níveis, com esquema explícito (indicada como NOCNVC), e observações obtidas pela estação de Cunha.....	84
Figura 5.40 – Ciclo diurno médio da precipitação acumulada (mm/h) das previsões de 25-48h e 49-72h do modelo Eta, com resoluções verticais de 50 e 60 níveis, com esquema explícito (indicada como NOCNVC), e observações obtidas pela estação de Santa Virgínia.	84
Figura 5.41 – Viés da precipitação acumulada (mm/h) no ciclo diurno médio das estações de Angra dos Reis (a), Cunha (b) e Santa Virgínia (c).	88
Figura 5.42 – RMSE da precipitação acumulada (mm/h) no ciclo diurno médio das estações de Angra dos Reis (a), Cunha (b) e Santa Virgínia (c).	89

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 3.1 – Descrição de parâmetros das simulações do modelo Eta.....	21
Tabela 3.2 – Experimentos relacionados com as respectivas simulações.....	21
Tabela 5.1 – Coeficientes de correlação de precipitação acumulada prevista em resolução horizontal de 5 e 3 km, para o intervalo de 25-48h e de 49-72h, e observada referente aos Experimentos numéricos (M1, M2, M3, M4 e M5) das três estações: Angra dos Reis, Cunha e Santa Virgínia.	85

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AB	Alta da Bolívia
ASAS	Alta Subtropical do Atlântico Sul
AT	Anticiclone do Atlântico Sul
BMJ	Betts-Miller-Janjic
CLP	Camada Limite Planetária
CNAAA	Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
ECT	Energia Cinética Turbulenta
ETS	Equitable Threat Score
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
FR	Ferrier
GFDL	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
GHRSSST	Group for High Resolution Sea Surface Temperature
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
JBN	Jato de Baixos Níveis
JST	Jato Subtropical
LST	Local Sideral Time
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
PCD	Plataformas de Coleta de Dados
REDEMET	Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica
RAMS	Regional Atmospheric Modeling System
RMSE	Root Mean Squared Error
USGS	United States Geological Survey
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
VCAN	Vórtice Ciclônico de Altos Níveis
WRF	Weather Research and Forecast
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Sistemas meteorológicos atuantes na região.....	3
2.2 Modelagem em alta resolução	5
2.3 Esquema de microfísica de nuvens.....	8
2.4 Avaliação do ciclo diurno.....	9
3 METODOLOGIA	11
3.1 Dados de observação	11
3.2 Modelo Eta	13
3.3 Experimentos numéricos.....	19
3.4 Índices estatísticos de avaliação	22
4 DESCRIÇÃO DO CASO	25
4.1 Análise sinótica	27
4.2 Análise a partir do radar meteorológico.....	34
4.3 Precipitação observada	36
5 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS.....	39
5.1 Experimento M1	39
5.2 Experimento M2	57
5.3 Experimento M3	63
5.4 Experimento M4	71
5.5 Experimento M5	82
5.6 Análise estatística	85
6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

1 INTRODUÇÃO

Grande parte do Estado do Rio de Janeiro compreende uma região favorável à ocorrência de eventos de chuvas intensas, que frequentemente trazem danos substanciais à população local. Isto se deve, em parte, pela complexidade da topografia desta região, que é caracterizada pelo contraste entre as regiões litorâneas, serra e do vale. A interação entre as circulações atmosféricas locais na região cria forçantes que auxiliam na formação de temporais severos (MARQUES et al., 2001). O conhecimento de aspectos dinâmicos e climatológicos de sistemas meteorológicos que atuam sobre esta região se faz importante ferramenta para auxiliar na previsão de tempo, e consequentemente na prevenção contra desastres naturais que possam eventualmente causar grande impacto no desenvolvimento sócio-econômico da região.

A má qualidade e baixa densidade dos dados observacionais são fatores que dificultam o estudo dos sistemas convectivos. O uso de modelos tenta suprir a falta de dados para o estudo destes sistemas, entretanto, para melhor detectá-los, a escolha da resolução espacial do modelo atmosférico é importante. Devido a curta duração e a pequena escala espacial, a simulação dos sistemas convectivos requer o uso de modelo numérico em alta resolução de forma explícita ou em baixa resolução por meio da parametrização de convecção Cumulus. Além disso, a precipitação é uma das variáveis mais importantes e mais difíceis de ser prevista por modelo numérico atmosférico. A complexidade dos esquemas de produção de chuva depende desde processos de formação de convecção a processos de microfísica de nuvens.

Vários estudos com modelos numéricos são realizados para melhor simular as características de sistemas convectivos, envolvendo a precipitação, seja na intensidade e na distribuição espacial e temporal. O modelo Eta é apropriado para os estudos de fenômenos meteorológicos de mesoescala e para representar os processos físicos mais complexos, como de microfísica de

nuvens, pois trata adequadamente os problemas numéricos próximos de regiões com topografia complexa e em alta resolução, incluindo os fluxos de água e energia à superfície com diferentes coberturas de solo e vegetação, e efeitos não-hidrostáticos.

A previsão do ciclo diurno da chuva também está inclusa na dificuldade de observar e quantificar a chuva produzida, e a intensidade da convecção Cumulus. O uso da alta resolução horizontal no modelo pode ajudar na melhoria da representação adequada do ciclo diurno da precipitação. A utilização de simulações numéricas de sistemas convectivos em alta resolução deve capturar melhor os processos desde escala de nuvens a mesoescala, permitindo assim estudar os processos nessas escalas em situações de chuvas intensas.

1.1 Objetivos

As motivações deste trabalho incluem avaliação de modelos de alta resolução e o aprimoramento na previsão da precipitação. Sendo assim, o objetivo principal do trabalho foi verificar a capacidade do modelo Eta em alta resolução em representar as características do ciclo diurno da precipitação. As características exploradas estão centradas no ciclo diurno e na intensidade da precipitação. Os objetivos específicos são citados a seguir:

- a) Avaliar os papéis da resolução horizontal e vertical na descrição do ciclo diurno da precipitação e da temperatura, determinando a representação da severidade dos sistemas convectivos presentes na região da Serra do Mar.
- b) Avaliar o esquema de convecção e esquema da microfísica de nuvens, verificando o impacto que pode trazer na representação do ciclo diurno da precipitação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são descritas as características de origem e desenvolvimento de sistemas meteorológicos que estão associados à ocorrência de eventos extremos de chuva na região da Serra do Mar, e estudos relacionados às mudanças de resoluções espaciais e esquemas de produção de chuva de modelo numérico de previsão de tempo.

2.1 Sistemas meteorológicos atuantes na região

O Estado de Rio de Janeiro, incluindo a região da Serra do Mar, sofre influência da atuação de vários sistemas meteorológicos, locais e de grande escala, com maior frequência e intensidade durante o verão, quando o centro da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), e conseqüentemente a subsidência associada a este, estão mais afastados do continente. Os principais fatores causadores de chuvas nessa região são as perturbações de origem extratropicais (sistemas frontais) que geram fortes correntes térmicas e têm interação com convecção local, provocando chuvas intensas, e os sistemas tropicais nos meses de verão, que estão associados com as frentes quentes e ao transporte do ar quente e úmido proveniente da região equatorial embebido na circulação da ASAS e provocando chuvas também de pequena intensidade (MARQUES et al., 2001).

Seluchi e Chou (2009) realizaram um trabalho envolvendo frequência de intensas chuvas sobre a região da Serra do Mar durante a época de verão. Indicaram que a maior parte dessas chuvas é causada pela presença da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e das frentes frias. A ZCAS é considerada como um fenômeno meteorológico que ocorre principalmente no final da primavera e nos meses de verão, onde sua atuação é em torno de 10 dias consecutivos, produzindo altos índices pluviométricos sobre a região central da América do Sul. É caracterizada pela faixa de nebulosidade que se

estende na direção noroeste-sudeste desde a Amazônia até o Oceano Atlântico Sul indicando o transporte de umidade da Bacia Amazônica para as regiões central e sudeste do continente e pode ser reforçada pela convecção local induzida pelo forte aquecimento da superfície durante o verão e a primavera (QUADRO et al., 2012; SANCHES, 2002). Segundo Kodama (1992 e 1993), existem algumas características básicas que favorecem a formação e persistência desse sistema como a liberação do calor latente na América do Sul, o escoamento de ar quente e úmido em baixos níveis em direção as altas latitudes, a associação com o Jato Subtropical (JST) em altos níveis, a sua posição a leste de cavados de níveis médios semi-estacionários, e por estar localizada em regiões de forte gradiente de umidade associado à convergência em baixos níveis, com geração de instabilidade convectiva. O padrão de nebulosidade associado à ZCAS se assemelha a uma frente fria, alinhando-se na direção noroeste-sudeste ao longo do Brasil central. Grande parte dos eventos de ZCAS ocorre na presença de uma frente fria subtropical (fraco gradiente de temperatura associado) ou clássica (forte gradiente de temperatura associado e de origem extratropical).

Além da presença de sistemas meteorológicos de grande escala, as características geográficas da região da Serra do Mar favorecem na formação de sistemas convectivos de mesoescala na região da Serra do Mar, incluindo o Estado do Rio de Janeiro, ao longo da estação quente e que são responsáveis por ocorrência de chuva sobre essas regiões. Podem ser consideradas como sistemas de nebulosidade que se formam pelo agrupamento de várias tempestades convectivas e que produz uma área contínua de precipitação com dimensão igual ou maior que 100 km em pelo menos uma direção. Além disso, contribuem também para a formação de padrões de circulações locais distintas. Exemplos dessas circulações são as brisas marítimas e terrestres e as circulações de vale-montanha, que ocorrem na ausência de fortes gradientes de pressão na escala sinótica. Em tais situações, a circulação local dos ventos é dominada por pequenos gradientes de pressão induzidos por diferenças de

temperatura na escala local, gerando circulações específicas dominadas pela característica da superfície da região.

As brisas ocorrem devido ao aquecimento e resfriamento diferencial entre o continente e o oceano, ou também numa região com terreno irregular (regiões montanhosas). Segundo as considerações de Atkison (1981), o aquecimento mais acentuado sobre o continente em relação ao oceano induz gradientes horizontais de pressão gerando em uma circulação local que advecta umidade vinda do oceano em direção ao continente e estabelecendo uma célula de circulação, com levantamento de ar sobre a terra e subsidência sobre o oceano. Sobre regiões de terreno acidentado, como na região da Serra do Mar, o mais forte aquecimento das parcelas de ar diretamente em contato com a encosta de uma montanha em relação a uma parcela de atmosfera livre a uma mesma altura, gera diferenças de fluabilidade, levando a indução de movimentos verticais ascendente sobre as regiões mais elevadas e consequente movimento descendente sobre a região de vale. Essas circulações influenciam nas características de escoamento do ar, transporte de umidade e precipitação e a sua atuação em conjunto pode ocasionar na formação de sistemas convectivos, atuando como mecanismos de disparo da convecção.

2.2 Modelagem em alta resolução

Devido às características locais de pequena escala da circulação, a utilização de modelos de mesoescala de alta resolução horizontal (de 1 a 3 km) possibilitaria uma melhor capacidade de representação de sistemas convectivos e circulações que predominam em regiões montanhosas e/ou próximas as costas marítimas. Vários estudos foram realizados utilizando modelos em alta resolução:

Mendes (2007) realizou um estudo para identificar os principais mecanismos meteorológicos atuantes na cidade de Angra dos Reis-RJ, que está localizada sobre a região da Serra do Mar. As simulações, geradas pelo modelo Eta, foram comparadas com dados de reanálise do National Centers for Environmental Prediction (NCEP) e também foram utilizadas para avaliar as respostas do modelo em experimentos com diferentes configurações (modo não-hidrostático e hidrostático, e perfis de referência de umidade) e com resoluções horizontais das simulações configuradas em 10 e 3 km, mantendo a resolução vertical de 38 níveis. O aumento da resolução horizontal permitiu que as variáveis de pressão, temperatura, movimento vertical e umidade apresentassem resultados mais próximos aos dados de reanálise do NCEP e o modelo simulou mais adequadamente a escala de convecção de Cumulus, proporcionando maior instabilidade convectiva e uma melhor localização das nuvens.

Case (2002) utilizou o modelo Regional Atmospheric Modeling System (RAMS) de grade horizontal de 1.25 km e produziu previsões capazes de detectar fenômenos de mesoescala como brisas e convecção durante os meses de verão entre 1999 e 2000 na costa-leste da Florida. Foi feita uma breve comparação do RAMS-1.25 km com o RAMS-5 km e Eta-32 km. O desempenho do modelo em alta resolução (RAMS-1.25km) mostrou que foi melhor que os outros modelos nas previsões de brisa marítima, porém, teve dificuldade em prever a hora e o local do início das tempestades nos meses de verão de 2000 apesar da sua alta resolução e com o uso do esquema explícito. A dificuldade dessa previsão pode ter sido por causa de problemas de condição de contorno, interações errôneas de parametrização de cumulus em grades não refinadas.

Zhong e Fast (2003) fizeram uma análise e comparação das simulações feitas pelos três modelos não hidrostáticos de mesoescala MM5, RAMS e Meso-Eta na região do Vale de Salt Lake, onde o MM5 e o RAMS foram configurados

similarmente, aplicando cinco grades aninhadas com resolução horizontal de 45, 15, 5, 1.67 e 0.56 km que correspondem aos domínios 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente; o modelo Meso-Eta, sem grade aninhada, possui uma grade maior do que o domínio 4 dos modelos anteriores, com resolução horizontal de aproximadamente 0.85 km. A importância desta avaliação foi pela complexidade da topografia e nos padrões de circulações como brisa terrestre/marítima e interações entre fluxos próximos a superfície. As simulações mostraram que os três modelos foram capazes de representar razoavelmente bem os escoamentos de vale-montanha, convergência e divergência na superfície do vale, assim como a espessura da Camada Limite Planetária (CLP), onde o RAMS e o MM5 tiveram melhor desempenho do que o Meso-Eta, que subestimou as forças de circulações associadas à convergência e divergência sobre o vale.

Fast (2003) testou, com a versão não hidrostática do modelo Eta, coordenadas verticais (“step-mountain” e “terrain-following”) com alta resolução horizontal de 850 m e 45 camadas na vertical. Os dados originais da topografia usados para gerar a topografia do modelo eram de 1 km de resolução espacial, portanto estas simulações não continham efeitos de sub-grade da topografia. Mostrou-se que os erros da previsão associados com parametrizações físicas, como turbulência, foram provavelmente menos importantes do que aqueles associados com a coordenada vertical escolhida, e os tratamentos numéricos de termos gradientes horizontais, como de pressão, são um dos fatores contribuintes para os erros de previsão para locais relativamente íngremes. As avaliações de simulações em alta resolução foram problemáticas por causa das medições escassas de vento, temperatura e umidade em áreas que possuem terrenos complexos.

Shem et al. (2009) realizaram simulações com o modelo Weather Research and Forecast (WRF) para análise de chuva para época de verão na cidade de Atlanta nos Estados Unidos. O trabalho foi dividido em dois experimentos com

três domínios. O caso 1 possui resoluções horizontais de 30, 10 e 3.3 km e o caso 2 com 18, 6 e 2 km. Suas simulações tiveram configurações de inclusão (URBAN) e remoção (NOURBAN) da cidade de Atlanta para verificar se o modelo consegue captar a evolução das tempestades em ambas as situações. As parametrizações básicas utilizadas no modelo foram Kain-Fritsch, como esquema de Cumulus, e Ferrier, como esquema de microfísica de nuvens que são usadas também no modelo Eta. Pela série de simulações, o modelo conseguiu captar a evolução convectiva no controle URBAN três horas antes do início das tempestades, no entanto, o controle NOURBAN causou diferenças distintas entre previsões de precipitação com a evolução temporal e a espacial.

2.3 Esquema de microfísica de nuvens

Percebeu-se que algumas das dificuldades do modelo numérico são na representação da evolução das nuvens que envolvem produção de chuva e das mudanças da fase da água. As parametrizações de convecção, que é um dos esquemas responsáveis pela formação da chuva, são usadas para dar conta dos efeitos da convecção. Segundo Sundqvist et. al (1989), as parametrizações de convecção são usadas se as resoluções horizontais forem mais baixas. No entanto, com a alta resolução (1 a 3 km), os modelos podem ser executados sem os esquemas de convecção, pois os espaçamentos de grade são pequenos o suficiente para resolver os movimentos convectivos. Alguns trabalhos, citados a seguir, realizaram testes sem os esquemas de convecção para verificar o comportamento dos processos microfísicos das nuvens com o aumento da resolução.

Avaliações com o modelo regional MM5 foram realizadas no trabalho de Nogueira (2010) na região do Centro de Lançamento de Alcântara. Utilizaram-se resoluções horizontais de 9 e 3 km para estudar a capacidade do modelo em representar realisticamente a precipitação em grades de alta resolução

usando apenas o esquema explícito. Os resultados mostraram que as principais diferenças na precipitação simulada pelo esquema de convecção ligado foi que a chuva gerada foi menos intensa em sua magnitude e cobriu grandes áreas da região, e pelo esquema explícito foi mais intenso e concentrado no espaço.

Gomes (2010) realizou testes de sensibilidade com o esquema de microfísica de nuvens para determinar os parâmetros de maior sensibilidade na produção de chuva explícita. A velocidade terminal da chuva e a velocidade de queda dos cristais de gelo apresentaram maior sensibilidade na produção de precipitação. A modificação da equação que determina a umidade relativa crítica para a formação das gotas resultou um aumento da precipitação para a resolução horizontal de 20 km do modelo. No entanto, com o aumento da resolução para 5 km, a restrição do esquema de microfísica de nuvens foi maior para o início de formação das gotas de nuvem, resultando em pouca produção de precipitação explícita.

2.4 Avaliação do ciclo diurno

O conhecimento do ciclo diurno da precipitação é importante também para estudo do ciclo hidrológico e o sistema climático de uma determinada região, e está associado com o ciclo diurno da formação de nuvens, atividades convectivas e desenvolvimento da camada limite. Esse conhecimento prévio pode ajudar no desenvolvimento de metodologias de monitoramento de previsão de chuva. As dificuldades para previsão a chuva do ciclo diurno incluem a limitação da capacidade de observar e quantificar chuva produzida.

O trabalho de Clark et al. (2007) envolveu a comparação do ciclo diurno de precipitação em resoluções espaciais de 5 km, utilizando um esquema de parametrização de convecção, e de 22 km, com esquema de convecção desligado. As simulações foram produzidas pelo modelo de mesoescala WRF,

com o objetivo de verificar se houve melhoria significativa usando o espaçamento com grade fina, que seria suficiente para resolver explicitamente a convecção. A representação do ciclo diurno foi caracterizada por fraca atividade convectiva no período noturno. Um dos erros típicos foi incluído o adiantamento da iniciação de convecção. Nas previsões de 24-48h, os resultados obtidos com resolução de 5 km obtiveram índices de correlações espaciais mais altos do que aqueles com resolução de 22 km. Pelos índices Equitable Threat Score (ETS), ambas as configurações do modelo mostraram oscilações diurnas com seus máximos valores no mesmo período, entre 0000 a 0300 LST. Isto ocorreu porque os sistemas convectivos de mesoescala organizados são mais previsíveis do que aqueles de formação mais aleatórios e caóticos.

Algumas dificuldades foram detectadas na representação do ciclo diurno da chuva pelo modelo Eta na Amazônia, como foi analisado pelo Rodriguez (2011), utilizando resolução horizontal de 2 km e com a parametrização de convecção semi ligada. No ciclo diurno médio para o mês de Janeiro, a falta de chuva foi registrada pela manhã e atraso de chuva à tarde, por outro lado a quantidade de chuva foi razoavelmente capturada. Pelas análises das primeiras 60 horas de simulações de cada ponto escolhido dentro da bacia de estudo, as diferenças de precipitação foram pequenas durante o primeiro ciclo diurno, mas à medida que foi avançando o prazo de integração foram observadas pequenas diferenças nas variáveis, por exemplo, temperatura em superfície, magnitude do vento e fluxos de energia.

3 METODOLOGIA

Nesta seção, serão descritas a versão do modelo Eta e, detalhadamente, a parametrização convectiva de Betts-Miller-Janjic e a parametrização de microfísica de nuvens de Ferrier. Serão apresentados também os experimentos numéricos realizados com os esquemas de precipitação citados, comparando com os dados de observação, que servirão na avaliação do ciclo diurno de chuva.

3.1 Dados de observação

Os dados que foram utilizados para a verificação das simulações obtidas pelo modelo Eta são dados provenientes das Plataformas de Coleta de Dados (PCD), mais conhecidas como Estações Ambientais Automáticas, que possuem informações meteorológicas como temperatura do ar, precipitação total, direção e velocidade dos ventos, etc. As estações escolhidas, apontadas na Figura 3.1, foram de Cunha (Latitude: 23.07° S, Longitude: 44.95° W, Altitude: 950 m) e Santa Virgínia (Latitude: 23.35° S, Longitude: 45.13° W, Altitude: 922 m).

Além desses, foram usados também os dados de informações locais de uma das torres meteorológicas que está instalada na área da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA), que corresponde a Torre A (Latitude: 23.01° S, Longitude: 44.46° W, Altitude: 40 m). Esta torre apresenta três níveis distintos de medida: 10 m, 60 m e 100 m, onde em cada um deles existe um sensor de vento (direção e velocidade) e de temperatura do ar, possuindo também medidas de umidade e precipitação. Nas demais torres (denominadas Torres B, C e D), apenas são medidas de direção e velocidade dos ventos. Na Figura 3.1, pode ser observada a localização da Torre A meteorológica existente na área de CNAAA.

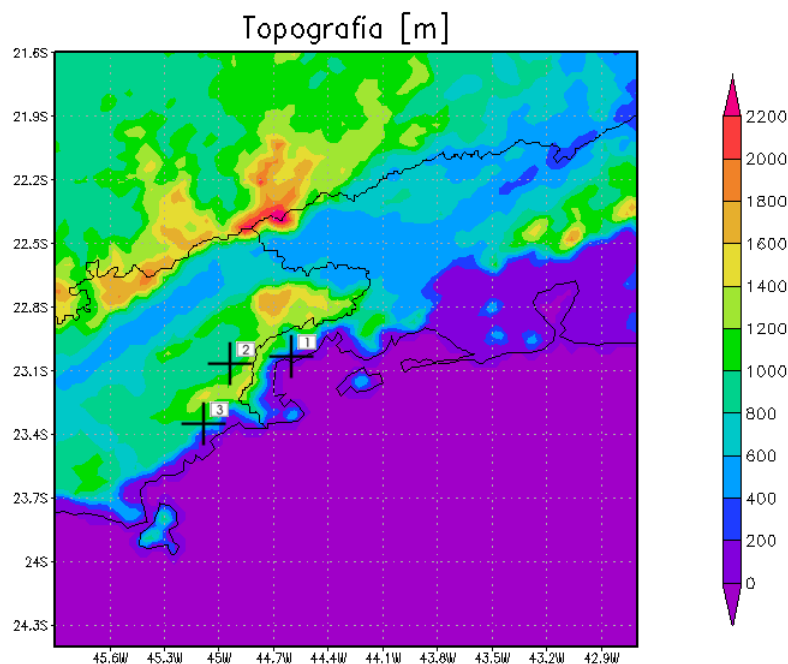


Figura 3.1 – Localização das torres meteorológicas: Torre A da CNAA (1); Estações de Cunha (2) e Santa Virgínia (3) da PCD.

Foi usado também o radar meteorológico que pertence à Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (REDEMET) para visualizar o desenvolvimento das tempestades convectivas que atuaram sobre o Estado de Rio de Janeiro e a região leste do Estado de São Paulo.

Esse radar, identificado como radar do Pico do Couto, é do tipo Doppler, possui alcance de 25 a 400 km e está centrado sobre a cidade Petrópolis-RJ com resolução horizontal de 125 m e altitude de 1771,94 m. As imagens obtidas por esse radar são do tipo MAXCAPPI, mostrando a máxima refletividade (até 75 dBZ) em uma varredura volumétrica e projetando-as em perfil vertical. As informações mais detalhadas sobre o radar podem ser obtidas pelo site do REDEMET (<http://www.redemet.aer.mil.br/>).

3.2 Modelo Eta

O modelo regional Eta foi desenvolvido pela parceria entre a Universidade de Belgado e o Instituto de Hidrometeorologia da Iugoslávia, e foi utilizado operacionalmente pelo NCEP (Mesinger et al., 1988; Black, 1994). Este modelo foi instalado no CPTEC em 1996, usado tanto operacionalmente quanto para pesquisa, com o objetivo de auxiliar na melhoria das previsões numéricas de tempo (Chou, 1996). Devido à alta resolução espacial, o modelo possui a capacidade maior que o modelo global em prever detalhe de fenômenos meteorológicos de grande escala (sistemas frontais) a mesoescala (brisas marítimas, sistemas convectivos de mesoescala, tempestades severas em geral).

3.2.1 Coordenada vertical

A coordenada vertical do modelo é a coordenada η que foi desenvolvida por Mesinger (1984) para reduzir os erros significativos de gradientes horizontais de pressão, advecção e difusão horizontal ao longo de uma região com topografia íngreme, como nos Andes da América do Sul. A coordenada η é definida pela relação:

$$\eta = \left(\frac{p - p_T}{p_{sfc} - p_T} \right) \left[\frac{p_{ref}(z_{sfc}) - p_T}{p_{ref}(0) - p_T} \right] \quad (3.1)$$

Onde p é a pressão atmosférica, p_T é a pressão no topo do domínio do modelo, p_{sfc} é a pressão na superfície, z_{sfc} é a altitude na superfície, e p_{ref} é a pressão de referência que é em função da altitude acima do nível do mar.

O perfil vertical pode ser distribuído em várias camadas, de forma que a resolução das camadas em baixos níveis mais alta, para melhorar no detalhamento dos fenômenos que ocorrem na CLP, com isso, a resolução

vertical diminui com a altura. A Figura 3.2 mostra duas configurações da estrutura vertical, de 50 e 60 camadas, do modelo Eta, onde os valores da esquerda representam o nível de pressão indicando suas posições de acordo com a atmosfera padrão e os da direita representam aproximadamente a profundidade de cada camada de pressão em hPa.

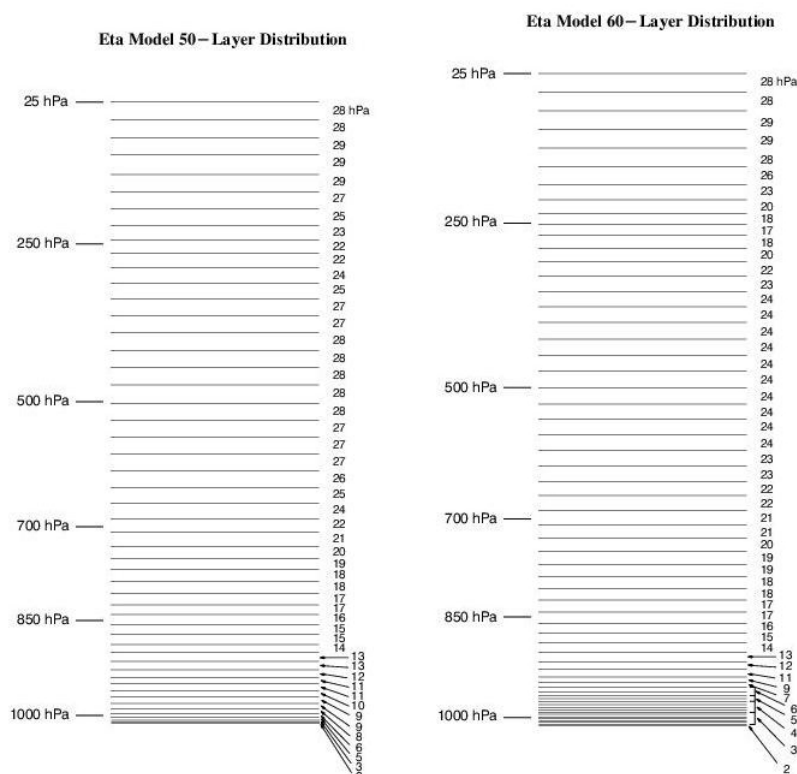


Figura 3.2– Exemplos de estruturas verticais do modelo Eta, de 50 e 60 camadas.

3.2.2 Grade horizontal

A grade horizontal do modelo Eta é a grade E de Arakawa (Arakawa e Lamb, 1977), que é considerada como uma grade regular em coordenadas esféricas, ou seja, é definida pela rotação de toda a grade geográfica (latitude e longitude) onde o centro do domínio do modelo é a intersecção do equador e o meridiano de Greenwich. Suas vantagens incluem as grades horizontais distribuídas de forma espaçadas uniformemente, diminuem a convergência dos meridianos.

3.2.3 Topografia

A topografia do modelo Eta é representada por degraus discretos, cujos topos coincidem exatamente com uma das interfaces das camadas verticais (Black, 1994). Na Figura 3.3, mostra-se um esquema de corte vertical das camadas mais baixas do domínio, onde cada valor de T indica uma variável de massa em cada caixa de grade, U representa as componentes horizontais do vento, p_s é pressão de superfície, e os valores de U circulados são pontos de vento que estão localizadas nas laterais dos degraus e definidas como zero em todo o período.

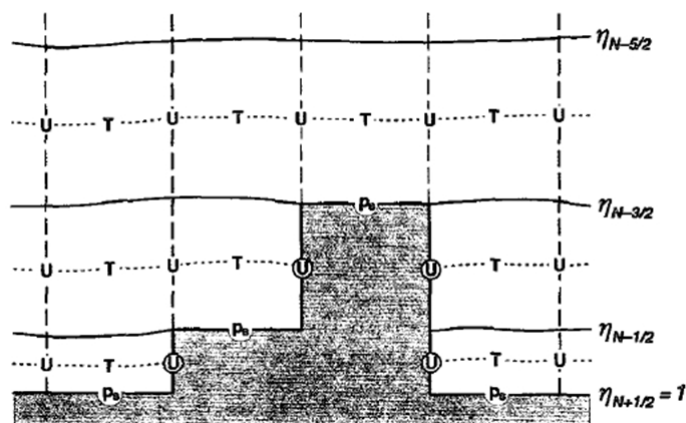


Figura 3.3 – Seção vertical idealizada da topografia do modelo Eta. Fonte: Black (1994).

3.2.4 Esquema de integração

Os contornos laterais possuem duas fileiras de pontos que são excluídas do domínio de integração, onde a mais externa é constituída somente de informações do modelo de resolução baixa e a outra é basicamente uma mistura de informações provenientes dos dois modelos.

As variáveis prognósticas primárias no modelo Eta são: temperatura do ar, umidade específica, componentes horizontais do vento, pressão de superfície e

energia cinética turbulenta. Água, gelo e outros hidrometeoros dentro da nuvem são também variáveis prognósticas.

O esquema de integração é feito por particionamento explícito (“split-explicit”), onde os termos responsáveis pelo ajuste de ondas de gravidade são tratados pelo esquema “forward-backward” modificado por Janjic (1979) e os termos de advecção horizontal e vertical são tratados pelo esquema “Euler-backward”.

3.2.5 Radiação e superfície

No modelo Eta, utiliza-se o esquema de parametrização de fluxos radiativos desenvolvido pela Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), onde o esquema de cálculo da radiação de onda curta é de Lacis e Hansen (1974) e de onda longa é de Fels e Schwarzkopf (1975). Esses esquemas são calculados a cada hora de previsão, e as distribuições de dióxido de carbono, ozônio e albedo inicial de superfície são retirados da climatologia. Em trocas de energia entre o solo (vegetação e atmosfera) é usado o esquema de parametrização Noah (Ek et al., 2003).

3.2.6 Trocas turbulentas

Os processos turbulentos são tratados através do esquema de Mellor-Yamada 2.5 (Mellor e Yamada, 1982) acima da primeira camada e na camada superficial são baseados na teoria da similaridade de Monin-Obukhov (1954), utilizando as funções de estabilidade de Paulson (Paulson, 1970).

O esquema Mellor-Yamada 2.5 possui um recurso conceitual pelo tratamento rigoroso de processos turbulentos além da eficiência no baixo custo computacional. É feita uma modificação no conjunto de equações de correlações onde é substituído por uma equação prognóstica para Energia Cinética Turbulenta (ECT) e para uma escala espacial da turbulência (Janjic, 2001). Logo, a ECT é considerada uma variável totalmente prognóstica e é obtida nas interfaces da camada do modelo Eta.

3.2.7 Esquema de microfísica de nuvens

O esquema de Ferrier (Ferrier et al., 2003), usado para representar os processos de microfísica de nuvens foi formulado para prever a variação de seis formas da água: água de nuvem, gelo de nuvem, granizo, neve, vapor d'água e "sleet"; especificamente, seriam as previsões de mudanças entre o vapor d'água e a condensação total, que é a soma das gotas pequenas não precipitantes (água de nuvem), das gotas grandes (chuva) e do gelo.

O algoritmo de condensação de Asai (1965), utilizado para modelos de alta resolução (em torno de 1 a 2 km), ajusta a temperatura, umidade e água de nuvem condensada a partir de um limiar de umidade relativa do ar associado com o início da condensação. Este limiar é dado em função da resolução horizontal do modelo, onde se pode aproximar de 100% para modelos de alta resolução.

A precipitação é prevista pela integração dos fluxos de precipitação do topo da nuvem até a superfície. Os fluxos são particionados entre o armazenamento local na caixa de grade, que é proporcional à espessura da camada de precipitação, e o que precipita através da base da caixa de grade.

Os tipos de precipitação e a física da colisão ("rime physics"), que podem ser formar como chuva, chuva congelada, neve, graupel, são calculados pela variável da densidade de gelo a partir da neve de baixa densidade até o graupel.

As condições de fase mista indicam que processos entre diferentes estados de fase podem ocorrer em temperaturas superiores a -10°C . Supõe que a chuva super-gelada congela formando granizo, e a gota super-gelada congela formando gelo de nuvem em temperaturas mais frias.

Os processos de congelamento e derretimento incluem o congelamento de chuva super gelada, e o derretimento de todas as partículas de gelo. Os processos físicos de fusão mais sofisticados, afetados pela umidade relativa do ar, incluem trocas de calor e umidade.

Os processos microfísicos considerados no esquema de Ferrier são:

- Autoconversão da água da nuvem para chuva – RAUT
- Coleta da água da nuvem pela chuva – RACW
- Evaporação da chuva – REVP
- Condensação ou evaporação da água da nuvem – CND
- Deposição ou sublimação de cristais de gelo – DEP
- Coleta da água da nuvem pela precipitação de gelo – IACW
- Aglutinação da água da nuvem para formação da chuva – IACWR
- Congelamento da chuva sobre grandes partículas de gelo a temperatura super baixa – IACR
- Condensação sobre gelo em derretimento – ICND
- Evaporação pelo gelo em derretimento – I EVP
- Derretimento do gelo – IMLT

Existem parâmetros de microfísica de nuvens que se mostram mais sensíveis na produção de precipitação pelo esquema de FR e dentre eles estão em destaque:

- Velocidade terminal da chuva: É a velocidade constante com que as gotas de nuvem caem com uma velocidade constante, ou seja, quando a resistência do ar se iguala à força de gravidade.
- Velocidade de queda dos cristais de gelo: Similarmente as gotas de nuvem, é a velocidade resultante com que o gelo cai após o balanço das forças de resistência do ar e da gravidade.

3.2.8 Esquema de convecção

O esquema de parametrização convectiva Betts e Miller (1986) modificado por Janjic (1994), adotado como BMJ, é baseado em ajuste convectivo. Em condições secas, no momento em que a atmosfera indicar um “lapse-rate” instável, a mistura ocorre espontaneamente e provoca o retorno de um “lapse-rate” neutro. Em condições saturadas, o “lapse-rate” está neutro no estado final. No caso de convecção rasa, a nuvem não precipitante transporta umidade em níveis superiores, mantendo a temperatura mais quente nos níveis inferiores e para convecção profunda transporta calor e umidade produzindo precipitação.

Existem três parâmetros de ajuste do perfil termodinâmico de referência que são:

- a) Déficit de pressão de saturação: determina o perfil de referência de umidade em três níveis: base da nuvem, nível de congelamento da nuvem e topo da nuvem.
- b) Coeficiente de estabilidade: determina o “lapse-rate” da temperatura de referência em relação à adiabática úmida.
- c) Tempo de ajuste: é o tempo de relaxação para a remoção da instabilidade convectiva encontrada no perfil.

3.3 Experimentos numéricos

3.3.1 Condição inicial e de contorno

As simulações foram produzidas em dois níveis de aninhamento: as reanálises ERA-Interim do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) (Simmons et al., 2007) foram utilizadas como condição inicial e de

contorno lateral para o modelo Eta na resolução de 15 km, que por sua vez foi utilizado como condição lateral do modelo Eta nas resoluções de 3 e 5 km, mantendo o mesmo domínio. As reanálises apresentam resolução de 1.5° forçando o modelo Eta-15km a cada 6 horas, e a versão de alta resolução foi forçado pelo Eta-15km a cada 6 horas também.

As grades estão centradas sobre Angra dos Reis, abrangendo os Estados de São Paulo e Rio de Janeiro (Figura 3.5). O prazo de integração é de 72 horas, com saída a cada hora foram produzidas simulações para o período de duas semanas (20 de Dezembro de 2009 a 02 de Janeiro de 2010).

As condições de contorno inferior utilizadas foram a temperatura da superfície do mar (TSM), na resolução espacial de 0.25° proveniente do GHRSSST (Group for High Resolution Sea Surface Temperature); o mapa de solo que tem resolução de 0.25°, atualizado por Tomasella e Moira (2008); o mapa de vegetação, com resolução de 1 km, e o mapa da topografia original, com resolução de 90 m, proveniente do United States Geological Survey (USGS).

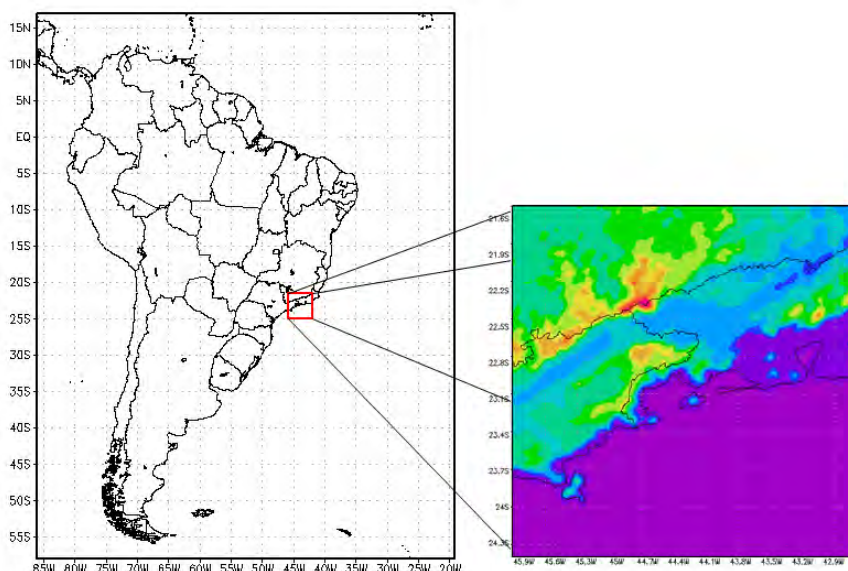


Figura 3.4 – Domínio espacial das grades na resolução horizontal de 15 km (grade maior) e de 5 e 3 km (grade menor).

3.3.2 Experimentos numéricos

Os experimentos realizados estão descritos na Tabela 3.1 e Tabela 3.2. Foram feitas simulações de cinco rodadas para cinco experimentos, com resoluções horizontais de 5 e 3 km e resoluções verticais de 50 e 60 níveis.

Tabela 3.1 – Descrição de parâmetros das simulações do modelo Eta

SIMULAÇÕES	RES. HORIZONTAL (km)	RES. VERTICAL (níveis)	P. CONVECÇÃO BMJ
1	5	50	SIM
2	3	50	SIM
3	3	50	NÃO
4	3	60	SIM
5	3	60	NÃO

Tabela 3.2 – Experimentos relacionados com as respectivas simulações

EXPERIMENTOS	SIMULAÇÕES
M1	1 e 2
M2	2 e 3
M3	4 e 5
M4	2 e 4
M5	3 e 5

No **experimento M1**, foram analisadas as simulações do Eta-5km e Eta-3km, considerando a mesma resolução vertical de 50 níveis. O aumento da resolução horizontal de 5 para 3km tem o objetivo de fazer análises mais refinadas dos sistemas convectivos e verificar o impacto da utilização da alta resolução sobre a chuva. As duas rodadas foram produzidas com a atuação

dos esquemas de microfísica de nuvens e de convecção BMJ ligados, mantendo a resolução vertical de 50 níveis.

Foram feitas comparações entre simulações realizadas com esquema de parametrização de convecção ligada e as outras com essa parametrização desligada, e mantendo a atuação do esquema de microfísica. No **experimento M2**, a comparação foi realizada mantendo a resolução horizontal de 3 km e a resolução vertical de 50 níveis, enquanto que no **experimento M3** foi mantida a resolução horizontal de 3 km e a resolução vertical de 60 níveis. Estes experimentos são relevantes para analisar os efeitos do esquema de convecção nestas resoluções.

Para verificar o impacto da resolução vertical de 50 para 60 níveis no desempenho da parametrização de microfísica de nuvens em diferentes resoluções verticais, realizou-se um experimento de aumento da resolução vertical, utilizando então 60 níveis, e mantendo resolução horizontal de 3 km, mas aplicando ou não o esquema de convecção. No **experimento M4** foi aplicado o esquema de convecção e no **experimento M5** não foi aplicado o esquema de convecção.

3.4 Índices estatísticos de avaliação

Para verificar o desempenho dos modelos numéricos, é necessário utilizar métodos que indiquem a magnitude dos erros das previsões. Este diagnóstico pode ajudar no aperfeiçoamento desses modelos. Sendo assim, foram escolhidos alguns índices estatísticos para avaliar cada variável prognóstica, como a precipitação e a temperatura.

Um dos índices que avalia a associação entre duas variáveis é o cálculo do coeficiente de correlação, mais conhecido como coeficiente linear de correlação de Pearson. É representado como a razão entre a covariância entre

duas variáveis pelo produto dos desvios-padrão de cada uma delas. Este índice é importante na medição da correspondência ou diferença de fase nas séries temporais entre as previsões e as observações.

$$r_{x,y} = \frac{\text{COV}(x,y)}{S_x S_y} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i^p - \bar{x}^p)(x_i^o - \bar{x}^o)]}{\left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (x_i^p - \bar{x}^p)^2}{n-1} \right\}^{1/2} \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (x_i^o - \bar{x}^o)^2}{n-1} \right\}^{1/2}} \quad (3.2)$$

Representando, $x_i^{p'} = (x_i^p - \bar{x}^p)$ e $x_i^{o'} = (x_i^o - \bar{x}^o)$

$$r_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n [x_i^{p'} x_i^{o'}]}{\left\{ \sum_{i=1}^n (x_i^{p'})^2 \right\}^{1/2} \left\{ \sum_{i=1}^n (x_i^{o'})^2 \right\}^{1/2}} \quad (3.3)$$

Onde o n é o número total de eventos, x_i^p é o conjunto de medida das previsões e x_i^o é o conjunto de medida das observações.

O *Viés* serve para indicar erro sistemático ou determinar a tendência do erro, mostrando a direção média dos desvios de um conjunto de valores observados ou de análises verificadas. Os valores de Viés superiores a 1 indicam superestimativa da previsão, e se forem inferiores a 1, indicam subestimativa da previsão.

$$\text{Viés} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^p - x_i^o) \quad (3.4)$$

Onde N é o número total de eventos e os índices p e o correspondem a previsão e observação.

O *Root Mean Square Error* (RMSE), mais conhecido como Erro Médio Quadrático, indica a magnitude média do erro e que seja uma boa medida de precisão. Este índice é apropriado para realçar e detectar os maiores erros das simulações obtidas em modelos.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^p - x_i^o)^2} \quad (3.5)$$

4 DESCRIÇÃO DO CASO

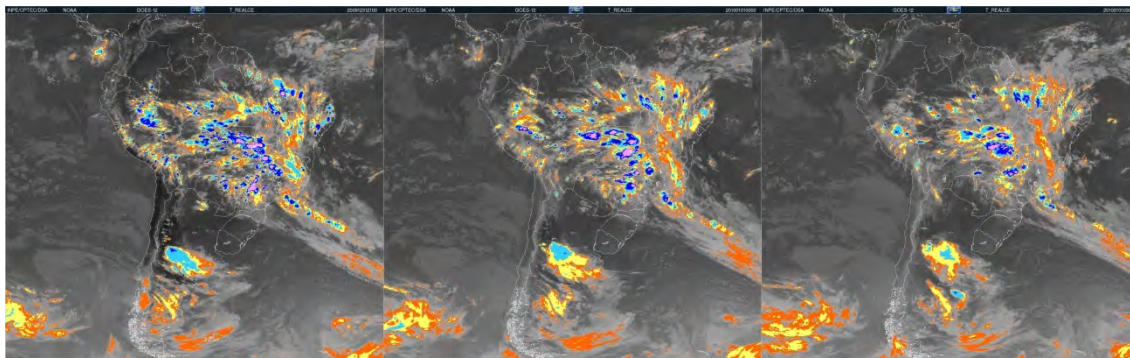
Na última semana de Dezembro de 2009, um evento contínuo de chuvas intensas ocorreu no sul do Estado de Rio de Janeiro e no cone leste do Estado de São Paulo. As chuvas mais persistentes e significativas ocorreram no período de 31 de Dezembro de 2009 a 01 de Janeiro de 2010. O local mais afetado foi a cidade de Angra dos Reis, onde a precipitação acumulou 275,5 mm nos dois dias seguidos, sendo 132,6 mm no primeiro dia e 142,9 mm no segundo dia. Os maiores valores diários de precipitação registrados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) nos últimos dez anos haviam sido de 129,3 mm em 09 de Dezembro de 2002 e 117,5 mm em 25 de Outubro de 2003. Historicamente, a maior chuva ocorreu no dia 22 de Dezembro de 1965 com acúmulo de 191,4 mm. O temporal associado a este evento (31 de Dezembro de 2009 a 01 de Janeiro de 2010) provocou deslizamentos de terra causando pelo menos 52 mortes na região (Fonte: G1).

Nas imagens de satélite realçadas no canal infravermelho (Figura 4.1), observa-se um aglomerado de sistemas convectivos sobre o sul do Estado de Rio de Janeiro e uma banda de nebulosidade de uma frente fria que está centrada sobre o Oceano Atlântico Sul. Esses sistemas convectivos se organizaram à medida que vão se deslocando em direção ao sul do Estado, se intensificam, aumentando a banda de nuvens e mostrando características de um sistema de baixa pressão. Sobre a região central do Brasil pode-se observar o desenvolvimento de intensos sistemas convectivos, evidenciados pelas baixas temperaturas de brilho no topo das nuvens, desde a região amazônica até a região Sudeste. Pode ser identificada a presença do Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) sobre o Atlântico Sul a leste da região Nordeste, com pouca nebulosidade sobre o centro e formação de nuvens na região da borda oeste do sistema, sobre o continente.

Na seção seguinte, as descrições do comportamento sinótico no período do caso de Angra dos Reis são realizadas através de campos das variáveis

meteorológicas, plotados com reanálises do ERA-Interim, e de cartas sinóticas, fornecidas pelo CPTEC-INPE.

a)



b)

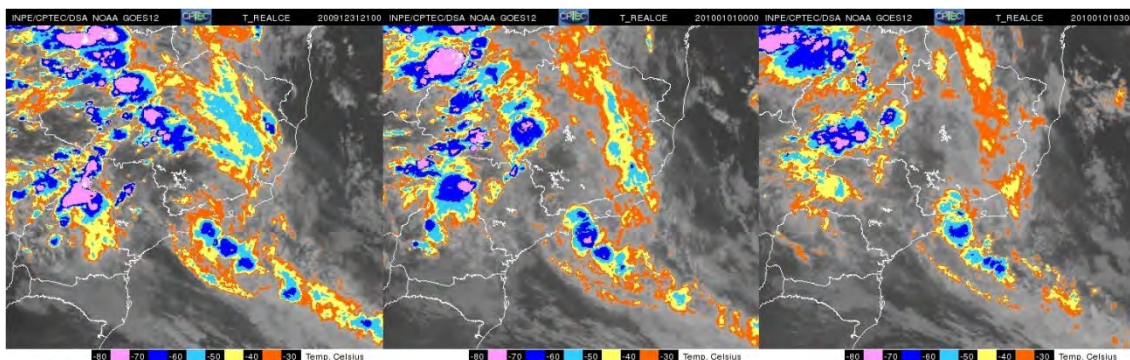


Figura 4.1 – Imagens de satélite do GOES-12 realçada no infravermelho da América do Sul (a) e setorizada (b) dos dias: 31/12/2009 às 21:00Z (esquerda), e 01/01/2010 às 00:00Z (centro) e 03:00Z (direita). (Fonte: CPTEC-INPE).

4.1 Análise sinótica

A presença de um sistema de baixa pressão em superfície persistiu sobre o Oceano Atlântico, próximo a costa do Estado do Rio de Janeiro, a partir do dia 30 de Dezembro de 2009 até o dia 1 de Janeiro de 2010 (Figura 4.2). Este sistema induz a convergência de massa nas camadas mais baixas da troposfera, favorecendo o mecanismo de levantamento sobre a área próxima do Estado de Rio de Janeiro. Uma frente fria associada a um ciclone extratropical que se deslocava sobre o sul do Oceano Atlântico se acoplou com o esse sistema de baixa pressão, aumentando a banda de nebulosidade em direção ao litoral do Estado do Rio de Janeiro. Pela Figura 4.2, nota-se que a estrutura desse sistema de baixa pressão era praticamente barotrópica, sendo que sua camada inferior (espessura 500/1000) não possuía um núcleo tipicamente frio, característico de um típico ciclone extratropical. Em altos níveis, a 250 hPa, os jatos subtropicais e polares estiveram situados sobre o norte da Argentina e do Chile, e suas presenças não interferiram diretamente.

Notam-se a presença da Alta da Bolívia (AB) sobre o Estado de São Paulo, onde sua circulação estava mais configurada no dia 31 de Dezembro as 00Z, e do VCAN sobre o Oceano Atlântico, a leste da região nordeste brasileira. A Alta da Bolívia intensifica a divergência de massa nesse nível e auxilia também no mecanismo de levantamento do ar na superfície. A influência do movimento desse sistema em altos níveis e do VCAN favoreceram também no fluxo horizontal de convergência de umidade em direção a região sudeste brasileira, evidenciada pela formação de nebulosidade observada na Figura 4.1. Sobre níveis médios, a 500 hPa, não há gradiente significativo de geopotencial centrado entre os Estados de São Paulo e Rio de Janeiro, ou seja, a circulação ciclônica não se estendeu até esse nível, justificando que a baixa pressão foi um sistema isolado em baixos níveis.

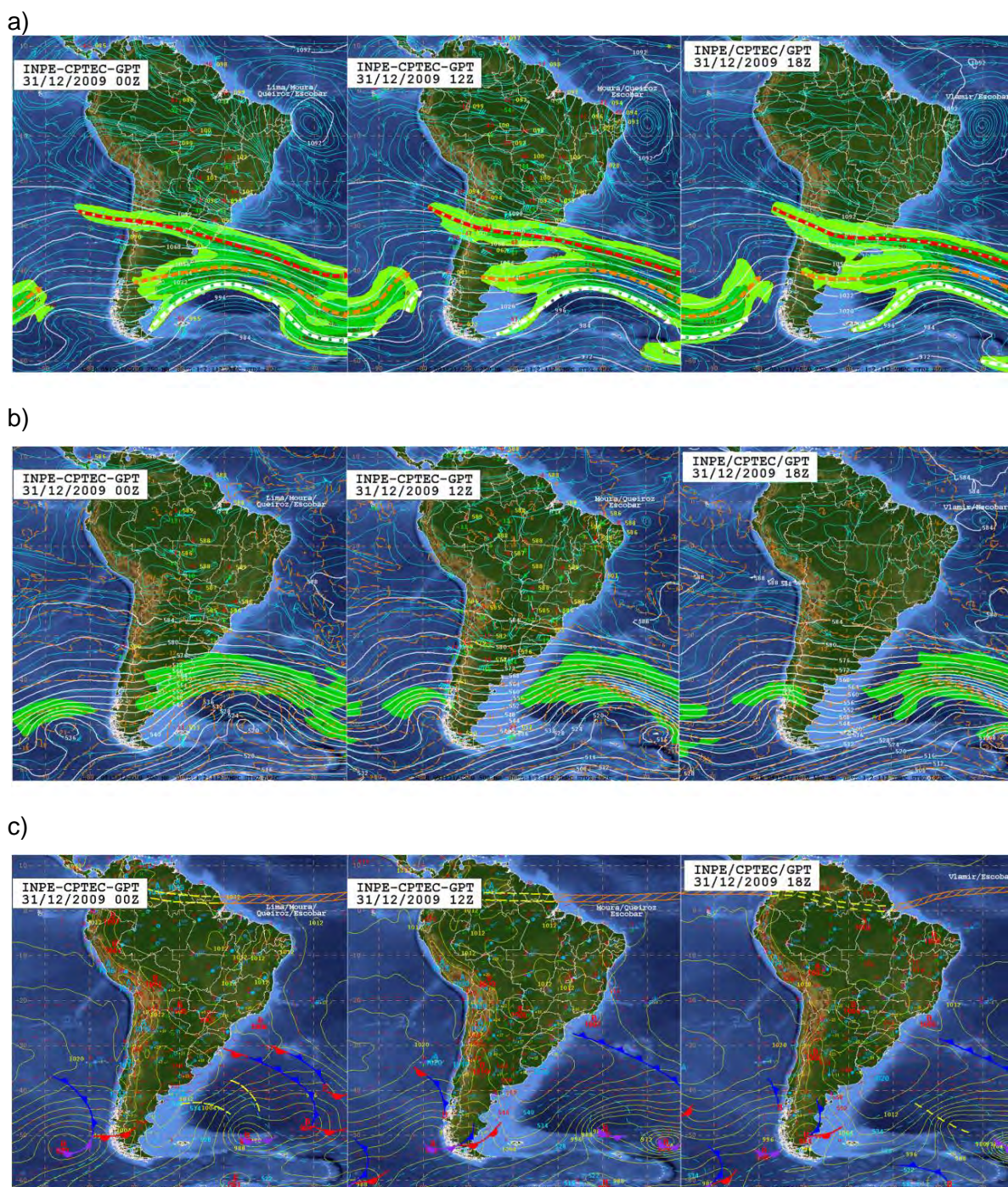


Figura 4.2 – Cartas sinóticas do dia 31 de Dezembro de 2009 às 00Z, 12Z e 18Z, centradas na América do Sul em 250 hPa (a), com linhas de corrente de vento, destacando jatos de altos níveis, campos de pressão; 500 hPa (b), com linhas de corrente, campos de pressão; 850 hPa (c), com campos de pressão e espessura do geopotencial (Fonte: CPTEC-INPE).

4.1.1 Umidade específica e relativa

As Figura 4.3 mostram a variação no campo de umidade específica do ar no nível de 850 hPa sobre a América do sul no dia 31 de Dezembro das 06Z até 18Z, utilizando os campos plotados a partir das reanálises do ERA-interim. Em latitudes médias, nota-se a intensa convergência de umidade específica sobre o Oceano Atlântico Sul até próximo à costa do Sudeste do Brasil, evidenciando a presença da frente fria. Observa-se que próximo ao Estado do Rio de Janeiro, há uma área com um máximo de umidade específica durante os últimos dias do mês, indicando a presença de sistemas que causam convergência de umidade em baixos níveis. Estes sistemas estão relacionados com a baixa pressão barotrópica (Figura 4.2) e os sistemas convectivos, que estão associados com a frente fria sobre o Atlântico.

Os altos valores de umidade relativa do ar na baixa troposfera estão presentes em grande parte do território brasileiro, sendo observados valores acima de 90% sobre o Estado do Rio de Janeiro indicando saturação na atmosfera nesse nível, como são mostrados na Figura 4.4. O aumento do gradiente de umidade relativa e o processo de organização de seus campos ao longo do período mostram que a frente fria está se intensificando e, desta maneira, aumentam as atividades convectivas, causando chuvas intensas nas regiões em que estão na passagem desta frente fria.

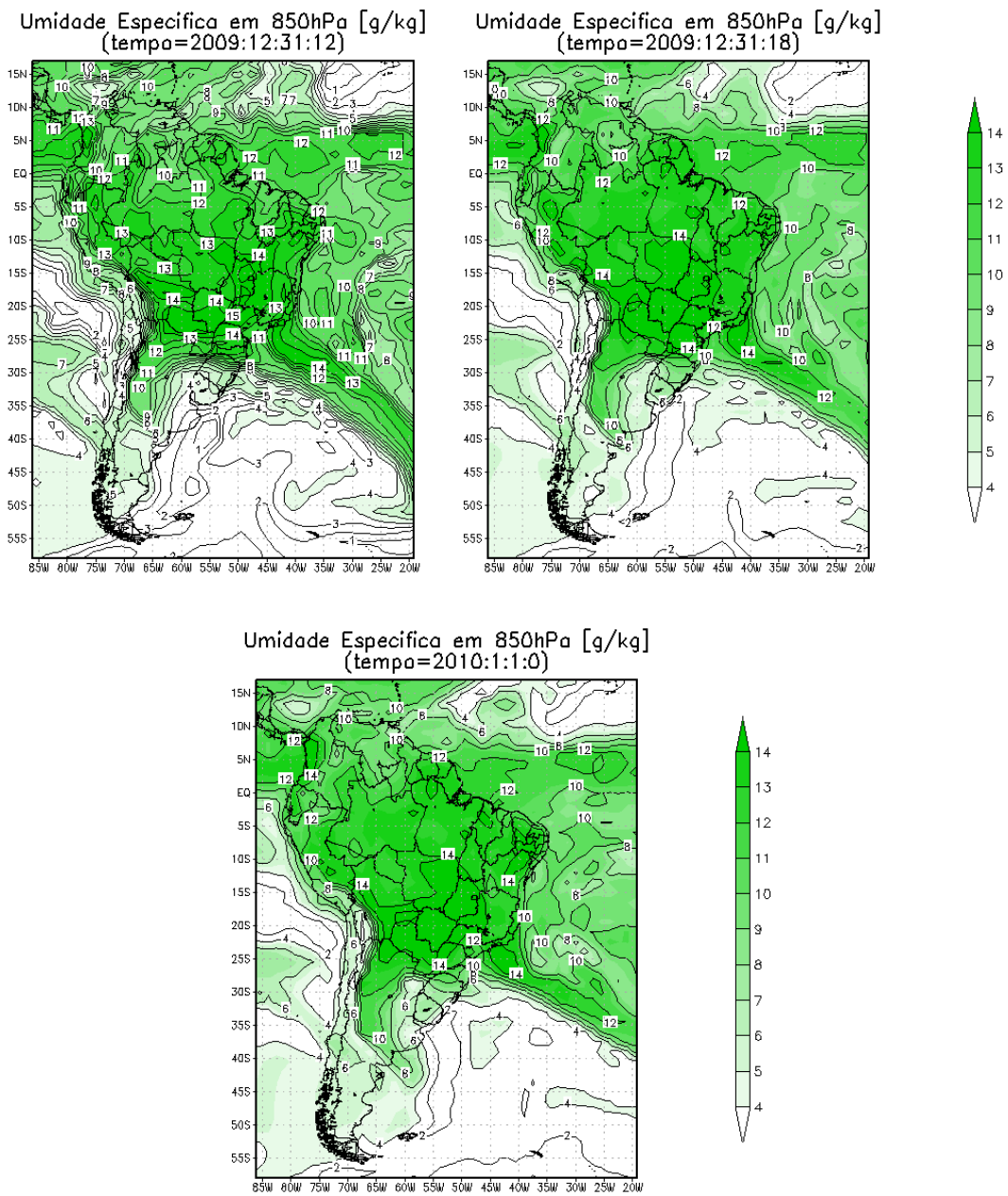


Figura 4.3 – Umidade específica do ar (g/kg) em 850 hPa nos dias 31 de Dezembro de 2009 às 12Z e 18Z, e 1 de Janeiro de 2010 às 00Z.

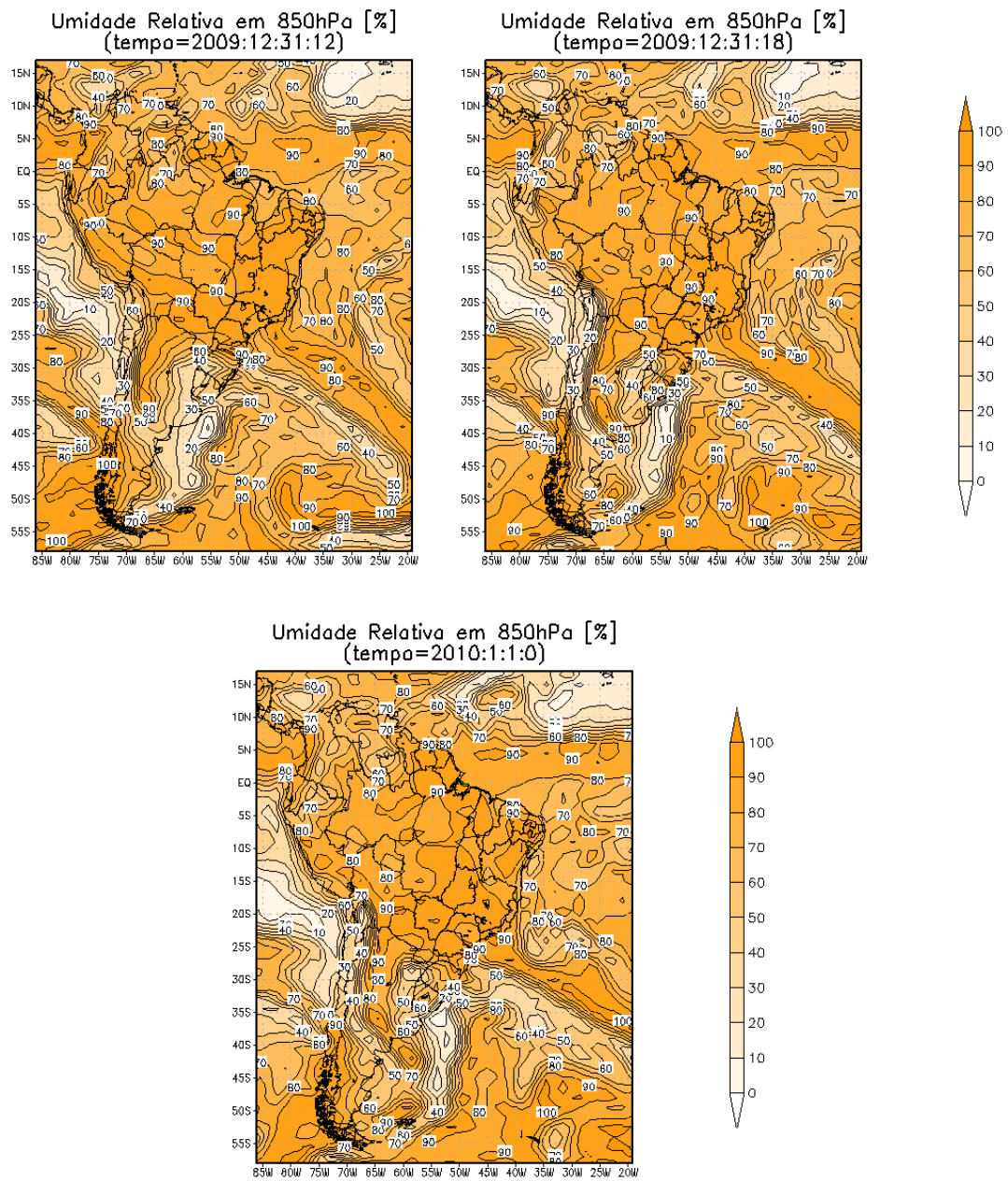


Figura 4.4 – Umidade relativa do ar (%) em 850 hPa nos dias 31 de Dezembro de 2009 às 12Z e 18Z, e 1 de Janeiro de 2010 às 00Z.

4.1.2 Escoamento horizontal e vertical

Os campos de movimento vertical (Divergência do Vento e Omega) e linhas de corrente em altos níveis contribuem na identificação de áreas com movimentos ascendentes que são propícias para formação de sistemas convectivos que causam essas chuvas intensas.

Na Figura 4.5, observa-se um campo com altos valores de divergência do vento em 250 hPa a leste da AB, principalmente sobre a região central do Brasil e na região próxima ao sul de Minas Gerais, no dia 31 de Dezembro as 18Z, que indica a presença de intensa atividade convectiva e aquecimento latente da alta troposfera. A presença do VCAN sobre o Atlântico Sul pode também ser um fator que contribuiu para os movimentos ascendentes naquela região a partir dos movimentos ascendentes que são induzidos nas bordas desse sistema (Figura 4.1).

À medida que a AB e o VCAN vão se configurando, essa convergência em baixos níveis vai se intensificando e deixando a região mais instável, favorecendo aos movimentos ascendentes. A presença de um Anticiclone do Atlântico Sul (AT), localizado ao sul do VCAN como observada na Figura 4.5, é considerada também como um dos fatores que contribuem para o aumento de nebulosidade e chuva na região sudeste. Este padrão está geralmente associado à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (VALVERDE RAMÍREZ, 1997; VALVERDE BRAMBILA, 2004).

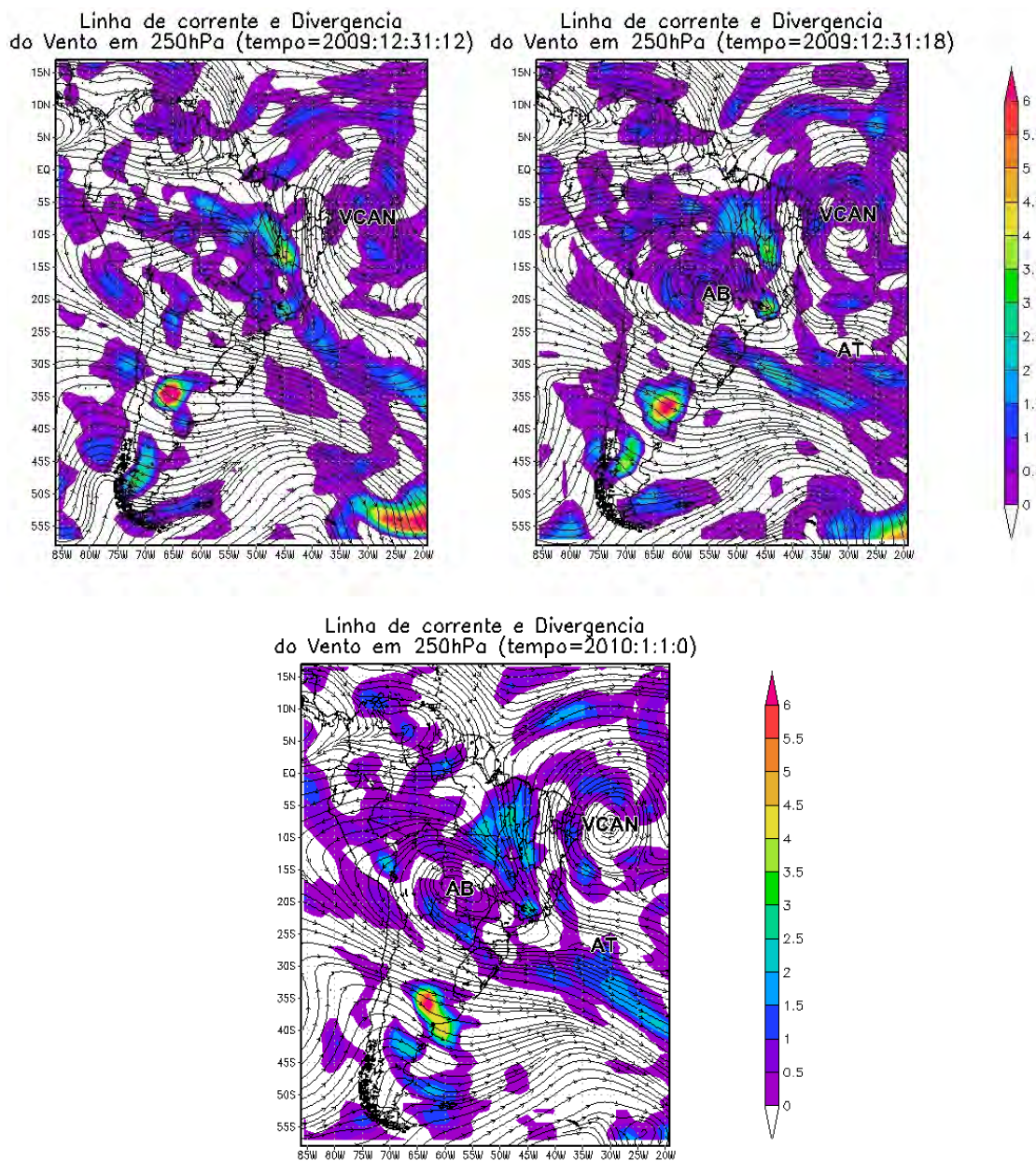


Figura 4.5 – Linha de corrente (m/s) e Divergência do vento ($10^{-5}/s$) em 250 hPa do dia 31 de Dezembro de 2009 às 12Z e 18Z, e 1 de Janeiro de 2010 às 00Z.

Em superfície, na Figura 4.6, a passagem da frente fria pode ser identificada pela alta intensidade e variação da direção dos ventos, além do forte gradiente de temperatura (Figura 4.1) que é a principal característica desses sistemas. Os intensos ventos alísios, que vêm do Oceano Atlântico, penetram no

continente pelo norte da Amazônia e obtêm maior quantidade vapor d'água. Estes ventos são redirecionados em direção a sudeste ao encontrar a região dos Andes, se deslocando em direção à região central do Brasil na forma de uma massa de ar quente e úmida transportando essa umidade desde a Amazônia em direção ao sudeste do país.

Sobre o sul do Estado do Rio de Janeiro, há uma pequena área, indicada em uma circunferência preta na Figura 4.6, apontando valores mais negativos de Omega. Ao redor desta área, percebe-se que há convergência e giro ciclônico do vento, indicando que seja o sistema de baixa pressão que atua na formação de nuvens, e persiste no mesmo local, acumulando a chuva por vários dias.

4.2 Análise a partir do radar meteorológico

As imagens de radar meteorológico do Pico do Couto, na Figura 4.7 com frequência a cada 3 horas, mostram alta refletividade que se manteve sobre o sul do Estado do Rio de Janeiro, onde está localizada a cidade de Angra dos Reis. Existem pequenas áreas com refletividade acima de 35 dBZ quando são visualizados no plano horizontal e são melhores observadas no perfil vertical. Existem vários critérios para identificar os tipos de chuva através da refletividade. Um dos critérios dado por Steiner (1995) cita que qualquer ponto de grade com refletividade superior a 40 dBZ é considerada como chuva convectiva. Apesar da presença da alta refletividade sobre a região, a banda brilhante esteve atuando ao longo do período do caso (31 de Dezembro de 2009), complementando a alta quantidade de precipitação acumulada observada pela estação de Angra dos Reis (Torre A) no mesmo período.

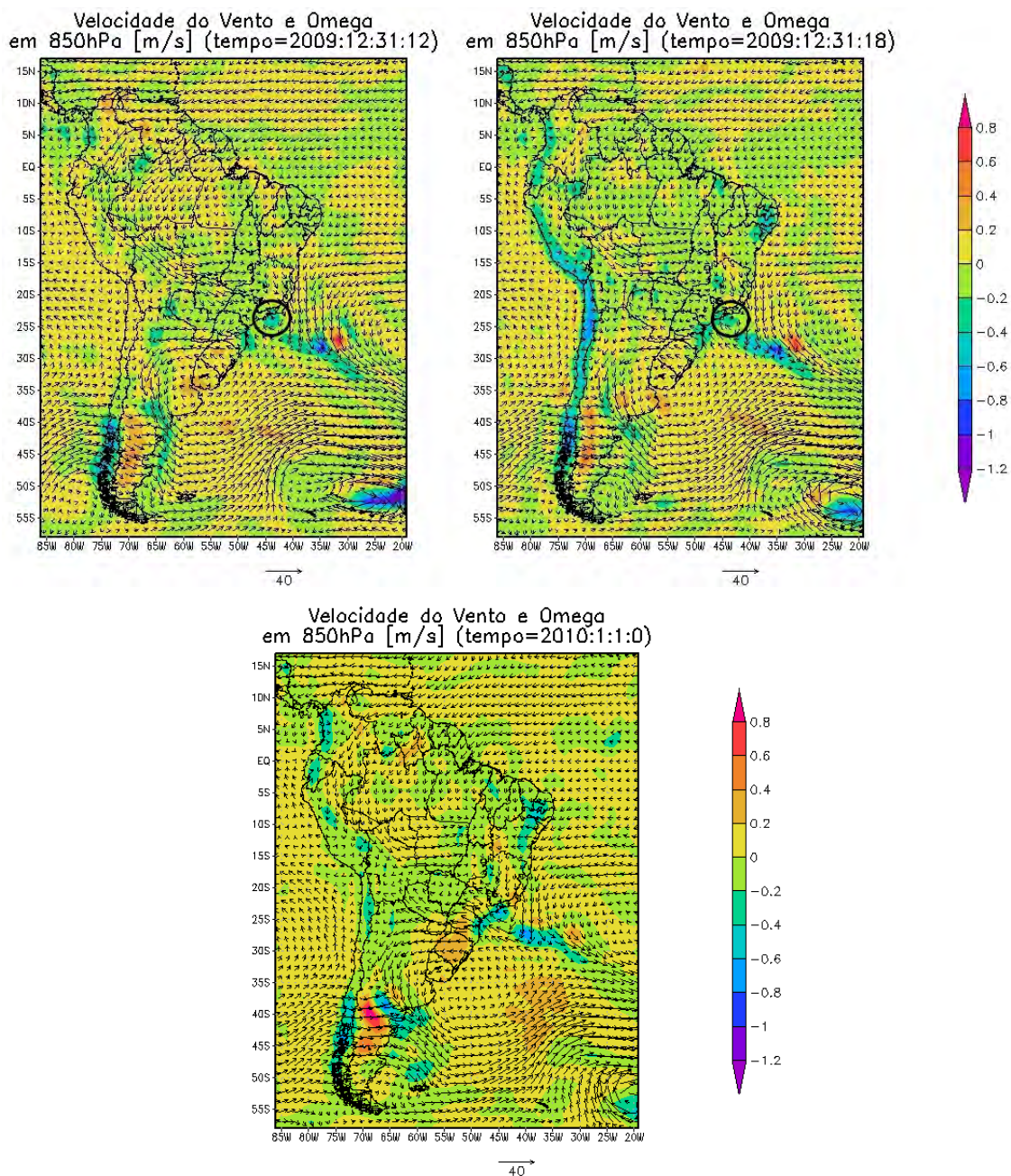


Figura 4.6 – Omega (Pa/s) e vento em 850 hPa do dia 31 de Dezembro de 2009 às 12Z e 18Z, e 1 de Janeiro de 2010 às 00Z.

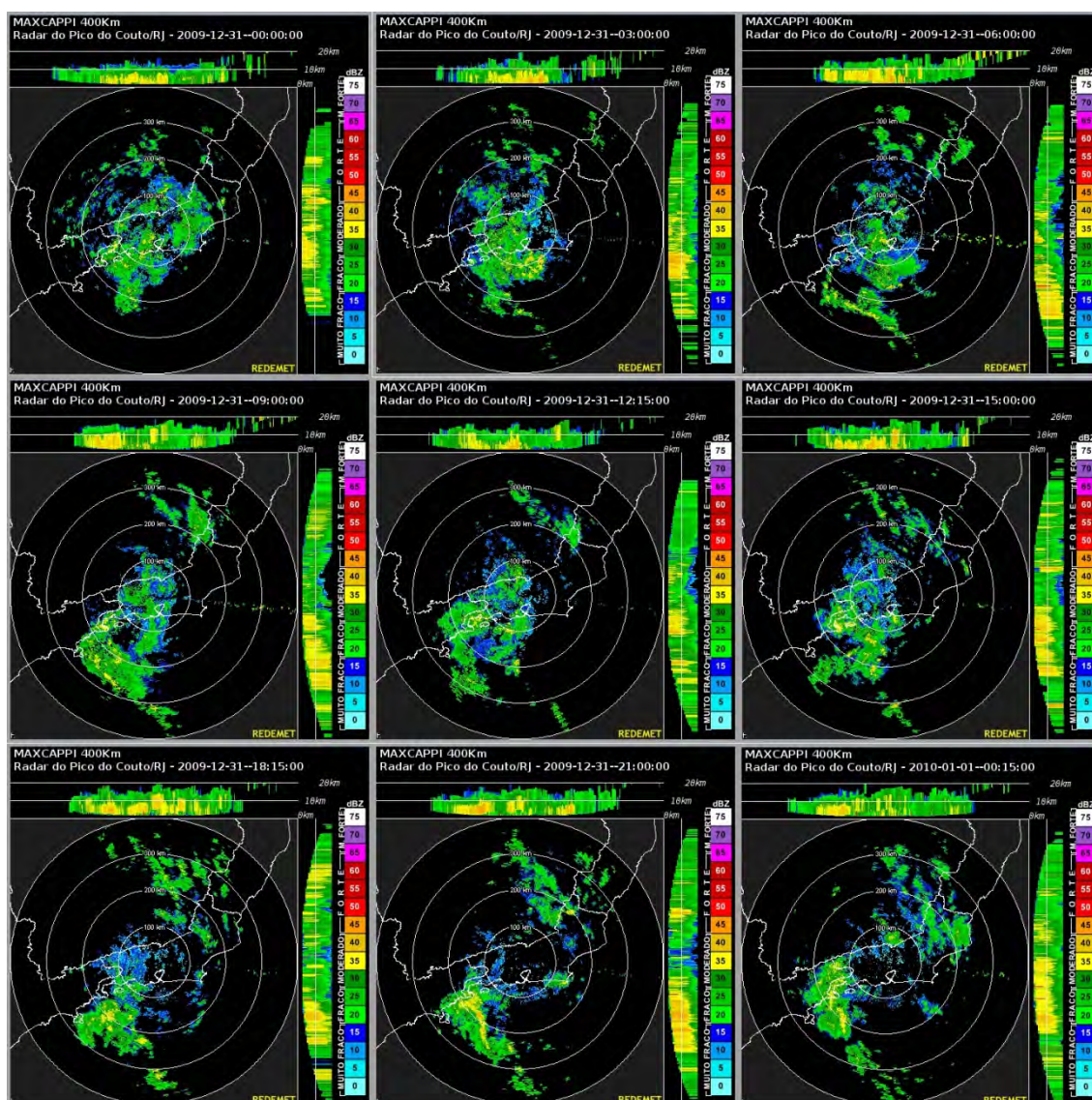


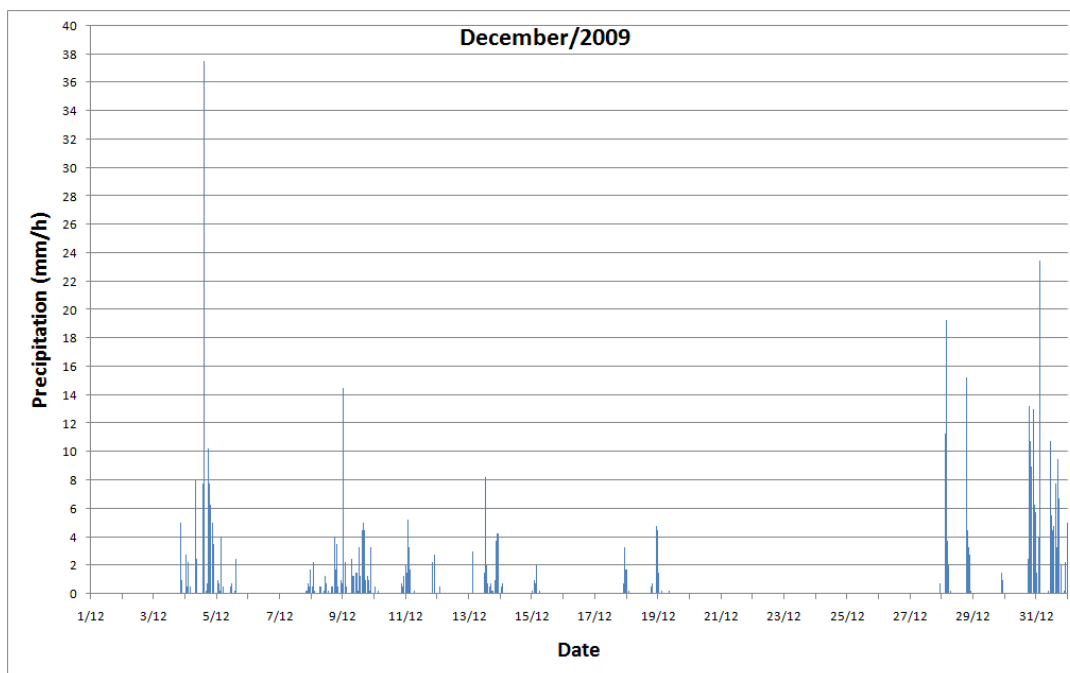
Figura 4.7 – Imagens de radar do Pico do Couto desde o dia 31 de Dezembro de 2009 (00Z) até o dia 01 de Janeiro de 2010 (00Z) com frequência de 3 horas. (Fonte: REDEMET)

4.3 Precipitação observada

Em época de verão, entre Dezembro, Janeiro e Fevereiro, a chuva costuma ocorrer no final da tarde diariamente em casos onde não há influências diretas de sistemas sinóticos como ZCAS ou frentes frias que alteram o regime pluviométrico da região sul-sudeste do Brasil (ROCHA et al., 1996).

As séries temporais de precipitação acumulada de hora em hora em Angra dos Reis são apresentadas para melhor análise do comportamento do ciclo diurno de chuva nesses meses de verão, num período de Dezembro de 2009 até Janeiro de 2010. No final de Dezembro de 2009 (Figura 4.8.a), que corresponde ao período do caso, a maior quantidade de chuva ocorreu no período noturno. Além da chuva constante que ocorreu do dia 28 até o final do mês de Dezembro, tiveram outras frequências mais relevantes de chuva no começo do mês, como entre os dias 3 e 5 e entre os dias 8 a 10, onde a maior chuva acumulada no mês foi de 37.5 mm em uma hora no dia 4 de Dezembro. Ocorreram poucos dias de chuva no mês de Janeiro de 2010 (Figura 4.8.b) e o maior pico de chuva registrado no primeiro dia do mês, no período da noite também, com 18.2 mm de chuva acumulada em uma hora. Em relação às séries temporais de Dezembro, o mês de Janeiro teve a menor frequência diária de chuva.

a)



b)

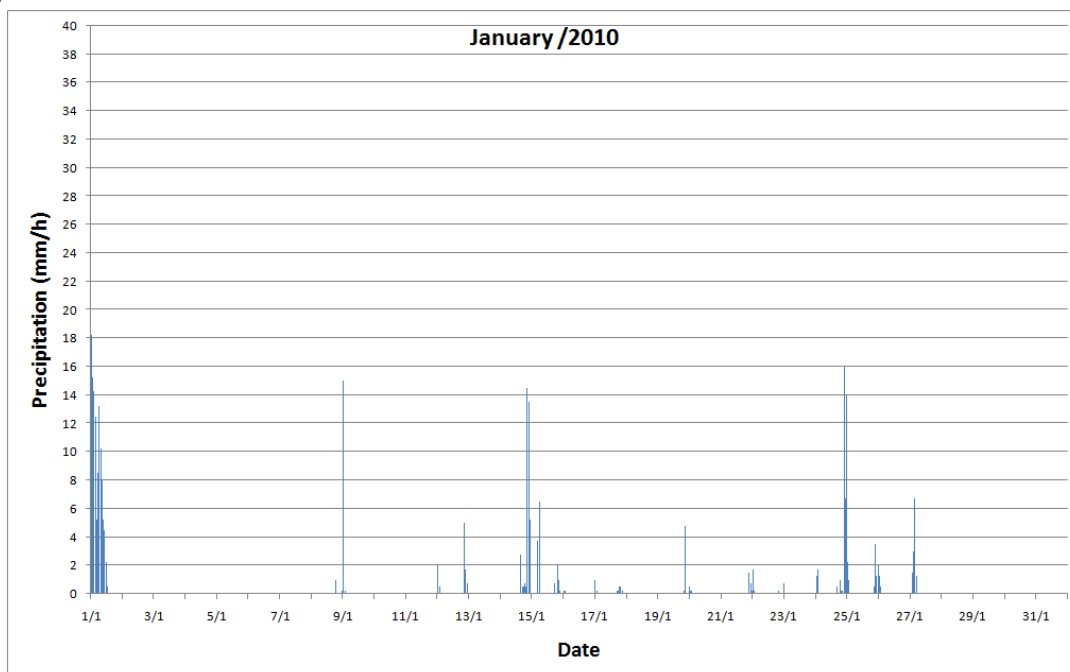


Figura 4.8 – Séries temporais de precipitação acumulada (mm/h) para os meses de (a) Dezembro de 2009 e (b) Janeiro de 2010 para estação de Angra dos Reis.

5 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Nesta seção serão apresentados os resultados dos experimentos numéricos realizados com o modelo Eta sobre a região da Serra do Mar. As simulações produzidas pelo modelo são analisadas em pontos específicos do domínio, que correspondem às estações de Angra dos Reis, Cunha e Santa Virgínia. As altitudes de cada estação obtidas nas simulações do modelo são: 58, 961 e 905 m, respectivamente.

Os dados de temperatura, precipitação e vento previstos pelo modelo são analisados e comparados com os dados observacionais a partir de séries temporais, num período de 14 dias (entre 20 de dezembro de 2009 e 2 de janeiro de 2010) e ciclo diurno médio, que é calculada pela média aritmética da medida dos dados de cada variável em cada horário, representadas graficamente em um período de 24 horas.

5.1 Experimento M1

Este experimento consiste em analisar o desempenho do modelo Eta com o aumento da resolução horizontal de 5 km para 3 km. Espera-se que o modelo obtenha uma melhor representação da temperatura a 2 m e principalmente dos padrões observados da precipitação, tendo em vista que a variável precipitação é de difícil previsão. Aqui é explorado como o aumento da resolução horizontal impacta na acurácia da representação da chuva no ciclo diurno pelo modelo Eta na região da Serra do Mar.

5.1.1 Angra dos Reis

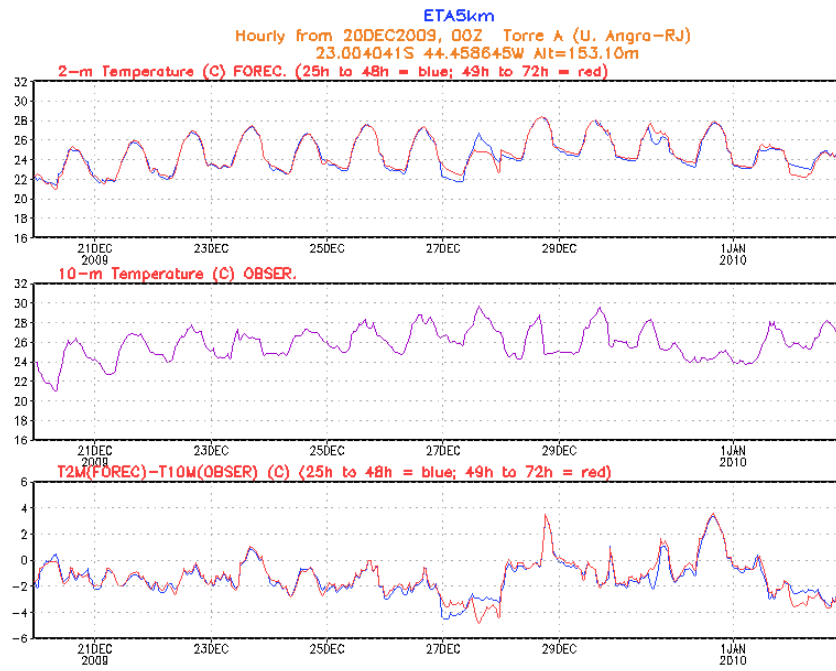
Na Figura 5.1.a, a série temporal com temperaturas em 2 m previstas com Eta-5km representaram seus picos de máxima e mínima adequadamente em cada horário e correspondendo com as curvas de temperatura observada de Angra dos Reis. As maiores diferenças de temperatura entre os intervalos de

previsões (25-48h e 49-72h) foram observadas no ciclo diurno do Eta-3km (Figura 5.1.b).

Houve um declínio de temperatura máxima e na amplitude térmica a partir do dia 31 de Dezembro na série temporal dos dados de observação. Nesse período, a presença de sistemas convectivos persistiu sobre a região de Angra dos Reis, causando alto índice de chuva, (Figura 4.1). As previsões do Eta-3km de intervalo 49-72h tiveram uma melhor representação para registrar essa pouca variação de temperatura no ciclo diurno.

No ciclo diurno médio da temperatura em 2 m (Figura 5.2), onde foi feita a média é dos 14 dias de análise, as previsões de 25-48 horas e de 49-72 horas foram semelhantes, em ambas as resoluções (5 e 3 km) mostrando o pico de máxima temperatura em torno das 15 horas UTC. O aumento de temperatura nas observações teve início aproximadamente às 9 horas UTC, porém, o modelo adiantou esse aumento da temperatura em uma hora. O Eta-3km mostrou maior variação de amplitude de temperatura que o Eta-5km durante o ciclo diurno médio e suas máximas temperaturas se adequaram melhor com as observações.

a)



b)

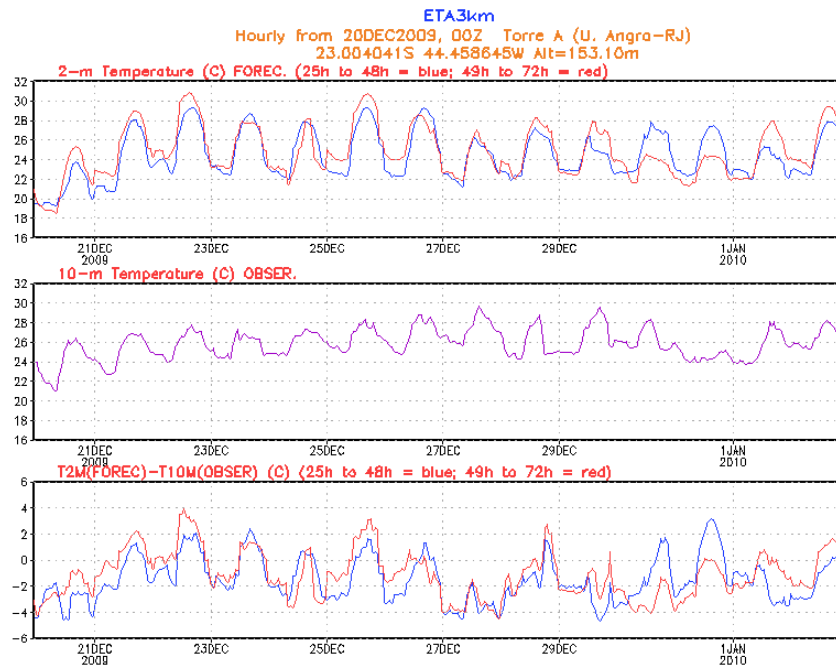


Figura 5.1 - Séries temporais da temperatura a 2 m previstas pelo Eta-5km (a) e Eta-3km (b), nos intervalos de 25-48h (azul) e 49-72h (vermelho) e observadas a 10 m (roxo) de Angra dos Reis no período de dia 20 de Dezembro 2009 até 02 de Janeiro de 2010.

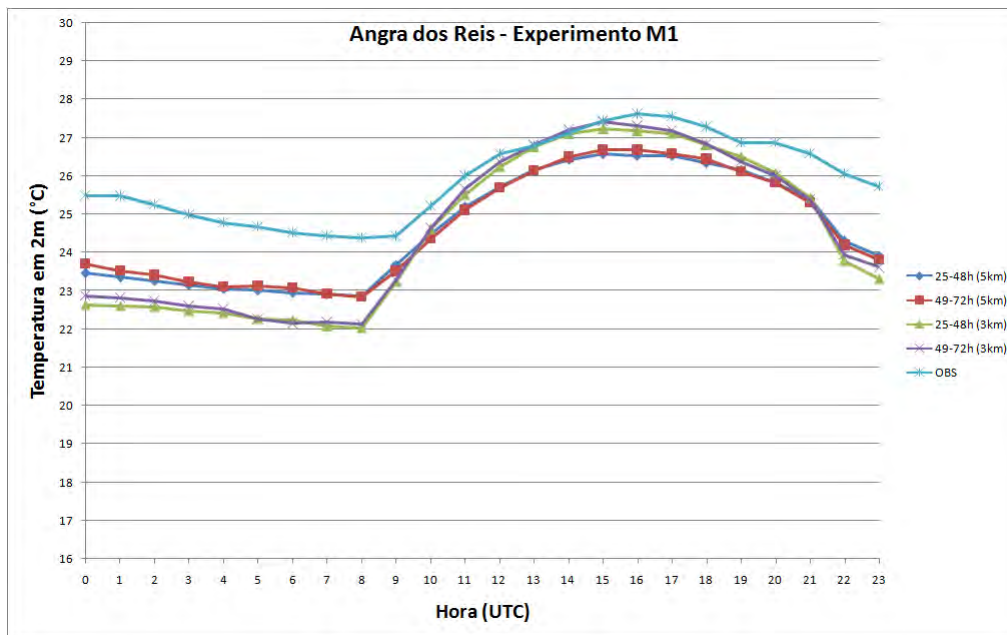
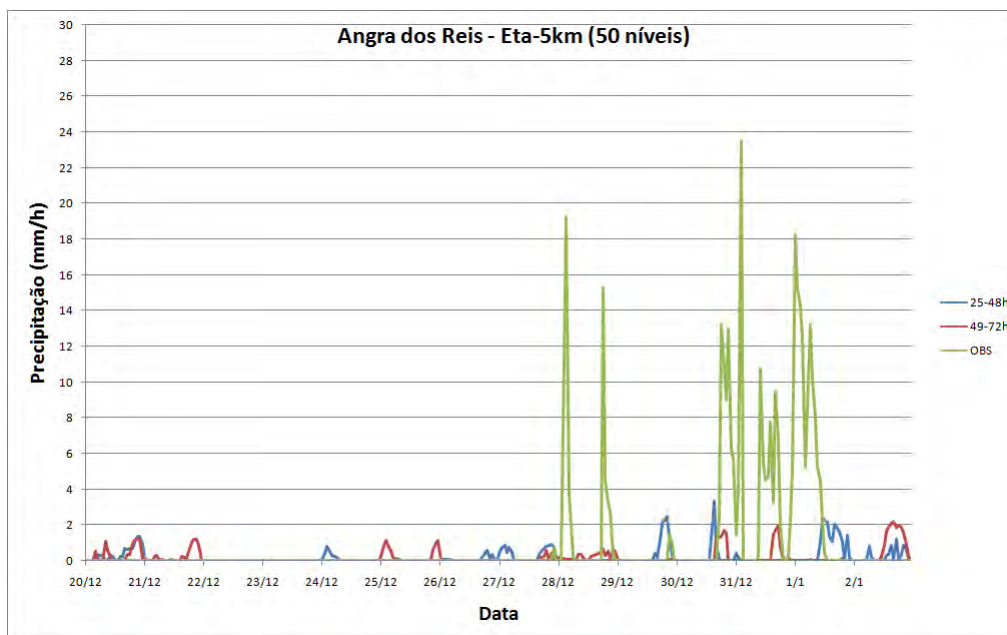


Figura 5.2 – Ciclo diurno médio da temperatura em 2 metros (°C) das previsões de 25-48h e 49-72h com Eta-5 km e Eta-3km, e temperatura observada em 10 m observações obtidas pela estação de Angra dos Reis.

As duas séries temporais de precipitação acumulada (Figura 5.3.a e 5.3.b) mostraram vários picos acentuados, com alta taxa de precipitação nos últimos dias de Dezembro. O modelo Eta, com resoluções horizontais de 5 e 3 km e previsões de intervalos de 25-48h e 49-72h, conseguiu representar as chuvas convectivas diárias no mesmo período que ocorreram as chuvas observadas, porém, não foi possível corresponder aos episódios de chuva extremas no final do mês, subestimando a taxa de precipitação. Notou-se que a ocorrência de chuva foi mais frequente no final do período.

a)



b)

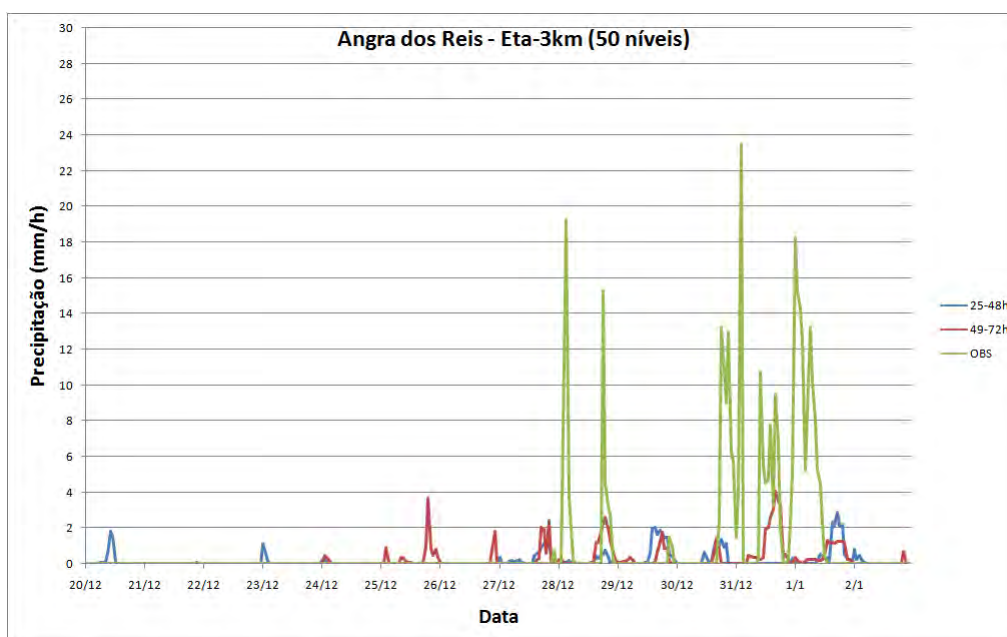


Figura 5.3 – Séries temporais de precipitação acumulada (mm/h) previstas com Eta-5km (a) e Eta-3km (b) e observadas em Angra dos Reis no período de dia 20 de Dezembro 2009 até 02 de Janeiro de 2010.

O ciclo diurno médio da precipitação observada mostrou os picos extremos de chuva no período da noite na Figura 5.4. Estes picos de chuva corresponderam ao período chuvoso no final do ano de 2009 que ocorreu em Angra dos Reis. As previsões do Eta-5km e do Eta-3km não conseguiram representar os picos de precipitação observada, no entanto, ambas tiveram comportamentos parecidos entre si, mostrando aumento de chuva no período da tarde, o que corresponderia ao padrão de ocorrência de chuva durante o verão sobre a região.

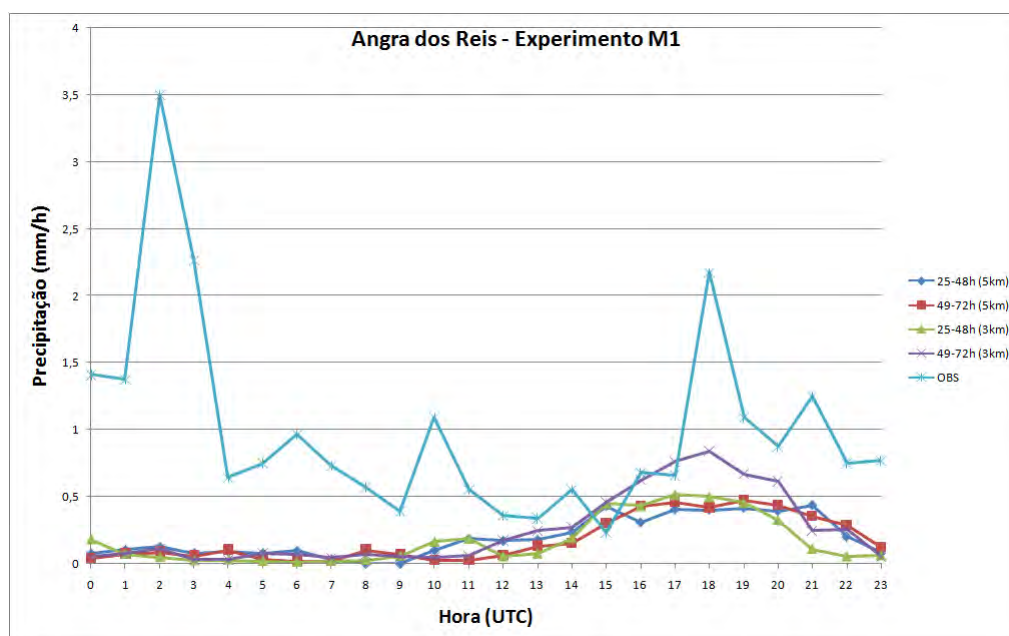
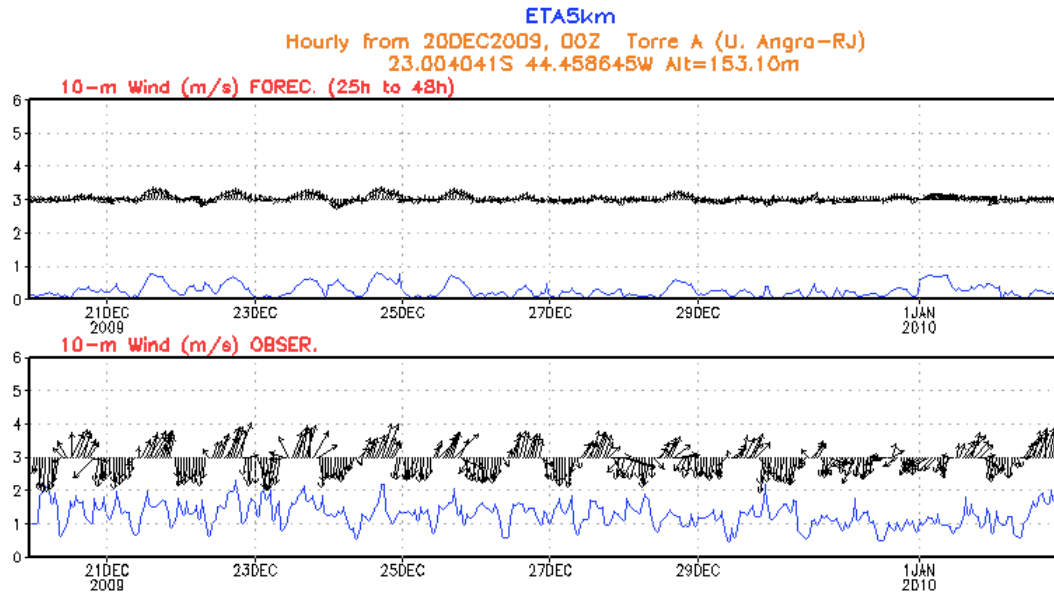


Figura 5.4 – Ciclo diurno médio da precipitação acumulada (mm/h) das previsões de 25-48h e 49-72h com Eta 5 e 3km, e observações obtidas pela estação de Angra dos Reis entre o período do dia 20 de Dezembro 2009 até 02 de Janeiro de 2010.

A região da Serra do Mar sofre efeito de dois sistemas de circulação local: ventos de vale-montanha e as brisas marítimas e terrestres. Essas circulações locais podem ser influenciadas por perturbações sinóticas, apesar de não dependerem delas, e contribuir na intensidade de chuva na região. Assim, é importante analisar a capacidade que o modelo tem em representar o comportamento do dessa circulação para essa região.

Os meteogramas da variação da direção do vento a 10 m do Eta-5km (Figuras 5.5.a e 5.5.b) e do Eta-3km (Figuras 5.6.a e 5.6.b), ambos com resolução vertical de 50 níveis, representaram adequadamente a entrada de brisas marítimas e terrestres e se adequaram ao vento observado. Notou-se que a curva de mudança de direção do vento no Eta-5km está mais organizada em relação ao Eta-3km. O aumento da resolução horizontal intensificou o vento, principalmente de nordeste no período noturno, porém não o suficiente até a intensidade observada pela estação.

a)



b)

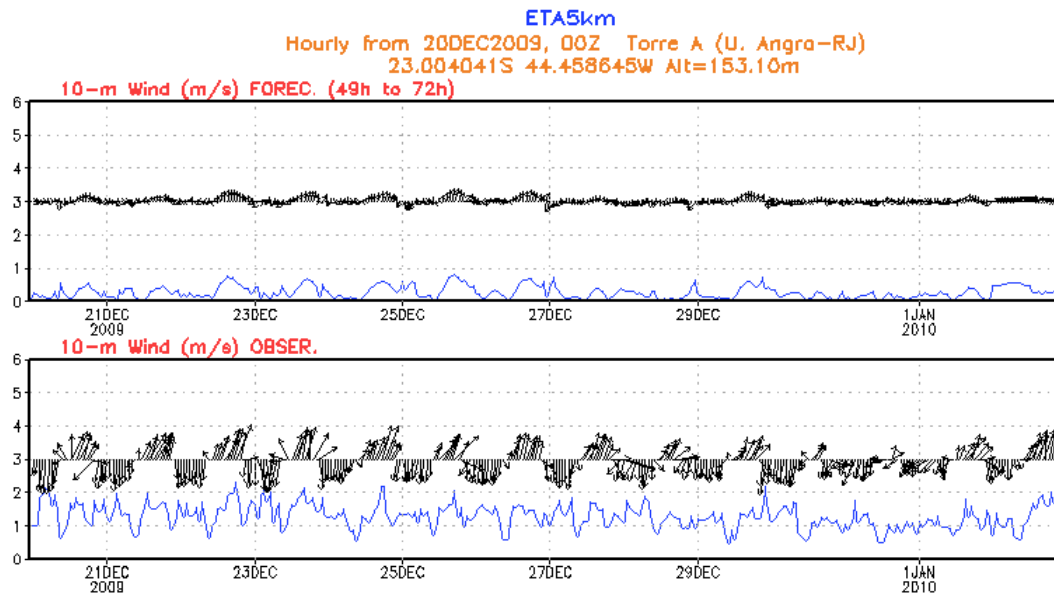
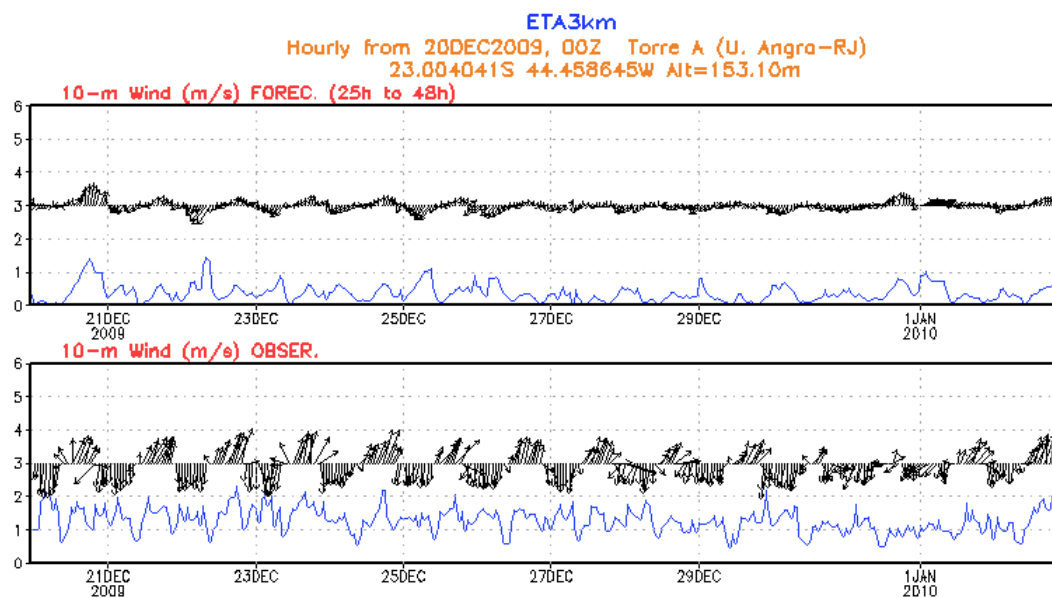


Figura 5.5 – Séries temporais de direção e intensidade do vento em 10 m do Eta-5km, com previsões de 25-48h (a) e 49-72h (b), e as observações em Angra dos Reis.

a)



b)

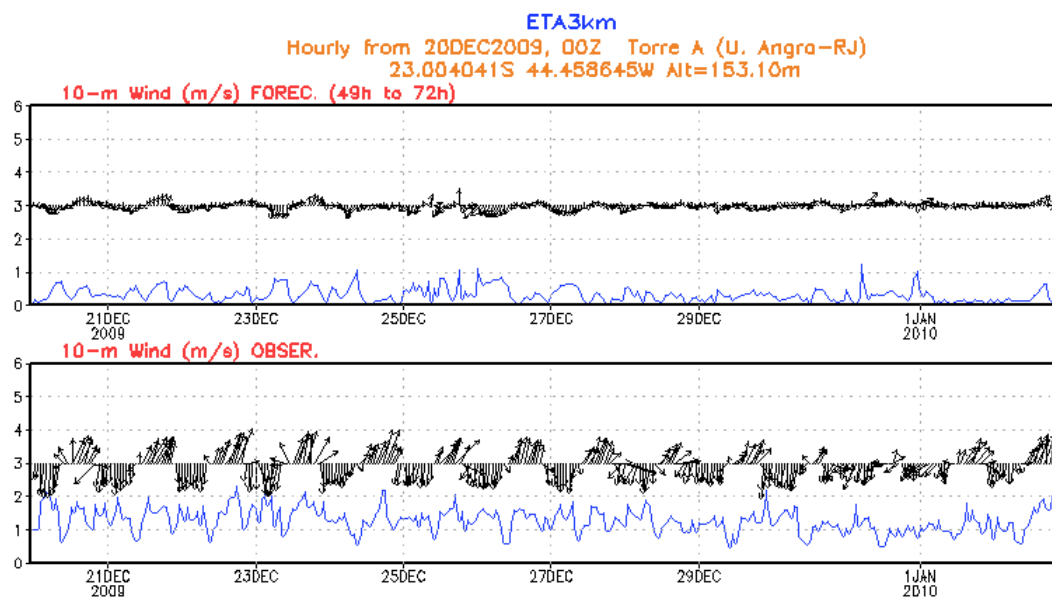


Figura 5.6 – Séries temporais de direção e intensidade do vento em 10 m do Eta-3km em 50 níveis verticais, com previsões de 25-48h (a) e 49-72h (b), e as observações em Angra dos Reis.

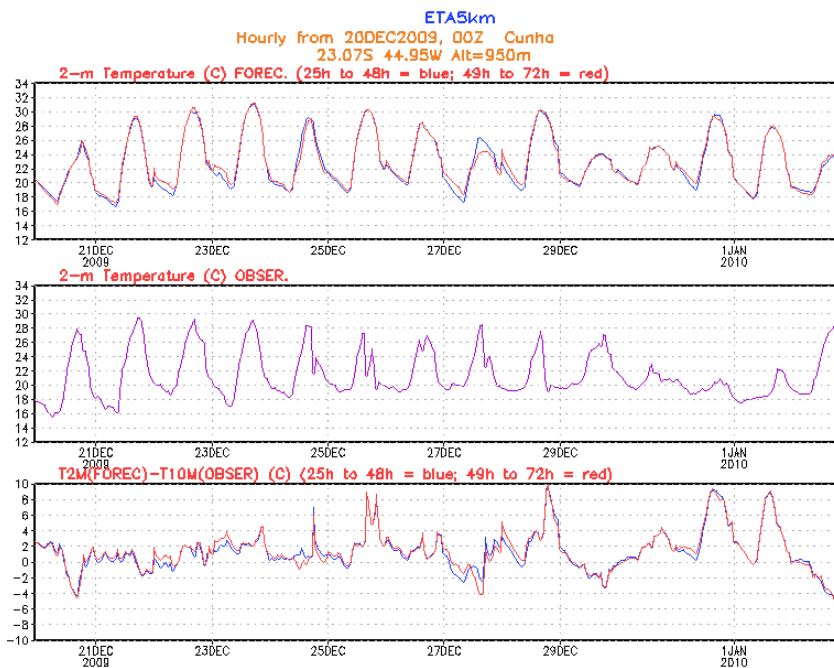
5.1.2 Cunha

O ciclo diurno de temperatura observada em Cunha (Figuras 5.7.a e 5.7.b) teve o mesmo comportamento do ciclo diurno observado em Angra dos Reis, indicando o declínio da máxima temperatura em 10 m e da amplitude térmica entre os dias 30 a 31 de Dezembro de 2009. As previsões do Eta-5km adiantaram essa queda de temperatura, mostrando entre os dias 28 a 30 de Dezembro. Para o Eta-3km, cada intervalo de previsão teve comportamento diferente, onde as previsões de 25-48h exibiram queda de temperatura a partir do dia 23 de Dezembro e as previsões de 49-72h a partir do dia 26 de Dezembro.

As previsões do ciclo diurno médio da temperatura para estação de Cunha foram bem representadas em relação às observações, havendo concordância no aumento da temperatura (Figura 5.8).

As distribuições de chuva previstas do Eta-5km e do Eta-3km se mostraram diferentes um do outro, como vista nas Figuras 5.9.a e 5.9.b. Os eventos de chuva prevista, pelo Eta-5km, aumentaram à medida que foi prosseguindo até o final de Dezembro, no entanto, as previsões do Eta-3km apontaram melhores distribuições de chuva para cada dia da série. Os horários de ocorrência de chuva foram próximos do observado, praticamente no mesmo período que houve a ocorrência de maior quantidade de precipitação acumulada na estação.

a)



b)

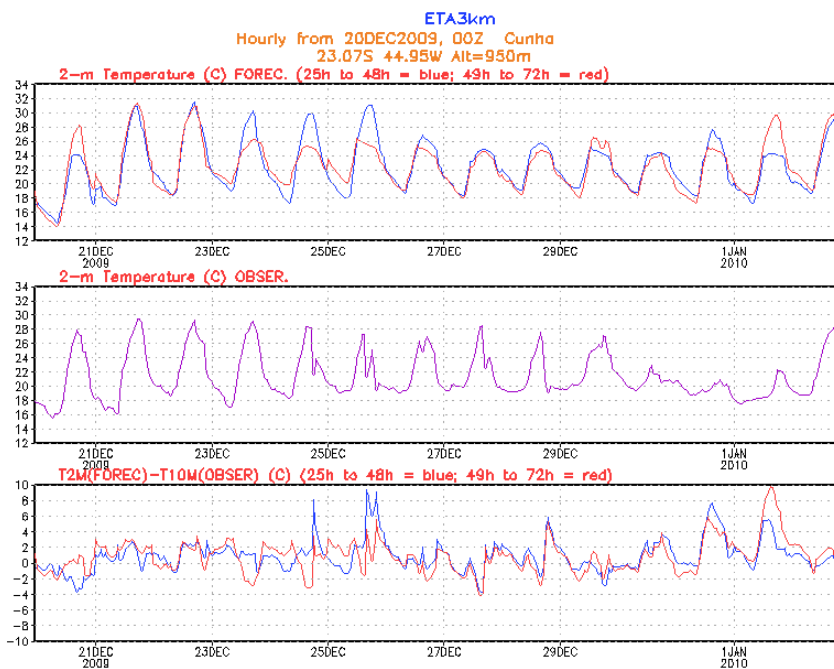


Figura 5.7 – Série temporal de temperatura em 2 m previstas pelo Eta-5km (a) e Eta-3km (b), nos intervalos de 25-48h (azul) e 49-72h (vermelho) de previsão e observação de temperatura em 2 m (roxo) de Cunha do dia 20 de Dezembro 2009 até 02 de Janeiro de 2010.

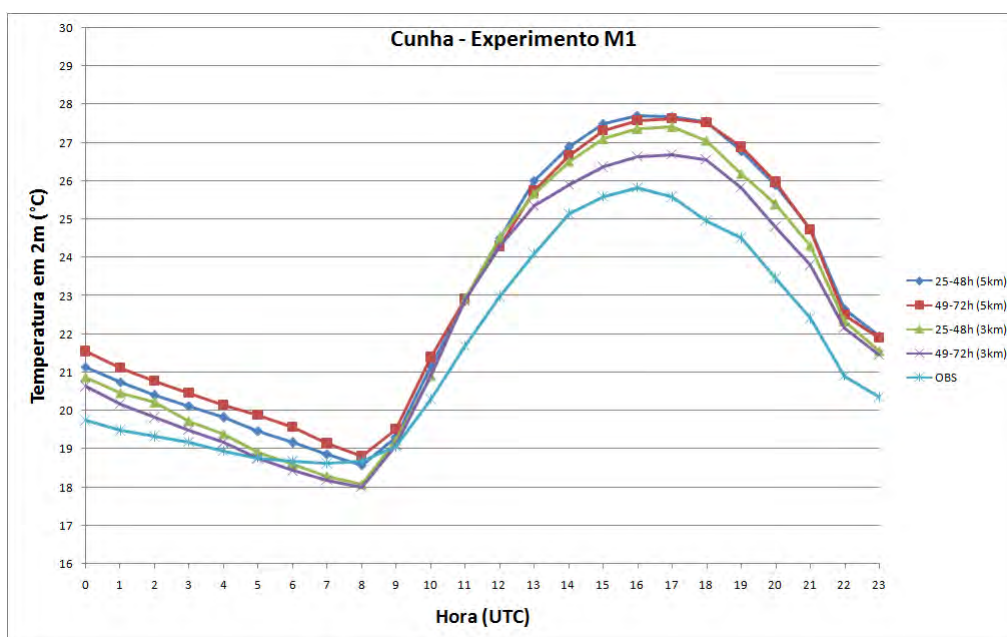
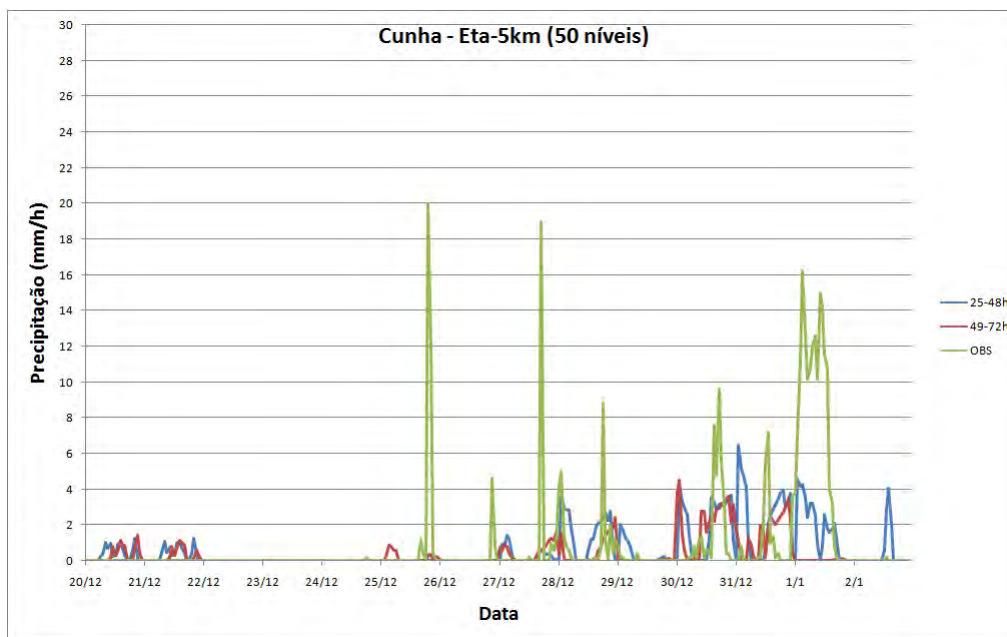


Figura 5.8 – Ciclo diurno médio da temperatura em 2 metros (°C) das previsões de 25-48h e 49-72h do Eta-5 km (a) e Eta-3 km (b), e observações obtidas pela estação da Cunha.

O ciclo diurno médio observado indicou picos mais elevados de chuva no final da tarde (Figura 5.10). O modelo, por sua vez, não conseguiu captar perfeitamente esses picos de chuva, porém, registraram aumento de precipitação acumulada no final da tarde.

a)



b)

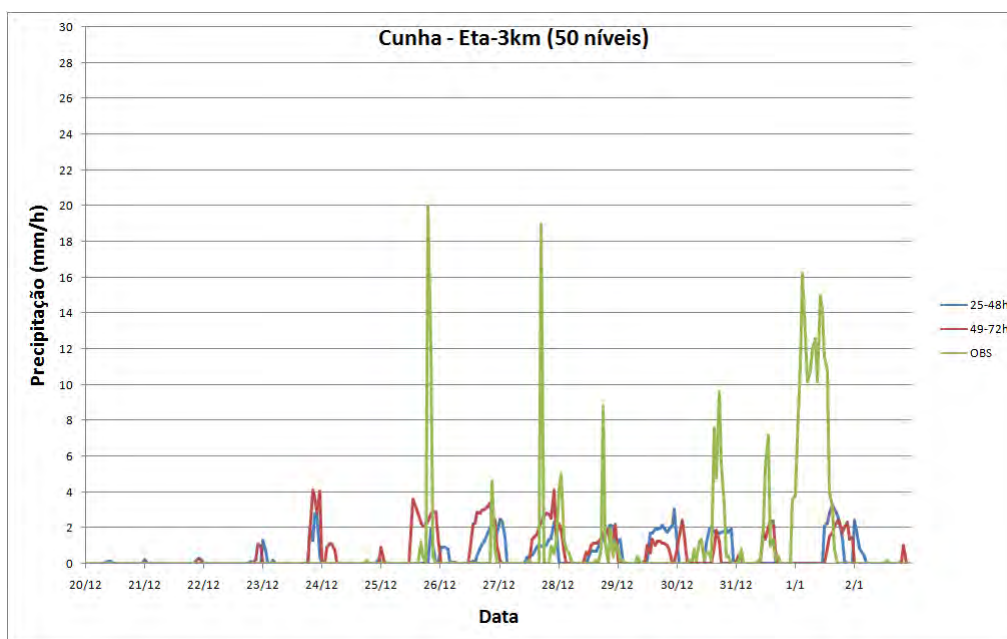


Figura 5.9 – Séries temporais de precipitação acumulada (por hora) observadas e previstas com Eta-5km (a) e Eta-3km (b) do dia 20 de Dezembro 2009 até 02 de Janeiro de 2010 para Cunha.

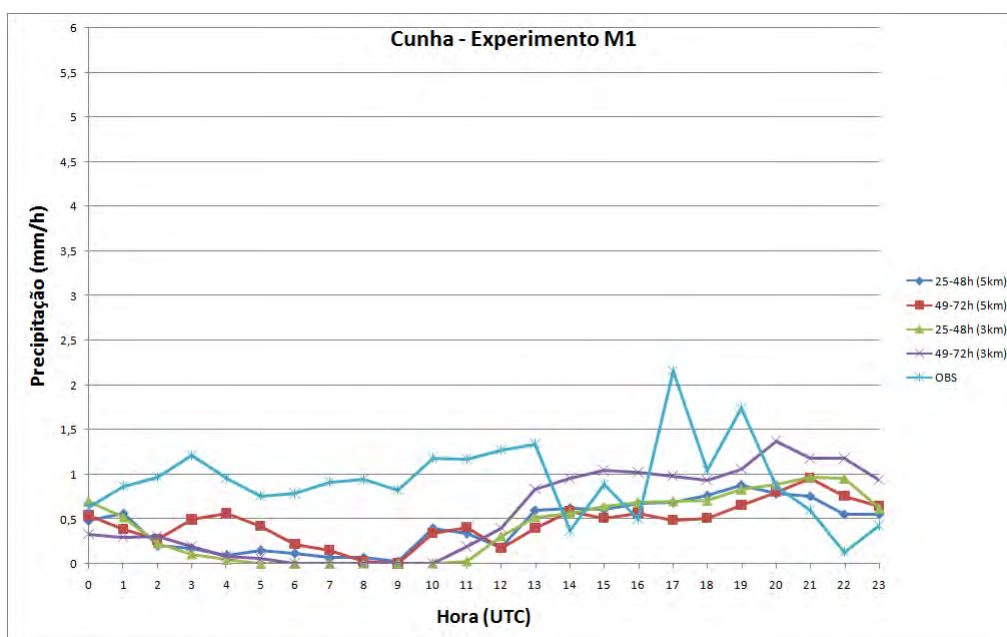


Figura 5.10 – Ciclo diurno médio da precipitação acumulada (mm/h) das previsões de 25-48h e 49-72h do Eta-5 km e Eta-3 km, e observações obtidas pela estação de Cunha.

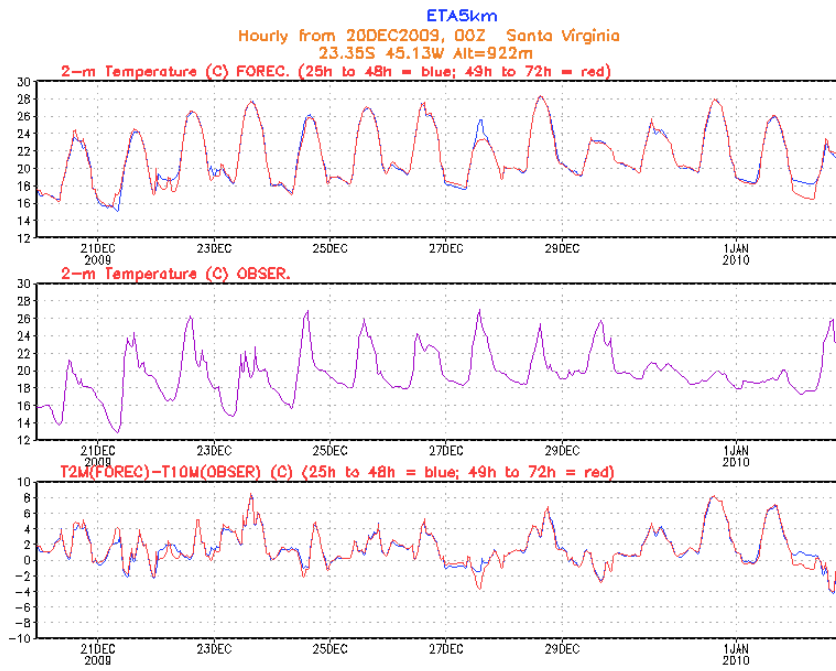
5.1.3 Santa Virgínia

Nas Figuras 5.11.a e 5.11.b, a redução da variação de temperatura em 10 m foi observada também no final do mês de Dezembro. Na representação do ciclo diurno de temperatura, a série temporal de temperatura do Eta-3km se apresentou mais perturbada que a série temporal do Eta-5km. Ambas tiveram dificuldade em prever a redução de temperatura no período entre 30 de Dezembro a 1 de Janeiro, adiando a previsão em 24 horas.

Na Figura 5.12, as temperaturas em 2 m previstas para ambas as resoluções (5 e 3 km), para o ciclo diurno médio, foram superestimadas em relação aos dados observados, mostrando declínio brusco de temperatura a partir das 15 horas UTC. A versão do Eta-3km mostrou um comportamento semelhante do que foi observado, representando esse declínio de temperatura nos mesmos horários.

Assim como as observações das estações de Angra dos Reis e Cunha, o ciclo diurno de precipitação de Santa Virgínia mostrou vários episódios de chuva extrema no final de mês de Dezembro pelas Figuras 5.13.a e 5.13.b,. As previsões do Eta-5km distribuíram as chuvas de forma distinta do Eta-3km. Apesar de o modelo conseguir captar as chuvas do período analisado, em ambas as previsões, de resoluções horizontais 5 e 3 km, não foi capaz em representar bem a taxa de precipitação observada na estação.

a)



b)

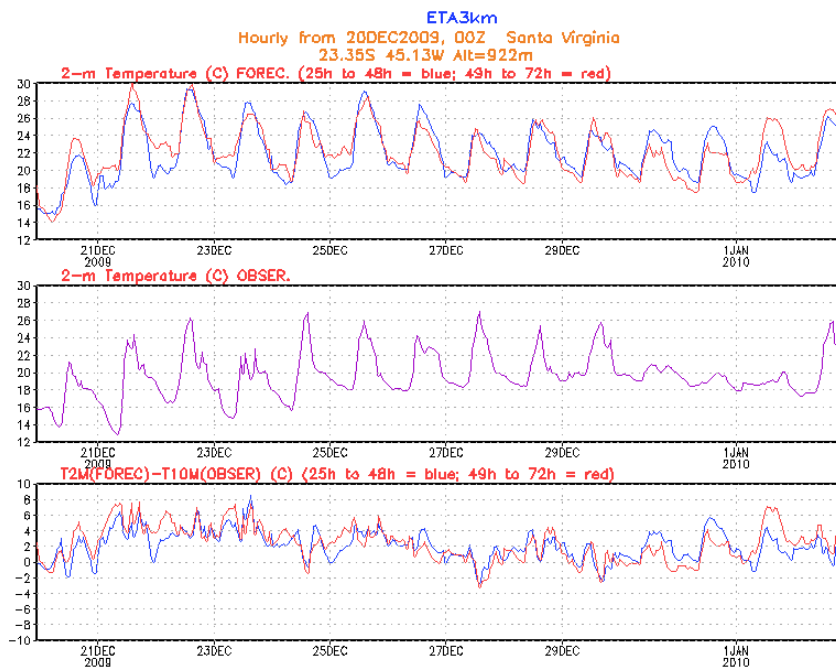


Figura 5.11 – Séries temporais da temperatura em 2 m prevista, do Eta-5km (a) e Eta-3km (b), nos intervalos de 25-48h (azul) e 49-72h (vermelho) e observada (roxo) de Santa Virgínia do dia 20 de Dezembro 2009 até 02 de Janeiro de 2010.

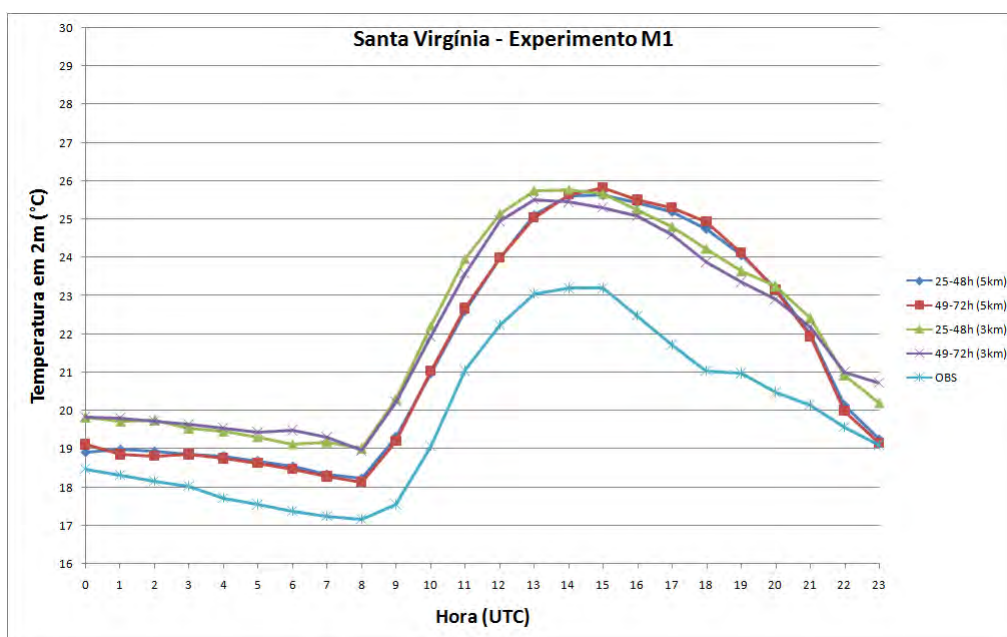
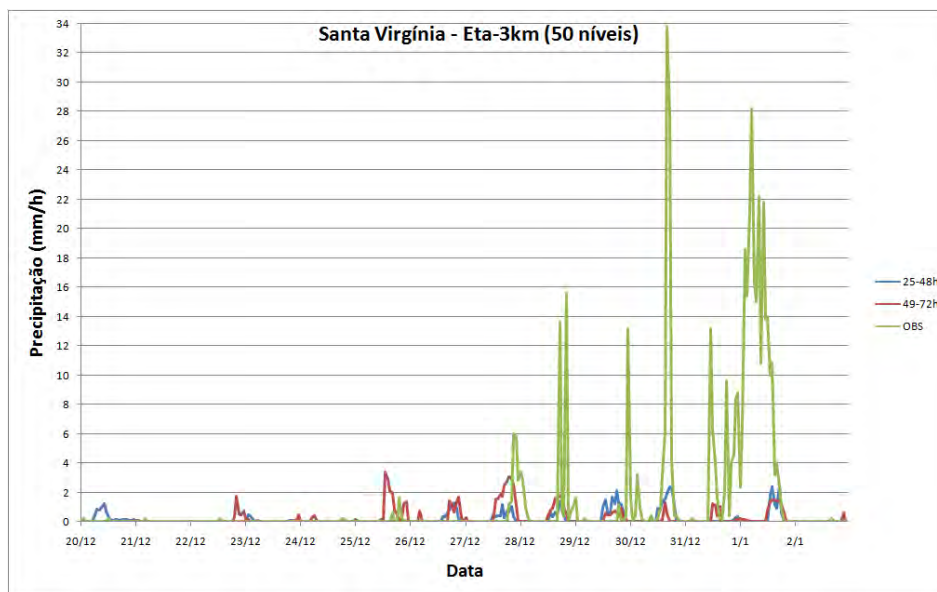


Figura 5.12 – Ciclo diurno médio da temperatura em 2 metros (°C) das previsões de 25-48h e 49-72h com Eta-5km (a) e Eta-3km (b), e das observações obtidas pela estação da Santa Virgínia.

Apesar das constantes ocorrências de chuva em todo o ciclo diurno, a estação de Santa Virgínia apontou o maior pico de chuva acumulada próximo às 17 horas UTC (Figura 5.14). Mesmo o modelo não conseguindo prever todos os picos de chuva observados pela estação, as previsões do Eta-5km e do Eta-3km previram as maiores taxas de precipitação no período da tarde, próximo ao instante que foi registrado o maior pico de chuva observada.

a)



b)

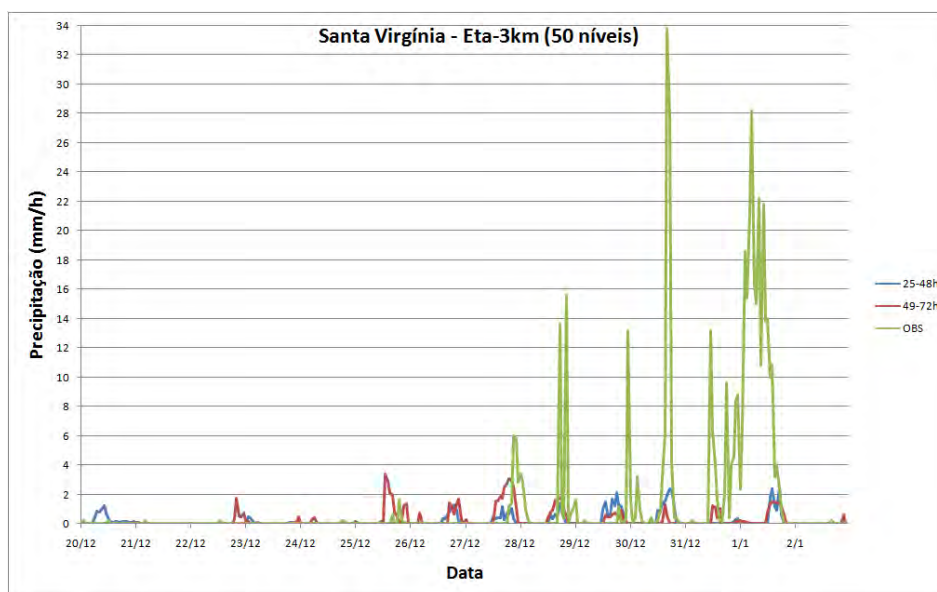


Figura 5.13 – Séries temporais de precipitação observada e prevista da versão Eta-5km (a) e versão Eta-3km (b) no período de dia 20 de Dezembro 2009 até 02 de Janeiro de 2010 em Santa Virgínia.

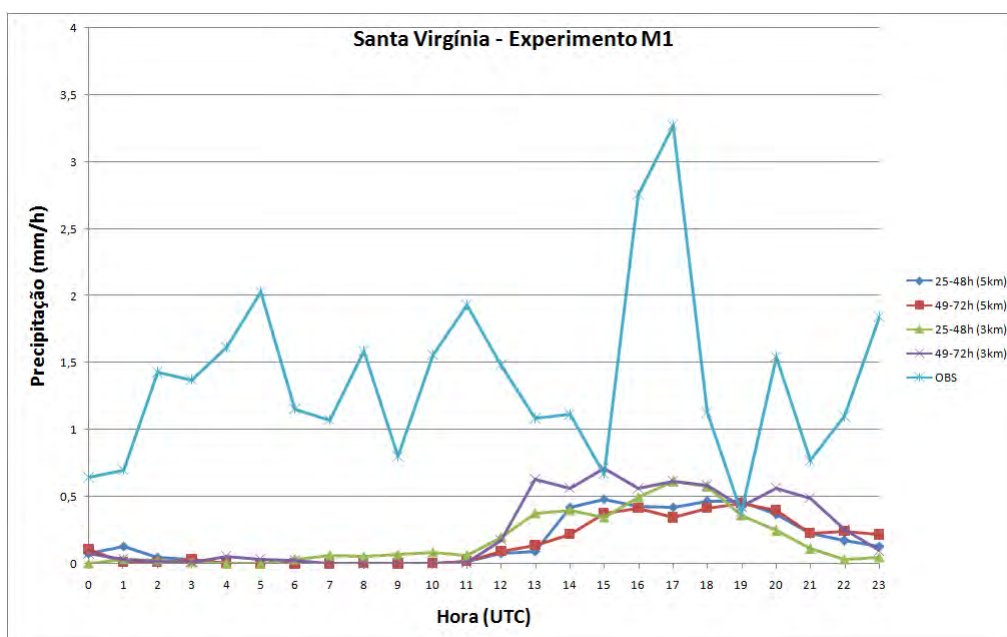


Figura 5.14 – Ciclo diurno médio da precipitação acumulada (mm/h) das previsões de 25-48h e 49-72h com Eta-5km e Eta-3km, e observações obtidas pela estação de Santa Virgínia.

Pelo ciclo diurno médio como um todo, as temperaturas em 2 m previstas com resolução horizontal de 3 km foram melhores representadas do que aquelas previstas com resolução horizontal de 5 km, principalmente no final da tarde. O Eta-5km e o Eta-3km previram excesso de chuva no período não chuvoso e falta de chuva no período chuvoso. Quando a resolução horizontal foi aumentada para 3 km, as previsões de 49-72h mostraram maior quantidade de chuva do que as previsões de 25-48h.

5.2 Experimento M2

O uso da alta resolução horizontal (entre 500 m a 3 km) permite que a grade do modelo se aproxime da escala de desenvolvimento das nuvens, com isso, a atividade do esquema implícito de precipitação deve diminuir. Desta forma, o esquema explícito tem a função de representar as precipitações convectivas locais e aquelas que são causadas por sistemas de grande escala.

A fim de verificar a eficácia do esquema explícito para a produção de chuva, foi desligada a parametrização de convecção BMJ do modelo nesse experimento, mantendo a resolução horizontal de 3 km e a resolução vertical de 50 níveis.

5.2.1 Angra dos Reis

Na série temporal mostrada na Figura 5.15, o Eta-3km, com esquema explícito, previu maiores picos de chuva do que com o esquema de convecção ligado, como pode ser observada na Figura 5.3.b. No entanto, o modelo teve dificuldade em prever os instantes em que ocorreram as maiores quantidades de chuva, principalmente entre os dias 31 de Dezembro e 1 de Janeiro. Apenas foi prevista uma pequena quantidade de precipitação acumulada a cada hora. As previsões de Angra dos Reis para o ciclo diurno médio, realizadas com o esquema de convecção, mostraram picos de chuva no final da tarde (Figura 5.4), enquanto que no ciclo diurno de precipitação de esquema explícito, o modelo obteve a maior quantidade de chuva no período da noite (Figura 5.16). As previsões realizadas utilizando o esquema explícito se adequaram melhor com as observações, conseguindo captar as chuvas máximas que ocorreram no período noturno do ciclo diurno.

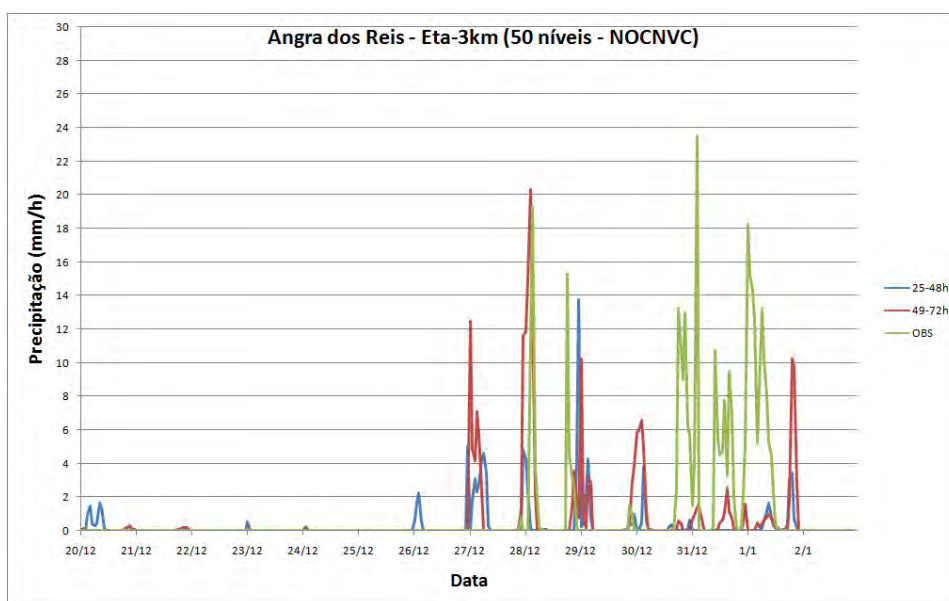


Figura 5.15 – Séries temporais de precipitação acumulada (por hora) observada e prevista (25-48h e 49-72h) de resolução horizontal 3 km do experimento M2 do dia 20 de Dezembro 2009 até 02 de Janeiro de 2010 obtidas pela estação de Angra dos Reis.

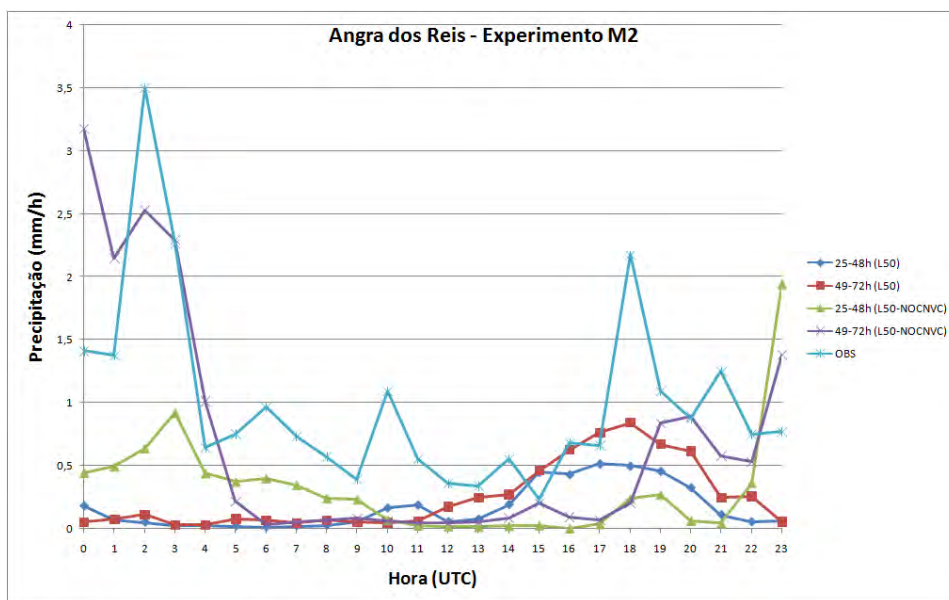


Figura 5.16 – Ciclo diurno médio da precipitação acumulada (mm/h) das previsões de 25-48h e 49-72h do modelo Eta, de resolução horizontal 3 km) do experimento M2, e observações obtidas pela estação de Angra dos Reis.

5.2.2 Cunha

Na Figura 5.17, a frequência de dias de chuva prevista no experimento M2 foi menor do que prevista com esquema de convecção ligado para Cunha (Figura 5.9.b) durante o período de 14 dias. As maiores taxas de precipitação que o modelo previu ocorreram próximo do dia 28 de Dezembro, onde foram observados também episódios de chuva nas observações. No entanto, não foi possível prever o período que teve maior quantidade de chuva observada no dia 1 de Janeiro.

No ciclo diurno médio, o modelo teve dificuldade para captar os picos de chuva sem o uso da parametrização de convecção. Na Figura 5.18, a simulação mostrou uma distribuição parecida com aquela utilizada com o esquema de convecção ligado, porém, em questão de quantidade, o modelo com esquema explícito apontou pouca chuva a partir das 12 horas UTC e em maior quantidade no período da madrugada, aproximadamente entre 0 a 4 horas UTC.

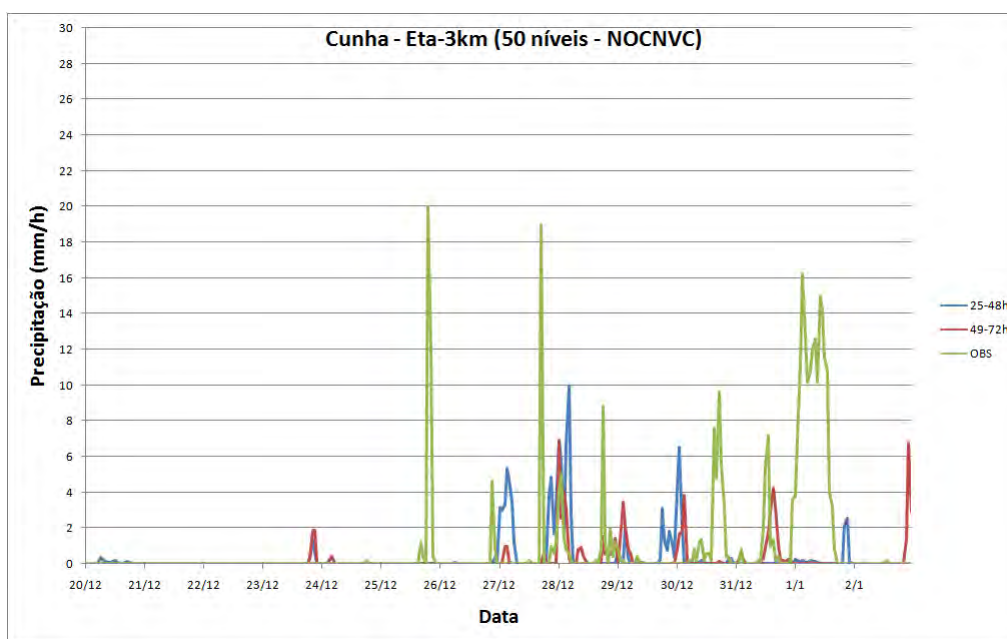


Figura 5.17 – Séries temporais de precipitação acumulada (por hora) observada e prevista (25-48h e 49-72h) de resolução horizontal 3 km do experimento M2 do dia 20 de Dezembro 2009 até 02 de Janeiro de 2010 em Cunha.

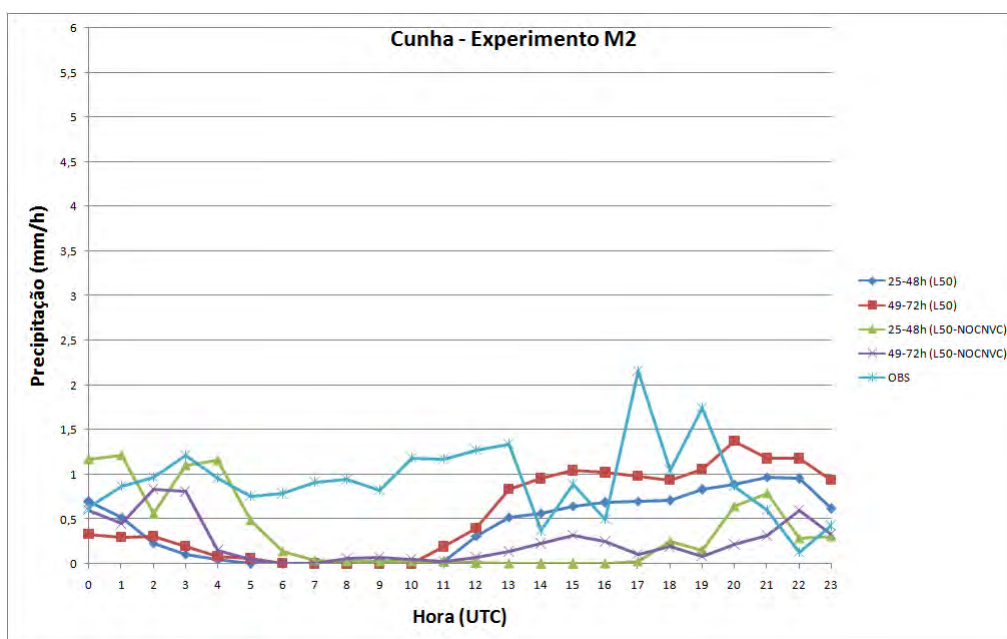


Figura 5.18 – Ciclo diurno médio da precipitação acumulada (mm/h) das previsões de 25-48h e 49-72h do modelo Eta, de resolução horizontal 3 km do experimento M2 e observações em Cunha.

5.2.3 Santa Virgínia

Na Figura 5.19, o modelo previu uma quantidade menor de precipitação, por hora, para Santa Virgínia em todo o período da série temporal em relação às previsões de outras estações. Apesar da taxa de precipitação ser menor do que foi observada também, a maior frequência de chuva foi prevista nos dias 31 de Dezembro e 1 de Janeiro, através das previsões de 49-72h. O modelo indicou dificuldade novamente em prever o período em que ocorreram as maiores taxas de precipitação acumulada, que seria entre final de Dezembro até e o começo de Janeiro.

Assim como na série temporal de 14 dias, as previsões do Eta-3km no esquema explícito apresentaram distribuições diferentes de precipitação em relação ao ciclo diurno do esquema de convecção ligado, mostrando pouca quantidade de chuva ao longo do período, e não foram capazes de detectar o maior pico de chuva registrada pelas observações, como podem ser vistas pela Figura 5.20.

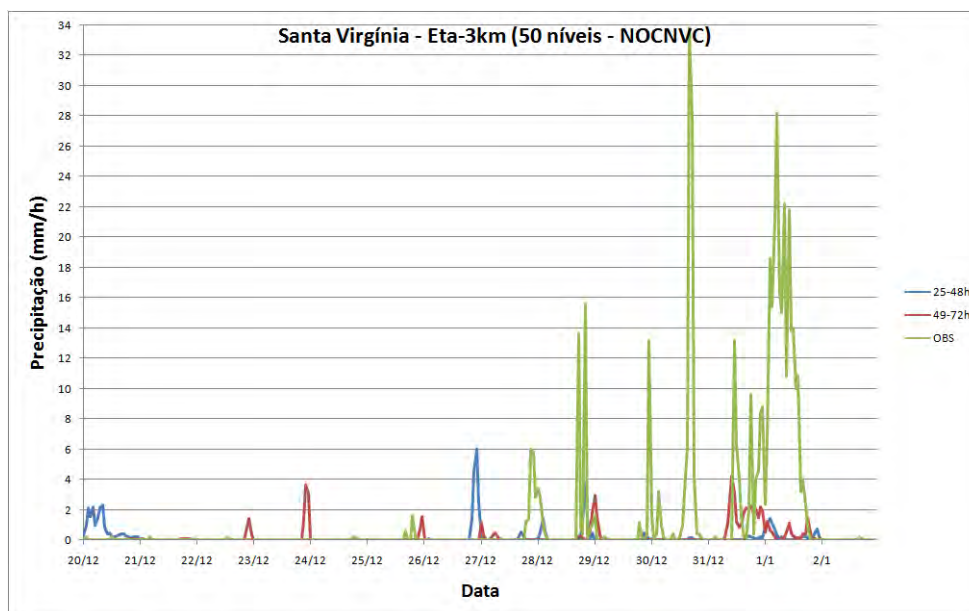


Figura 5.19 – Séries temporais de precipitação acumulada (por hora) observada e prevista (25-48h e 49-72h) de resolução horizontal 3 km do experimento M2 do dia 20 de Dezembro 2009 até 02 de Janeiro de 2010 em Santa Virgínia.

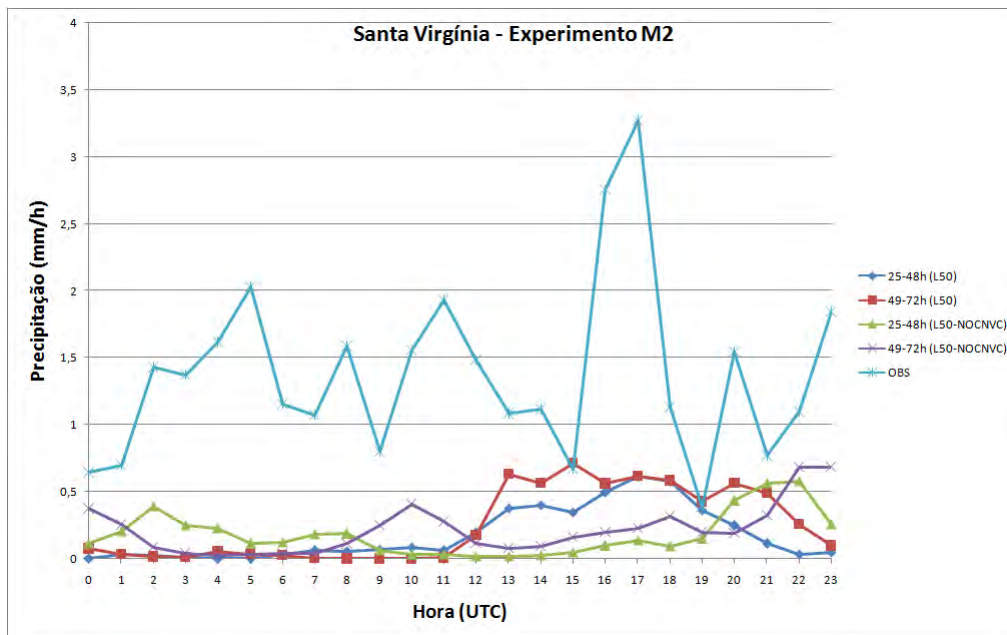


Figura 5.20 – Ciclo diurno médio da precipitação acumulada (mm/h) das previsões de 25-48h e 49-72h do modelo Eta, de resolução horizontal 3 km do experimento M2 e observações em Santa Virgínia.

Em todos os locais, o modelo de esquema explícito não conseguiu prever a precipitação no intervalo de tempo que teve a maior quantidade de chuva observada (final de Dezembro). Em relação ao ciclo diurno médio, a maior quantidade de chuva prevista ocorreu no período da noite, onde em Angra dos Reis mostrou-se o maior aumento de chuva explícita em relação à chuva prevista com o esquema de convecção ligada.

5.3 Experimento M3

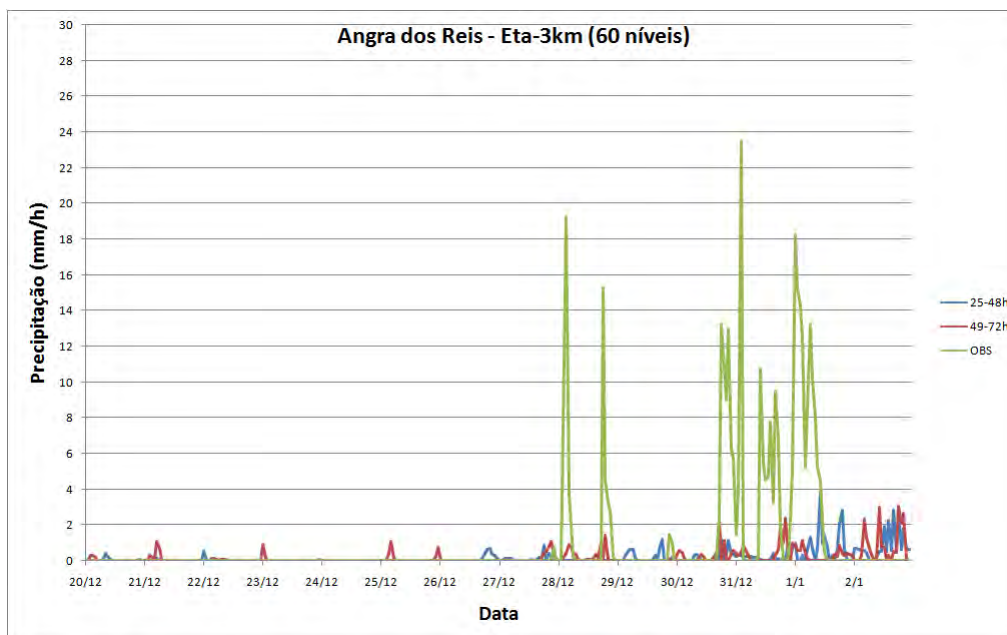
Este experimento tem o objetivo de realizar comparação semelhante ao experimento M2, verificando o desempenho do modelo com o esquema explícito de convecção para o ciclo diurno de precipitação, mas utilizando a resolução vertical para 60 níveis.

5.3.1 Angra dos Reis

As previsões de chuva do modelo utilizando esquema de convecção ligada (Figura 5.21.a) em Angra dos Reis mostraram pouca quantidade de chuva ao longo do período, subestimando assim, a precipitação em relação às observações, e a frequência de chuva foi aumentando à medida que foi se aproximando para o fim do período da série temporal. O modelo utilizando o esquema explícito, por sua vez (Figura 5.21.b) conseguiu captar melhor os episódios de altas taxas de precipitação que ocorreram nos últimos dias do mês de Dezembro. Foi previsto também chuva em horários que não houve ocorrência de chuva na estação, como no início da série temporal em ambas as configurações.

Pela Figura 5.22, as previsões do esquema de convecção ligado mostraram maior quantidade de chuva no período de manhã e tarde, entre 8 às 19 horas UTC. Suas previsões de 25-48h conseguiram representar os intervalos de tempo em que houve aumento e redução de precipitação observada. Por outro lado, as taxas de precipitação previstas no esquema explícito, no período entre 0 a 4 horas UTC, indicaram melhor a grande quantidade de chuva que foi verificada pela estação no ciclo diurno.

a)



b)

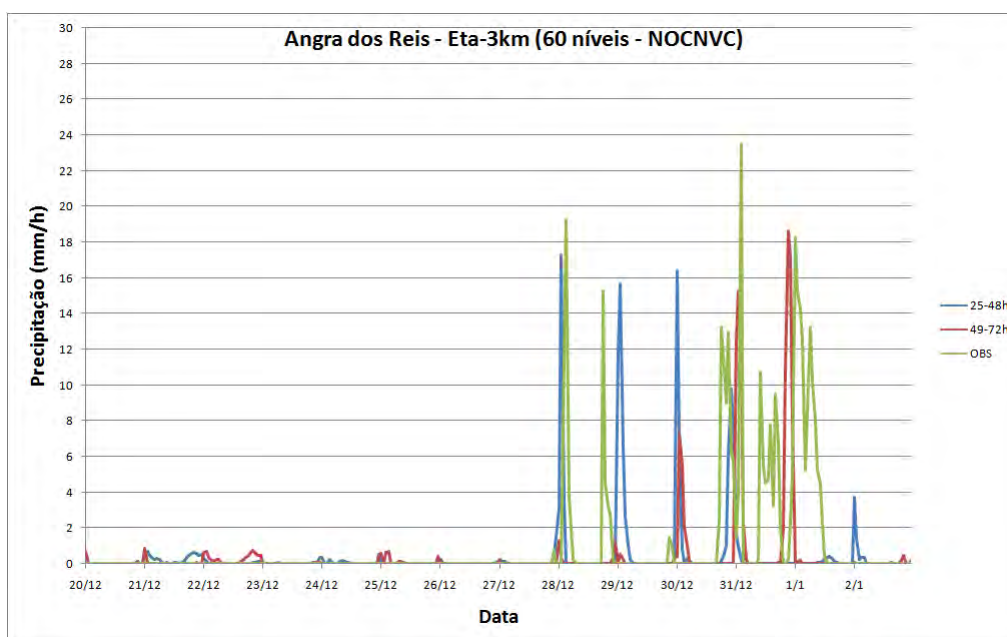


Figura 5.21 – Séries temporais de precipitação acumulada (mm por hora) observada e prevista (25-48h e 49-72h) de resolução horizontal 3 km com esquema de convecção ligado (a) e apenas com esquema explícito (indicada como NOCNVC) (b) no período do dia 20 de Dezembro 2009 até 02 de Janeiro de 2010 para Angra dos Reis.

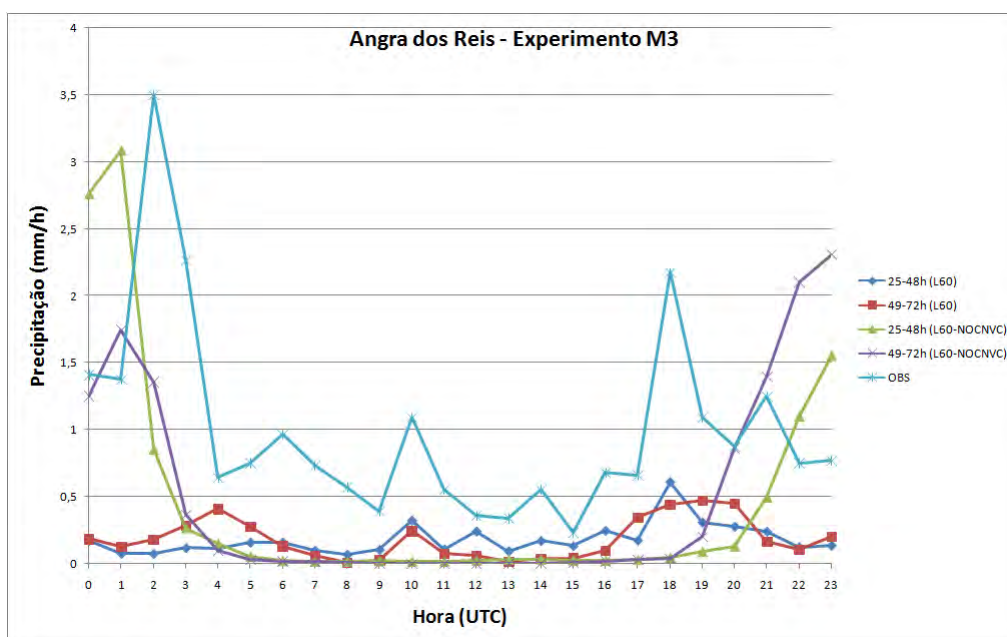


Figura 5.22 – Ciclo diurno médio da precipitação acumulada (mm/h) das previsões de 25-48h e 49-72h do modelo Eta de resolução horizontal 3 km e resolução vertical de 60 níveis, do esquema implícito ligado e esquema explícito (indicada como NOCNVC), e observações obtidas pela estação de Angra dos Reis.

5.3.2 Cunha

Nesta estação, as séries temporais com as simulações de chuva também apresentaram desempenhos diferentes entre esquema de convecção ligado e explícito. Na Figura 5.23.a, a chuva de esquema de convecção ligado ocorreu mais frequentemente a partir do dia 30 de Dezembro, onde a sua quantidade máxima atingiu em torno de 6 mm por hora nas previsões de 25-48h e 4 mm nas previsões de 49-72h. A chuva do esquema explícito, na Figura 5.23.b, foi indicada em grande quantidade praticamente no mesmo horário e diariamente.

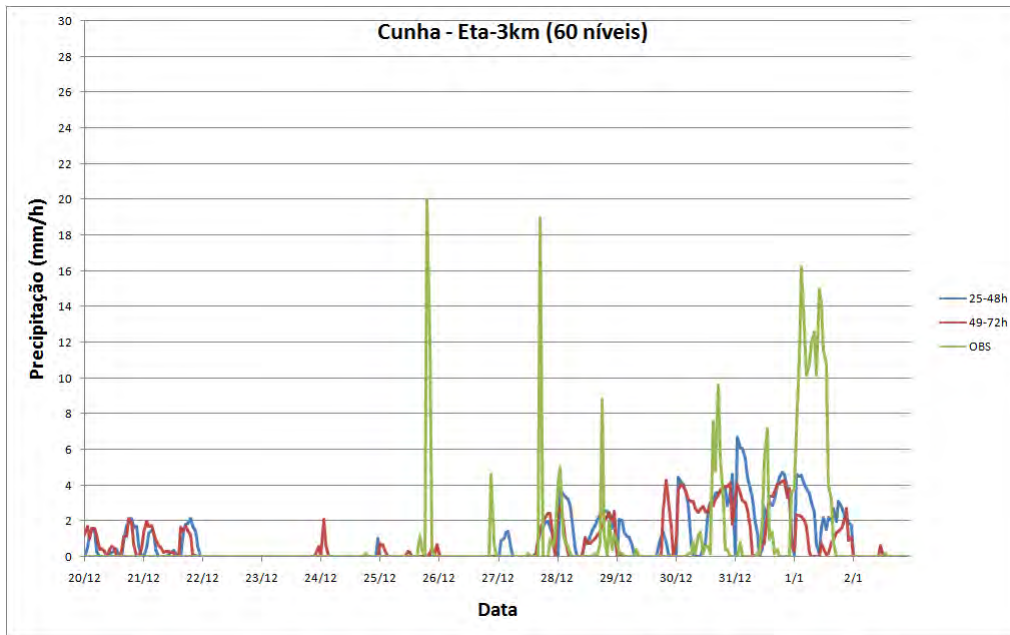
Apesar da taxa de precipitação do esquema explícito ser maior do que previsto pelo esquema de convecção ligado, o modelo não conseguiu adequar na previsão de chuva nos respectivos horários em que ocorreu a chuva observada.

Devido à previsão de grande quantidade de chuva explícita, como observada na série temporal de Cunha (Figura 5.24), seu ciclo diurno médio mostrou a maior quantidade no período do final da tarde até a noite, entre 18 às 23 horas UTC, e para o período da manhã e tarde foram praticamente nulas.

5.3.3 Santa Virgínia

O modelo previu baixa frequência de chuva para Santa Virgínia nos esquemas de convecção ligado (Figura 5.25.a) e explícito (Figura 5.25.b). O esquema explícito mostrou distribuição de chuva parecida com a que foi observada nas estações anteriores e suas taxas de precipitação foram maiores do que aquelas previstas pelo esquema de convecção ligado. Apesar de o modelo conseguir representar alguns picos de chuva da observação, ainda não foi capaz de prever para o dia em que houve a ocorrência de chuva mais significativa (31 de Dezembro).

a)



b)

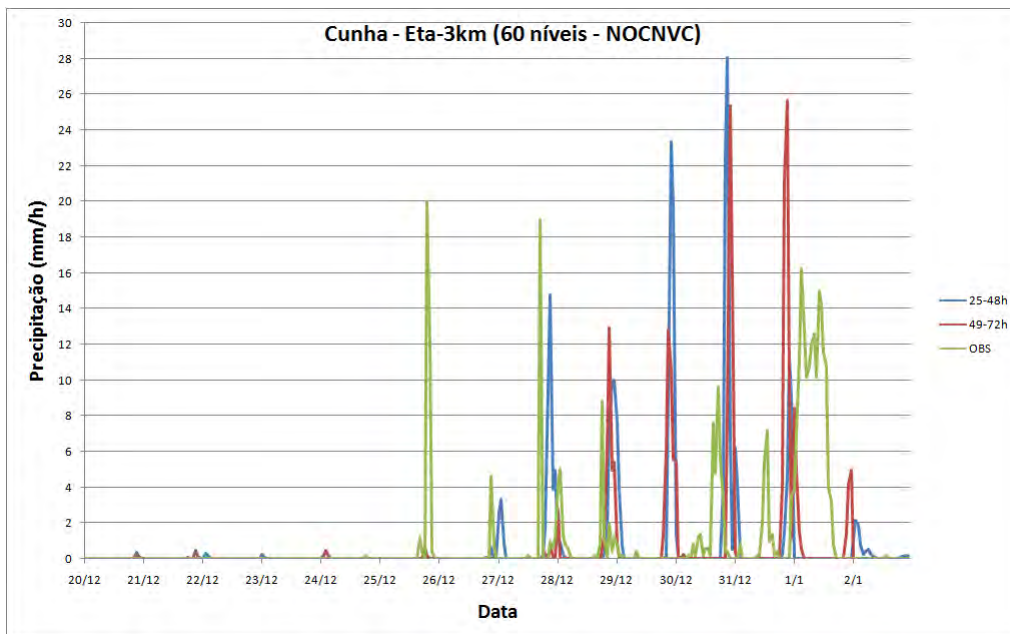


Figura 5.23 – Séries temporais de precipitação acumulada (mm/h) observada e prevista (25-48h e 49-72h) de resolução horizontal 3 km com esquema de convecção ligado (a) e apenas com esquema explícito (indicada como NOCNVC) (b) no período do dia 20 de Dezembro 2009 até 02 de Janeiro de 2010 pela estação de Cunha.

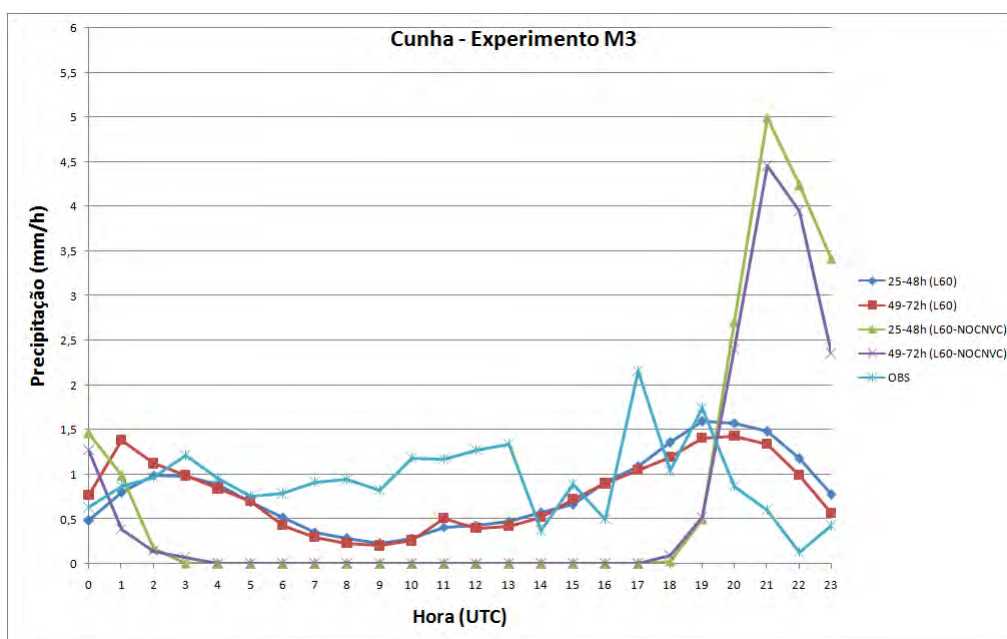
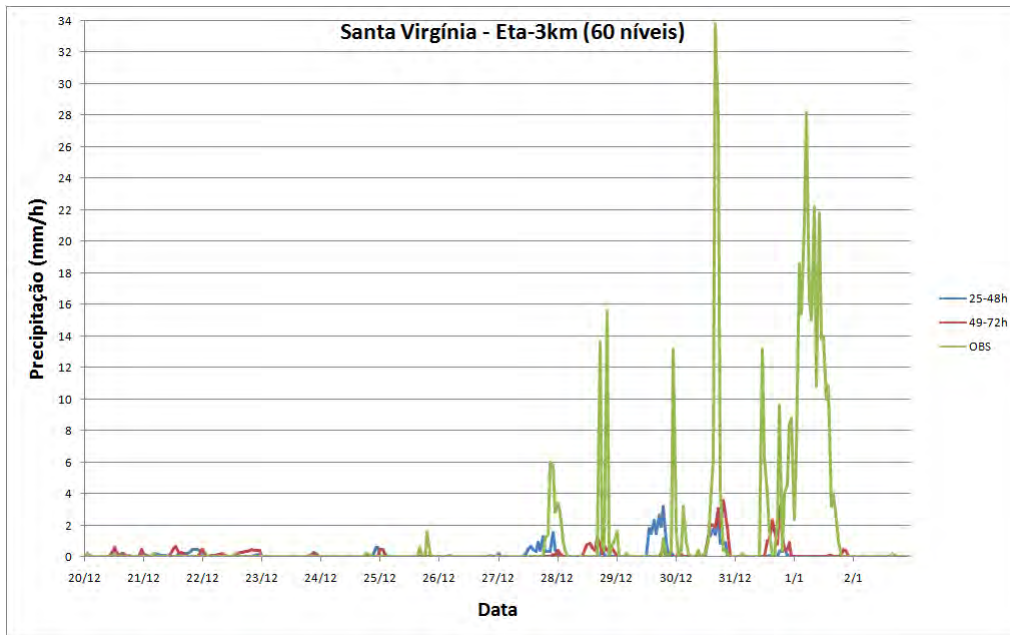


Figura 5.24 – Ciclo diurno médio da precipitação acumulada (mm/h) das previsões de 25-48h e 49-72h do modelo Eta de resolução horizontal 3 km e resolução vertical de 60 níveis, do esquema de convecção ligado e do esquema explícito (indicada como NOCNVC), e observações obtidas pela estação de Cunha.

Na Figura 5.26, notou-se que o esquema explícito teve comportamento de previsão de chuva distinta do que foi previsto no esquema de convecção ligado. O horário que teve maior ocorrência de chuva para o esquema explícito em média no ciclo diurno foi no início da noite e correspondeu com a taxa de precipitação que foi observada pela estação às 20 horas UTC.

a)



b)

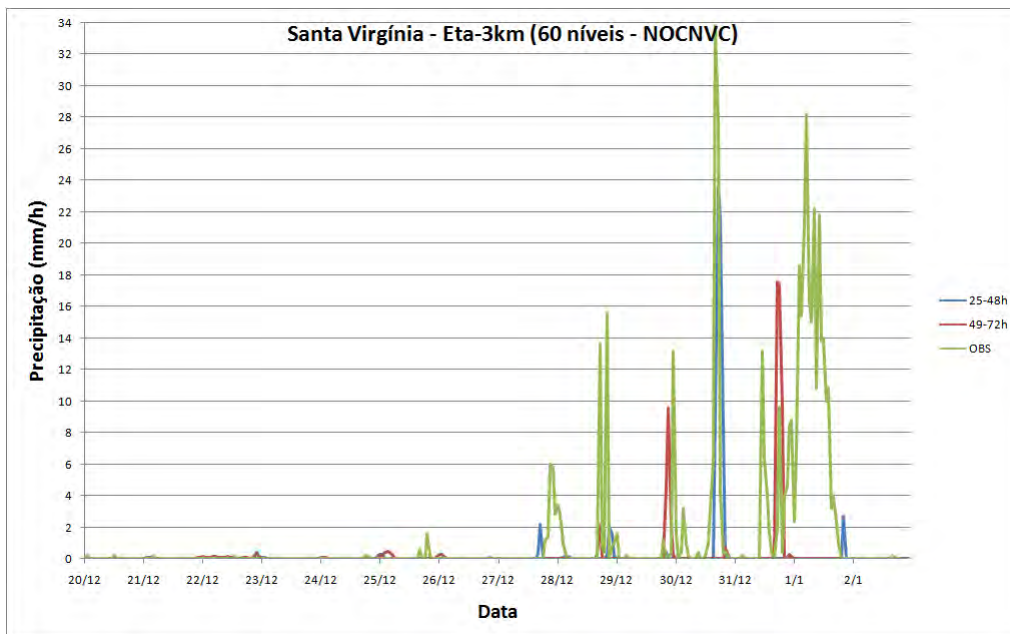


Figura 5.25 – Séries temporais de precipitação acumulada (por hora) observada e prevista (25-48h e 49-72h) de resolução horizontal 3 km com esquema de convecção ligado (a) e apenas com esquema explícito (indicada como NOCNVC) (b) do dia 20 de Dezembro 2009 até 02 de Janeiro de 2010 para Santa Virgínia.

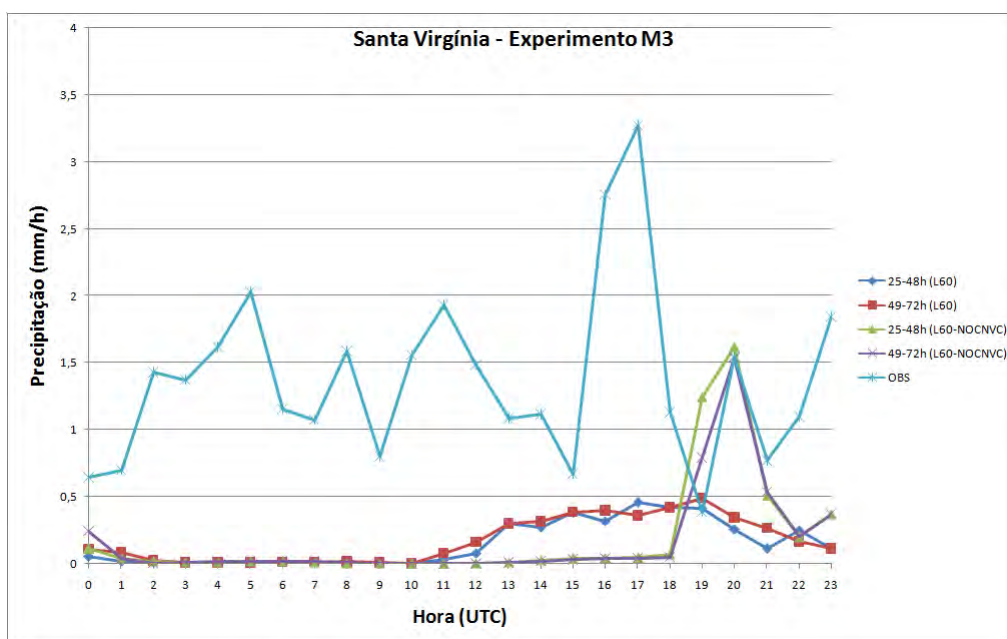


Figura 5.26 – Ciclo diurno médio da precipitação acumulada (mm/h) das previsões de 25-48h e 49-72h do modelo Eta de resolução horizontal 3 km e resolução vertical de 60 níveis, do esquema de convecção ligado e esquema explícito (indicada como NOCNVC), e observações obtidas pela estação de Santa Virgínia.

Pelas análises feitas neste experimento, as previsões de esquema explícito mostraram maiores quantidades de precipitação do que aquelas obtidas pelas previsões com o esquema de convecção ligada. As previsões de 25-48h anteciparam os picos de maior quantidade de chuva em relação às previsões de 49-72h. No ciclo diurno médio, as previsões com esquema de convecção ligada, tiveram a maior quantidade de chuva no final da tarde, enquanto que as previsões de esquema explícito tiveram a maior quantidade no período da noite.

5.4 Experimento M4

O estudo do impacto da mudança na resolução vertical do modelo serve para verificar o comportamento da formação de sistemas convectivos em um perfil vertical simulado com uma quantidade maior de níveis (60 níveis) e mantendo

a resolução horizontal de 3 km e a atuação do esquema de parametrização de convecção BMJ.

5.4.1 Angra dos Reis

Em Angra dos Reis, foi observada pouca variação de temperaturas mínimas e máximas previstas ao longo da série temporal (Figura 5.27). Em comparação com a série temporal do Eta-3km de resolução vertical de 50 níveis, visto na Figura 5.1.b, o ciclo diurno de 60 níveis se mostrou menos perturbado e as previsões de temperaturas de 25-48h e 49-72h foram praticamente iguais entre si. Apesar da sua melhor representação no ciclo diurno previsto, o modelo não foi capaz de prever a diminuição na variação de temperatura do dia 31 de Dezembro.

Na Figura 5.28, o aumento da resolução vertical implicou em um pequeno aumento da temperatura do ciclo diurno médio, aproximando dos valores observados da estação de Angra dos Reis. Mesmo com pouca diferença de comportamentos das previsões de 50 e 60 níveis, as temperaturas previstas de 50 níveis se adequaram melhor com as observadas quando atingiram seus máximos valores.

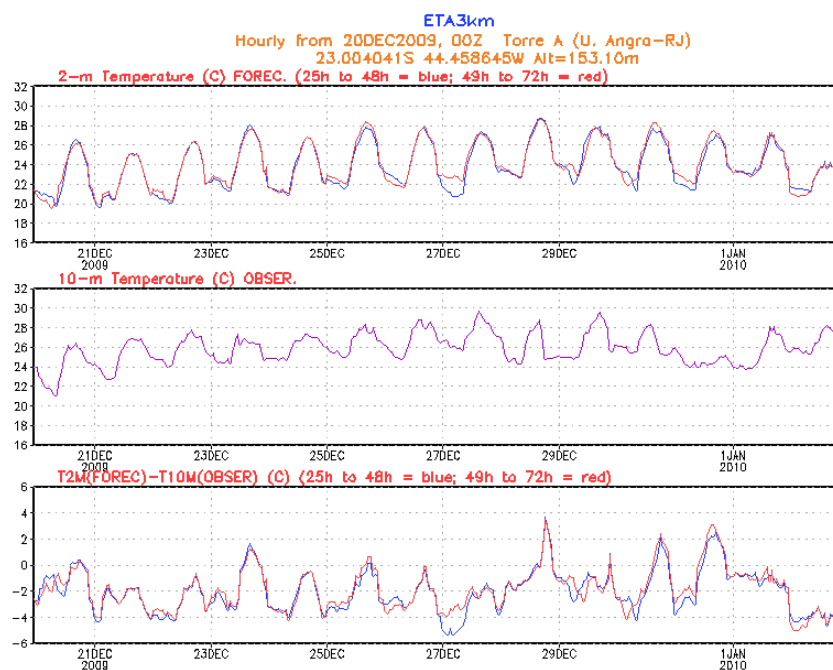


Figura 5.27 – Séries temporais de temperatura em 10 m observada (roxo) e de temperatura 2 m prevista, de 25-48h (azul) e de 49-72h (vermelho), com resolução vertical de 60 níveis do dia 20 de Dezembro 2009 até 02 de Janeiro de 2010 para Angra dos Reis.

As previsões em diferentes níveis verticais mostraram parecidas distribuições de precipitação acumulada ao longo do ciclo diurno médio (Figura 5.29). O Eta-3km, de 60 níveis, previu a maior frequência de alta taxa de precipitação no período da tarde e as previsões de 49-72h identificaram melhor os picos de chuva que o Eta-3km de 50 níveis mostrou dificuldade em representá-los.

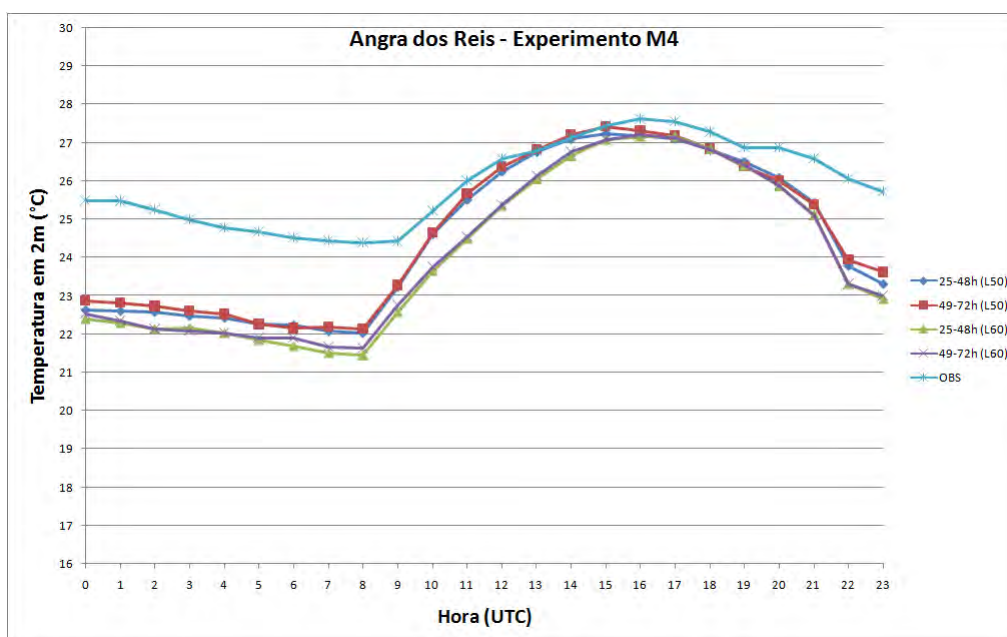


Figura 5.28 – Ciclo diurno médio da temperatura em 2 metros (°C) das previsões de 25-48h e 49-72h do modelo Eta, com resoluções verticais de 50 e 60 níveis, e da temperatura em 10 m das observações obtidas pela estação de Angra dos Reis.

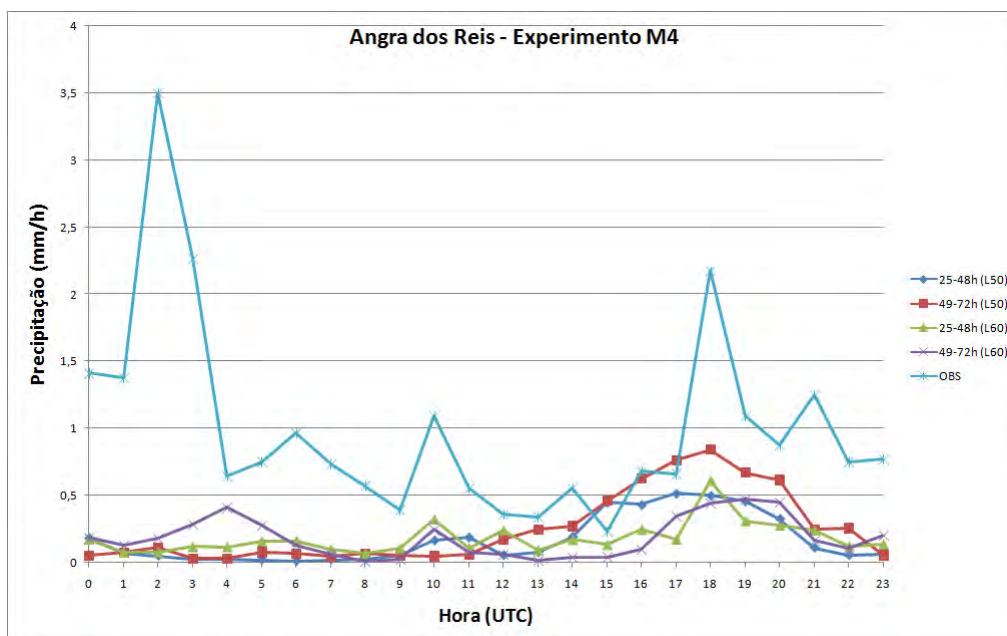
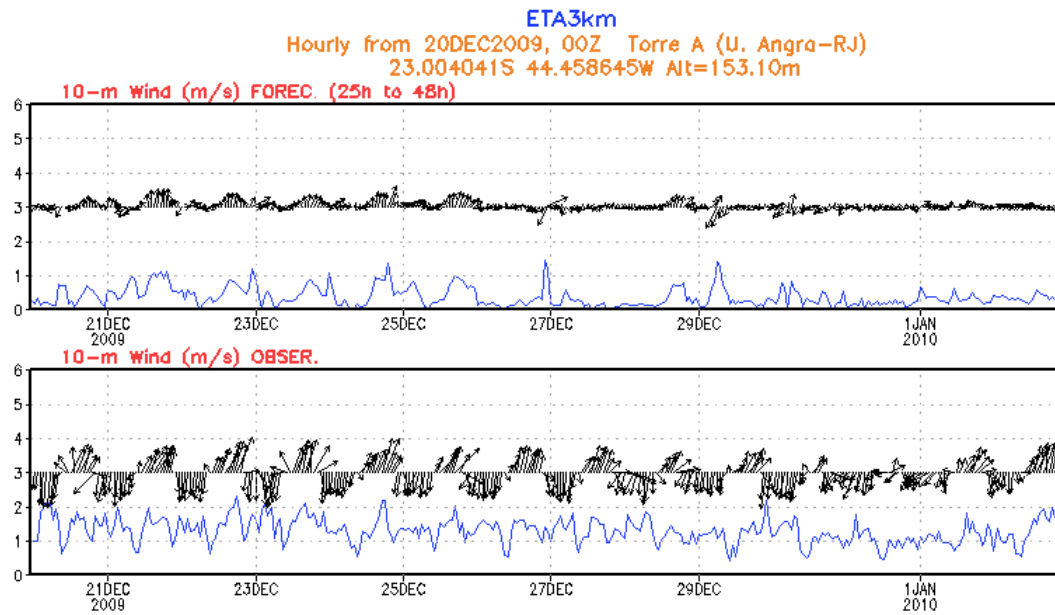


Figura 5.29 – Ciclo diurno médio da precipitação acumulada (mm/h) das previsões de 25-48h e 49-72h do modelo Eta, com resoluções verticais de 50 e 60 níveis, e observações obtidas pela estação de Angra dos Reis.

Em relação ao vento em 10 m, as séries temporais com resolução vertical de 60 níveis do Eta-3km (Figuras 5.30.a e 5.30.b), mostraram que o vento foi mais intenso no período diurno e ainda teve melhor representação em relação a observação. No período do caso de Angra dos Reis, entre 31 de Dezembro e 1 de Janeiro, o vento do período diurno foi se desintensificando, mostrando que sistema convectivo que causou a chuva na região não estaria associada com a influência brisa marítima.

Na Figura 5.31, o modelo representou bem o comportamento do vento em 10 m no ciclo diurno médio, mostrando que a entrada da brisa marítima iniciou-se aproximadamente às 11 horas UTC (13 horas local). O ciclo diurno médio do vento que o modelo previu teve concordância com o ciclo diurno médio do vento observado, mesmo a estação de Angra dos Reis registrando vento em 10 m mais intenso.

a)



b)

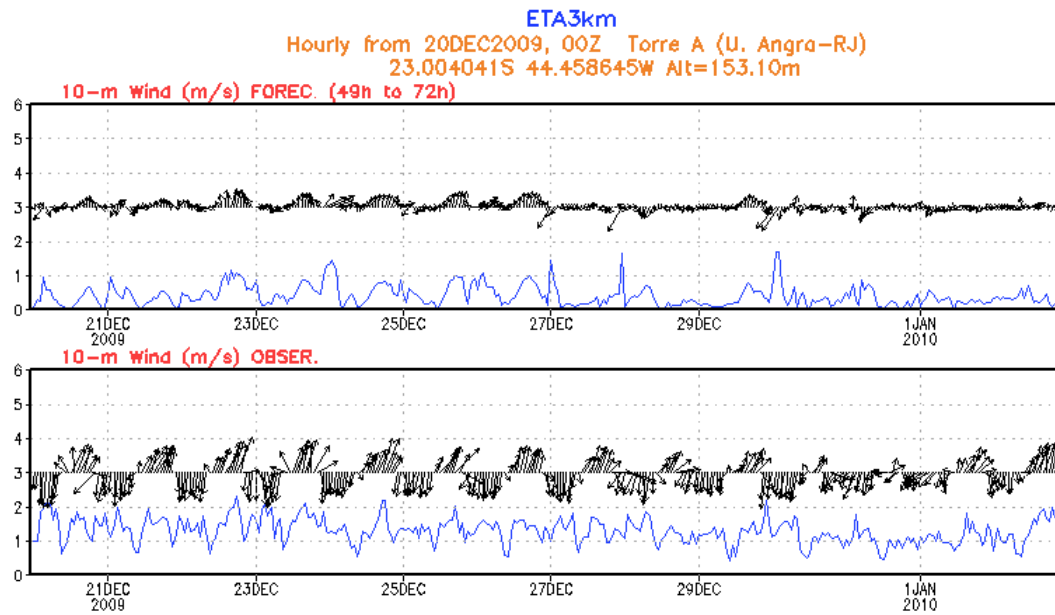


Figura 5.30 – Séries temporais de direção e intensidade do vento em 10 m do Eta-3km em 60 níveis verticais, com previsões de de 25-48h (a) e 49-72h (b), e as observações em Angra dos Reis.

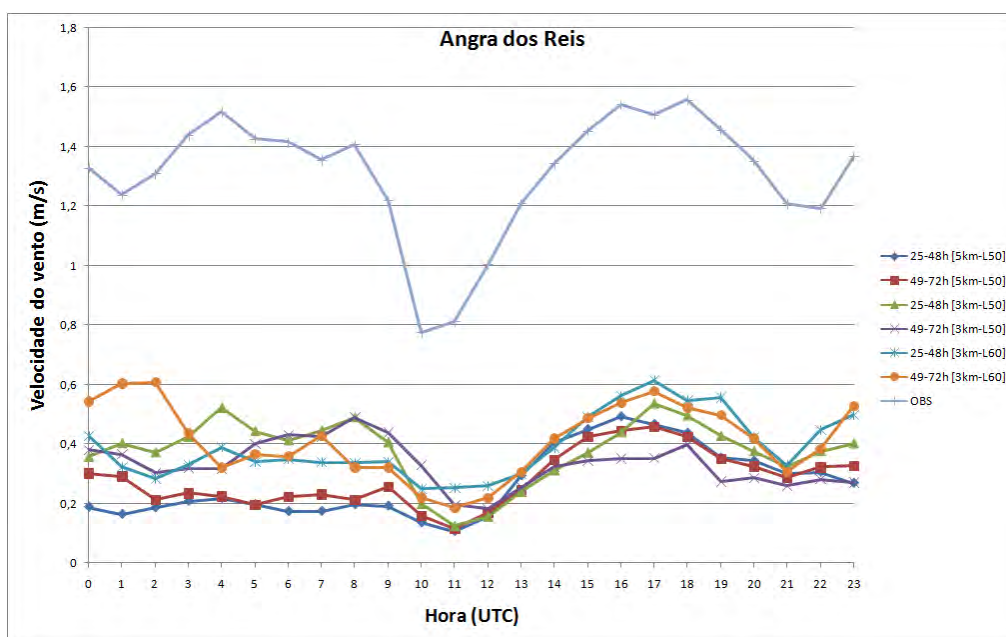


Figura 5.31 – Ciclo diurno médio das previsões da velocidade do vento em 10 m (m/s) de 25-48h e 49-72h do Eta-5km e Eta-3km, de 50 e 60 níveis, e observações obtidas pela estação de Angra dos Reis.

5.4.2 Cunha

Em Cunha, o ciclo diurno da temperatura em 2 m do Eta-3km, de 60 níveis, se manteve praticamente na mesma amplitude até o dia 27 de Dezembro (Figura 5.32). O comportamento deste ciclo diurno foi distinto do que foi observado na série temporal do Eta-3km de 50 níveis, observado na Figura 5.7.b, onde o modelo mostrou quedas de temperatura máxima no dia 27 e entre dias 29 a 31 de Dezembro.

Na Figura 5.33, com melhor resolução vertical, houve um leve aumento nas temperaturas a 2 m nas previsões para o ciclo diurno médio, onde o pico de máxima temperatura se mostrou mais acentuado do que as previsões de 50 níveis e a observação, enquanto que as temperaturas mínimas se aproximaram mais dos valores registrados na estação. As previsões com resolução vertical de 50 níveis tiveram a melhor representação para cada intervalo de tempo do ciclo diurno.

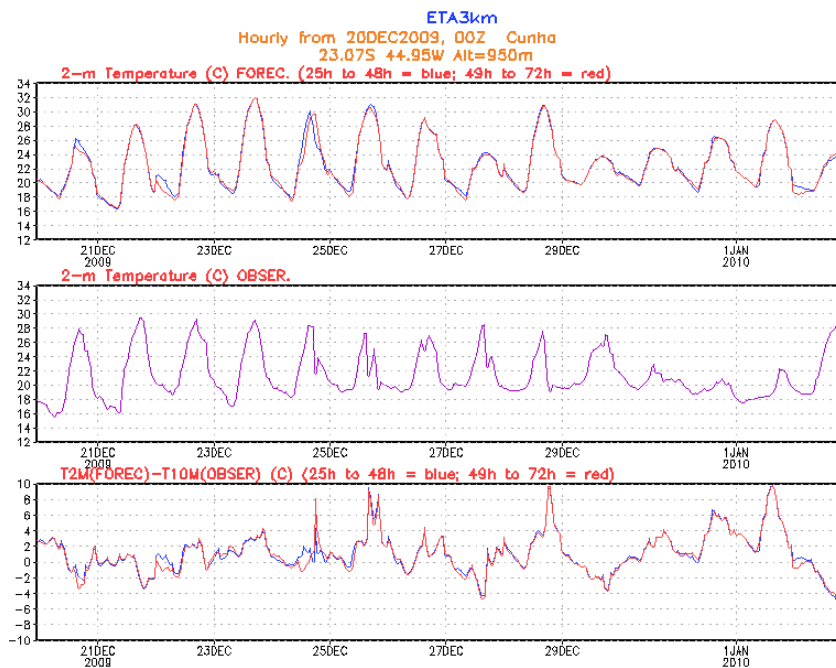


Figura 5.32 – Séries temporais de temperatura 2 m prevista, de 25-48h (azul) e de 49-72h (vermelho), e observada (roxo) com resolução vertical de 60 níveis do dia 20 de Dezembro 2009 até 02 de Janeiro de 2010 para Cunha.

O aumento da resolução vertical resultou no aumento da frequência de chuva no período do ciclo diurno médio (Figura 5.34), indicando maior quantidade de chuva do que as de 50 níveis no período noturno, alcançando os valores médios observados pela estação.

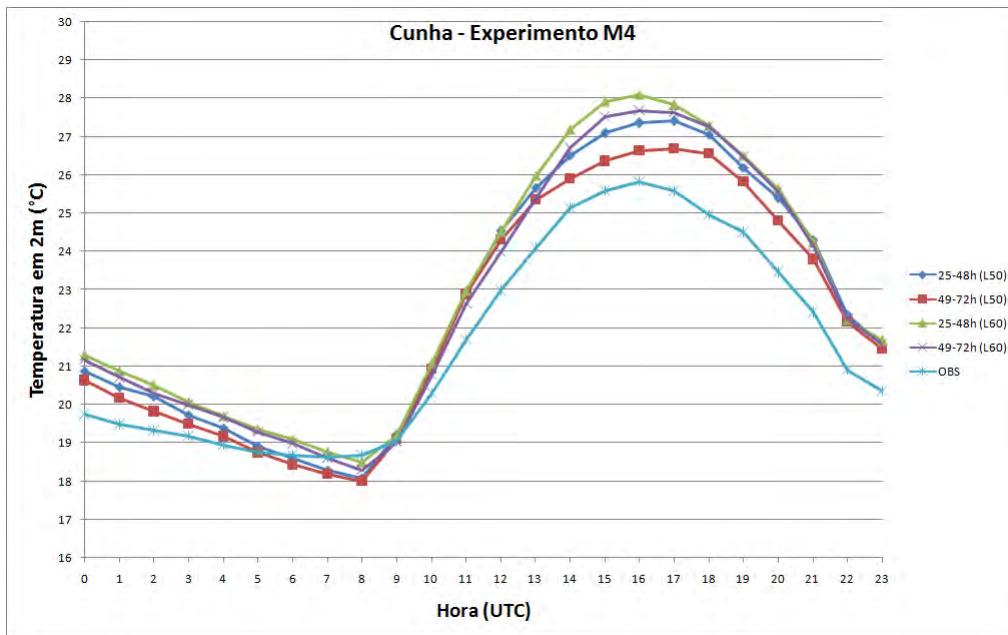


Figura 5.33 – Ciclo diurno médio da temperatura em 2 metros (°C) das previsões de 25-48h e 49-72h do modelo Eta, com resoluções verticais de 50 e 60 níveis, e temperatura em 10 m das observações obtidas pela estação de Cunha.

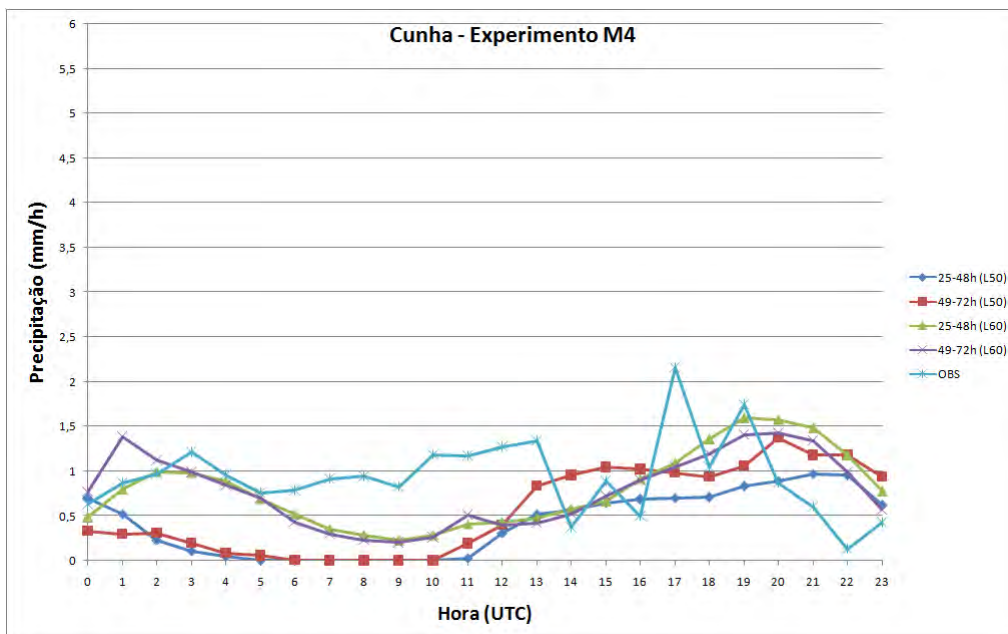


Figura 5.34 – Ciclo diurno médio da precipitação acumulada (mm/h) das previsões de 25-48h e 49-72h do modelo Eta, com resoluções verticais de 50 e 60 níveis, e observações obtidas pela estação de Cunha.

5.4.3 Santa Virgínia

As previsões de 25-48h e 49-72h do Eta-3km de 60 níveis se mostraram semelhantes na representação do ciclo diurno da temperatura a 2 m (Figura 5.35) e, em relação às observações, seus valores foram superestimados em grande parte da série temporal. Apesar do bom desempenho do modelo em representar a variação diurna da temperatura, foi observada novamente a sua dificuldade em prever a queda de temperaturas máximas no final de Dezembro.

Na Figura 5.36, a temperatura prevista em 60 níveis exibiu comportamento semelhante ao de 50 níveis com superestimativa de aproximadamente 2°C em todo o período do ciclo diurno médio.

Além do ciclo diurno médio de temperatura, na Figura 5.37, o desempenho do modelo com resolução vertical de 60 níveis também foi similar as previsões realizadas em 50 níveis nas simulações de chuva. Notou-se que as previsões de 49-72h de 50 níveis geraram maior quantidade de chuva.

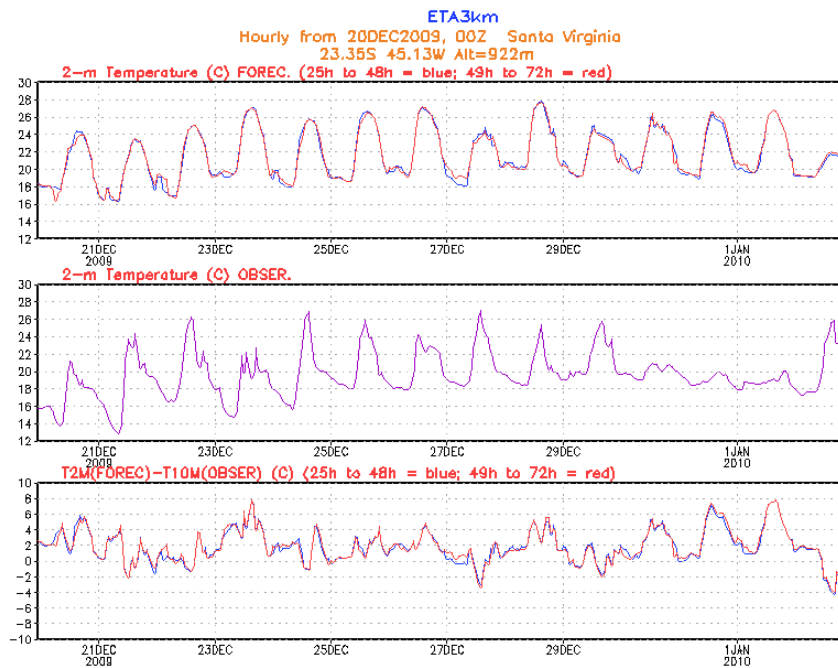


Figura 5.35 – Séries temporais de temperatura em 2 m observada (roxo) e prevista, de 25-48h (azul) e de 49-72h (vermelho), com resolução vertical de 60 níveis do dia 20 de Dezembro de 2009 até 02 de Janeiro de 2010 para Santa Virgínia.

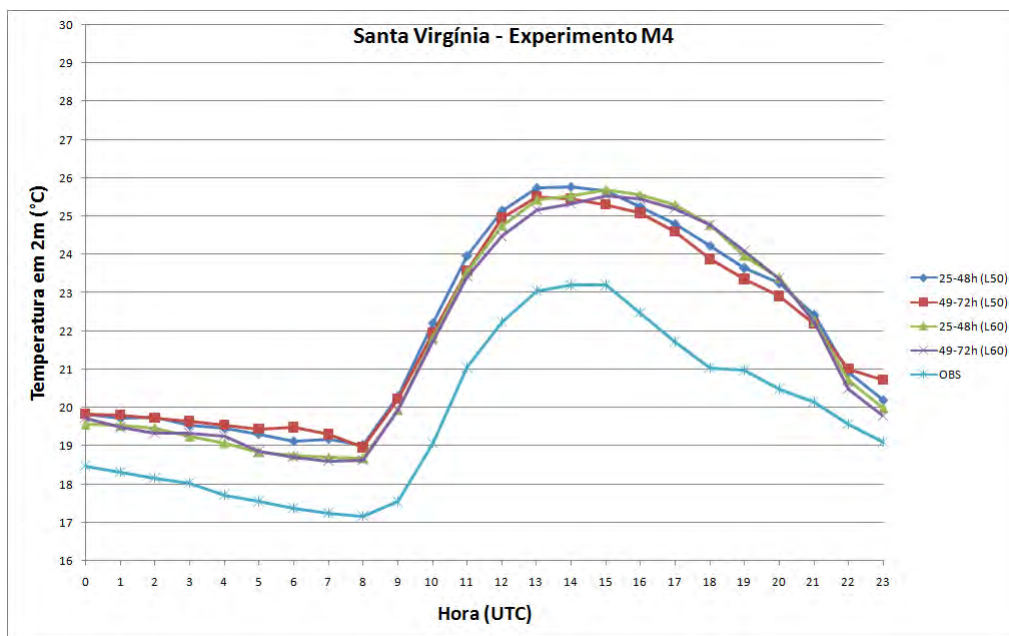


Figura 5.36 – Ciclo diurno médio da temperatura em 2 metros (°C) das previsões de 25-48h e 49-72h do modelo Eta, com resoluções verticais de 50 e 60 níveis, e observações obtidas pela estação de Santa Virgínia.

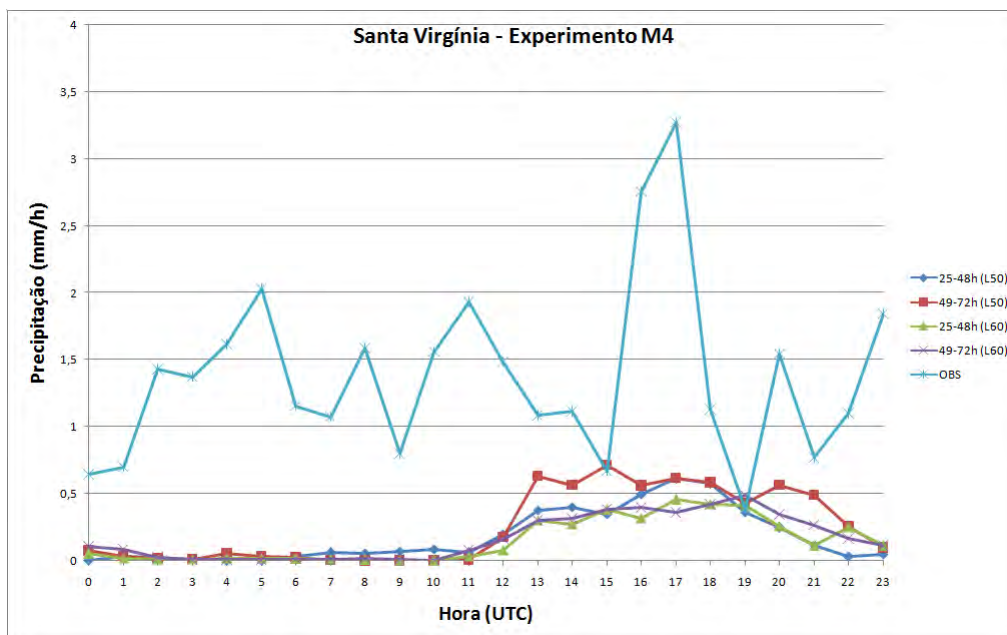


Figura 5.37 – Ciclo diurno médio da precipitação acumulada (mm/h) das previsões de 25-48h e 49-72h do modelo Eta, com resoluções verticais de 50 e 60 níveis, e observações obtidas pela estação de Santa Virgínia.

O aumento da resolução vertical do modelo de 50 para 60 níveis teve uma mudança mais significativa na previsão do ciclo diurno da precipitação para Cunha, indicando episódios de chuva no período da noite que foram notadas também nas observações. Em Angra dos Reis, as previsões de temperatura e precipitação foram melhores representadas com resolução vertical de 50 níveis, e em Santa Virgínia, as previsões dessas variáveis foram parecidas tanto para 50 níveis quanto para 60 níveis.

5.5 Experimento M5

Neste experimento, foi utilizado o modelo com resolução de 3 km e apenas com a atuação do esquema de microfísica de nuvens com o mesmo objetivo do experimento anterior, focando na análise do papel da parametrização e na melhoria da representação do ciclo diurno da precipitação.

Em Angra dos Reis, nas Figuras 5.38, a alta taxa de precipitação foi prevista no período da noite para ambas as resoluções verticais no ciclo diurno médio, se adequando melhor com as observações. As previsões de 60 níveis não apresentaram episódios de chuva nos períodos da manhã e da tarde, assim como nas previsões de 50 níveis, porém apontaram maiores quantidades de chuva.

O modelo com esquema explícito para resoluções verticais de 50 e 60 níveis mostraram comportamentos bastante distintos entre si nas estações de Cunha e Santa Virgínia (Figuras 5.39 e 5.40), nas quais em ambas as estações as previsões de 60 níveis indicaram grande quantidade de chuva entre final da tarde até noite. Em Cunha, alguns picos de chuva foram previstas pelo Eta-3km de 50 níveis a noite, mas não em grande quantidade quanto de 60 níveis após 18 horas UTC. As previsões de 50 níveis distribuíram a chuva de forma uniforme e com maior frequência do que de 60 níveis.

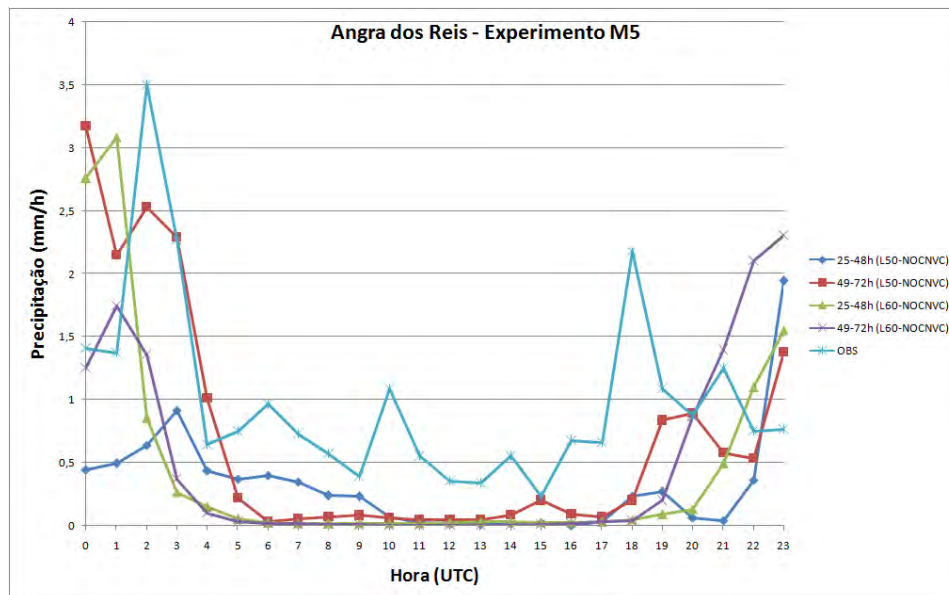


Figura 5.38 – Ciclo diurno médio da precipitação acumulada (mm/h) das previsões de 25-48h e 49-72h do modelo Eta, com resoluções verticais de 50 e 60 níveis, com esquema explícito (indicada como NOCNVC), e observações obtidas pela estação de Angra dos Reis.

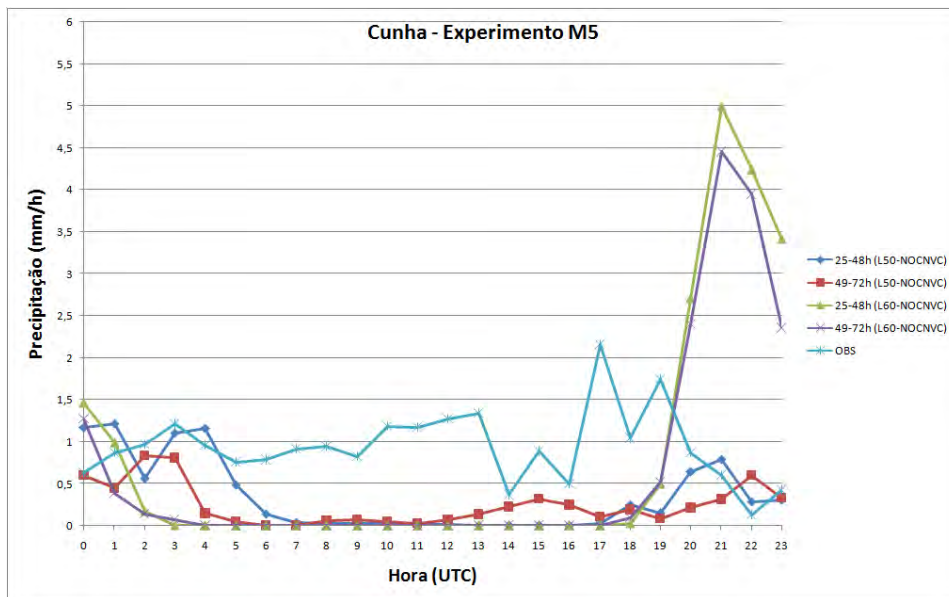


Figura 5.39 – Ciclo diurno médio da precipitação acumulada (mm/h) das previsões de 25-48h e 49-72h do modelo Eta, com resoluções verticais de 50 e 60 níveis, com esquema explícito (indicada como NOCNVC), e observações obtidas pela estação de Cunha.

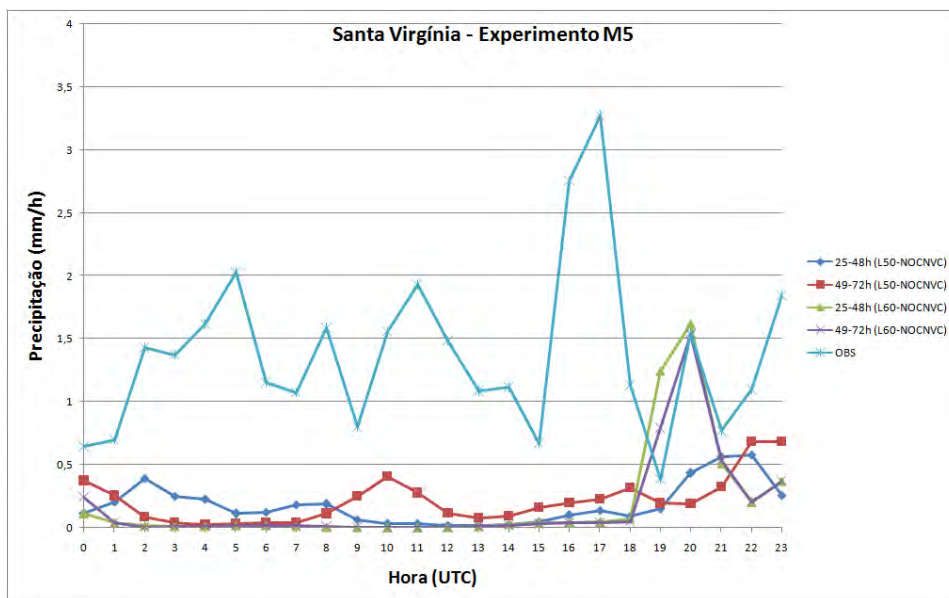


Figura 5.40 – Ciclo diurno médio da precipitação acumulada (mm/h) das previsões de 25-48h e 49-72h do modelo Eta, com resoluções verticais de 50 e 60 níveis, com esquema explícito (indicada como NOCNVC), e observações obtidas pela estação de Santa Virgínia.

5.6 Análise estatística

Os erros das previsões, contidos nos experimentos apresentados nos capítulos anteriores, são apresentados a partir de conjunto de medidas objetivas para avaliar a precipitação, que é uma das variáveis mais difíceis de ser prevista. Os índices estatísticos como Viés e RMSE foram calculados entre as séries simuladas e as observadas, correspondendo a cada estação: Angra dos Reis, Cunha e Santa Virgínia.

Tabela 5.1 – Coeficientes de correlação de precipitação acumulada prevista em resolução horizontal de 5 e 3 km, para o intervalo de 25-48h e de 49-72h, e observada referente aos Experimentos numéricos (M1, M2, M3, M4 e M5) das três estações: Angra dos Reis, Cunha e Santa Virgínia.

CORRELAÇÃO (25-48h e obs)	25-48h e obs			49-72h e obs		
	Angra dos Reis	Cunha	Santa Virgínia	Angra dos Reis	Cunha	Santa Virgínia
L50 (5km)	-0,019	0,064	0,053	-0,020	-0,224	0,081
L50 (3km)	-0,004	-0,126	0,284	-0,002	-0,083	0,070
L50-NOCNVC (3km)	0,312	-0,168	-0,107	0,612	-0,289	-0,028
L60 (3km)	0,194	0,089	0,122	0,353	0,097	0,090
L60-NOCNVC (3km)	0,281	-0,484	-0,187	0,325	-0,469	-0,156

Na tabela 5.1, os coeficientes de correlação mostraram melhoria de concordância de fase da precipitação em Angra dos Reis e Santa Virgínia quando foi aumentada a resolução horizontal de 5 para 3 km (L50-5km e L50-3km), que envolve do experimento M1, para os dois intervalos de previsão (25-48h e 49-72h). Apenas os coeficientes de correlação de Santa Virgínia mostraram valores positivos, indicando melhor representação, em relação à observação, comparada com Angra dos Reis e Cunha.

No experimento M2, foi realizada uma avaliação do modelo entre atuação do esquema de convecção e o esquema explícito com a resolução vertical de 50 níveis na produção de chuva (L50 e L50-NOCNVC). Os coeficientes de correlação referentes ao experimento M2 indicaram valores positivos em Angra dos Reis, indicando melhoria na representação da chuva com esquema explícito. Para as outras estações, as previsões de chuva explícita exibiram comportamento oposto do que foi analisado em Angra dos Reis, onde os coeficientes de correlação apontaram valores mais negativos, ou seja, o modelo não teve uma boa resposta nas simulações. O experimento M3, que está relacionada com a análise das previsões com e sem esquema de convecção para 60 níveis (L60 e L60-NOCNVC), mostrou que o ciclo diurno médio de chuva explícita, das previsões de 25-48h, de Angra dos Reis teve melhor correspondência de fase com as observações.

Para verificar o comportamento do ciclo diurno médio da precipitação prevista e observada com o aumento da resolução vertical, que correspondem aos experimentos M4, com atuação do esquema de convecção (L50 e L60), e M5, apenas com o uso do esquema explícito (L50-NOCNVC e L60-NOCNVC). Os coeficientes de correlação para experimento M4 obtiveram que o aumento da resolução vertical resultou na boa representação do modelo de uma forma geral, e para o experimento M5, apenas nas previsões de 49-72h de Angra dos Reis e Santa Virgínia tiveram melhoria em relação à observação.

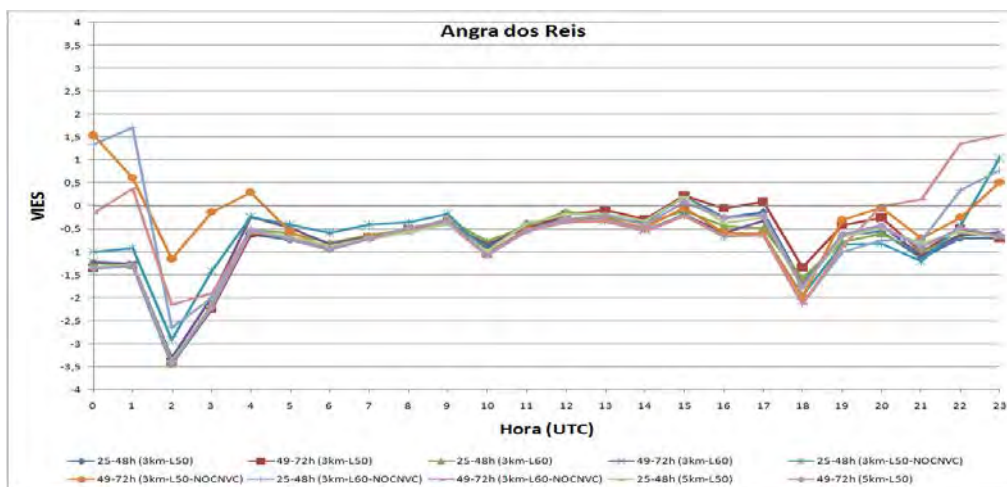
Foram feitos ciclos diurno médio de Viés para todas as rodadas realizadas para os experimentos do trabalho. Para o ciclo diurno médio em Angra dos Reis, da Figura 5.41.a, mostrou-se subestimativa de precipitação em todo o período. A maioria das previsões subestimaram a chuva que ocorreu as 2 horas UTC, que corresponde ao período que teve o maior índice de precipitação acumulada na série temporal observada e o modelo não conseguiu captar esse pico máximo de chuva (Figura 5.4). Apenas as previsões com esquema explícito apontaram superestimativa de chuva no mesmo horário.

Para Cunha, verificou-se que em boa parte do ciclo diurno médio o modelo subestimou a chuva conforme observadas na Figura 5.41.b. Nos horários entre 20 a 23 horas UTC, apenas as previsões de 60 níveis de esquema explícito mostraram superestimativa de precipitação.

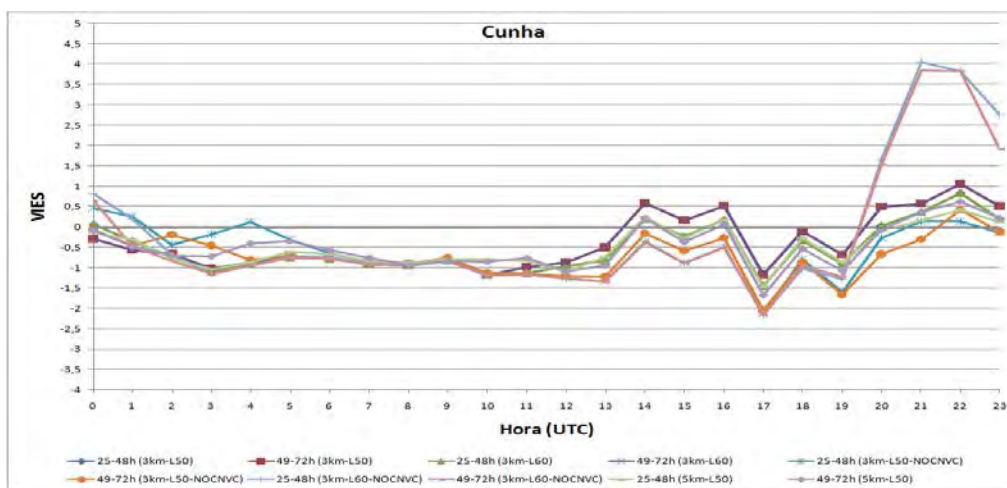
Em Santa Virgínia, em Figura 5.41.c, as previsões também praticamente indicaram subestimativa da chuva ao longo do período, onde às 17 horas UTC teve a maior subestimativa, que foi no instante em que a estação mostrou maior quantidade de chuva observada no ciclo diurno médio.

Nas figuras 5.42.a, 5.42.b e 5.42.c, as magnitudes do erro (RMSE) de todas as rodadas do modelo, para todas as estações, apresentaram as mesmas variações de precipitação que os seus respectivos ciclos diurnos médios de precipitação observada. Essas magnitudes foram maiores nos períodos em que a taxa de precipitação observada foi mais significativa e o modelo não foi capaz de prever na mesma taxa, resultando em subestimativa de chuva prevista mais acentuada no mesmo período. Notou-se que as previsões de 60 níveis com esquema explícito tiveram comportamentos diferentes em relação as outras previsões para o ciclo diurno, principalmente em Cunha (Figura 5.42.b), chegando a superar 8% de erro médio da precipitação.

a)



b)



c)

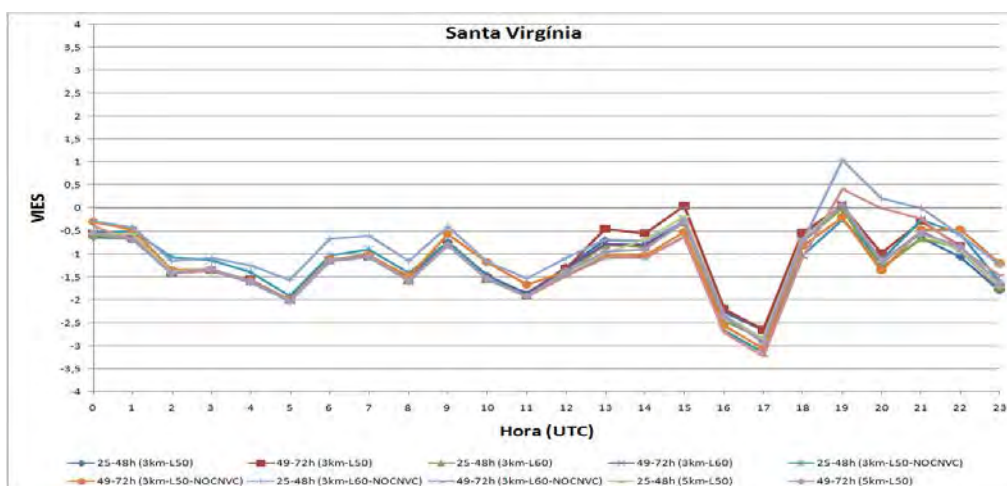
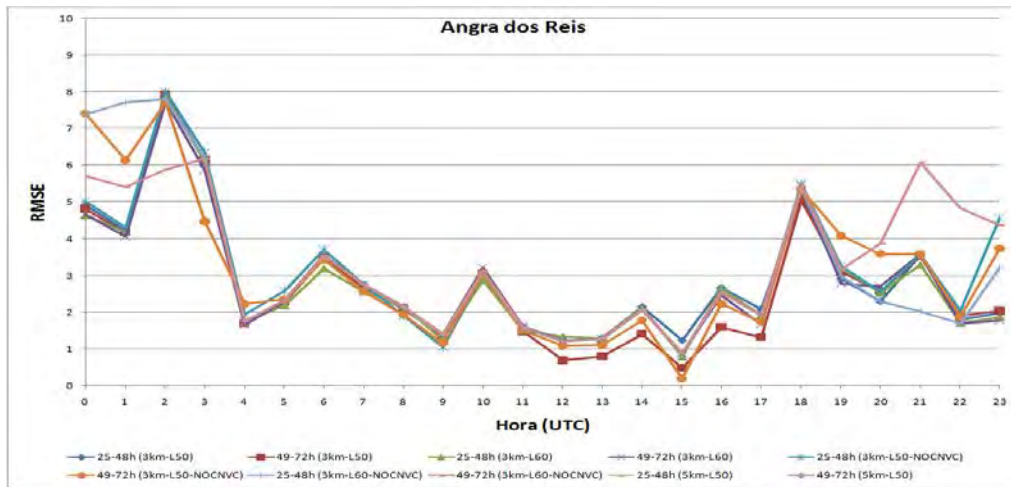
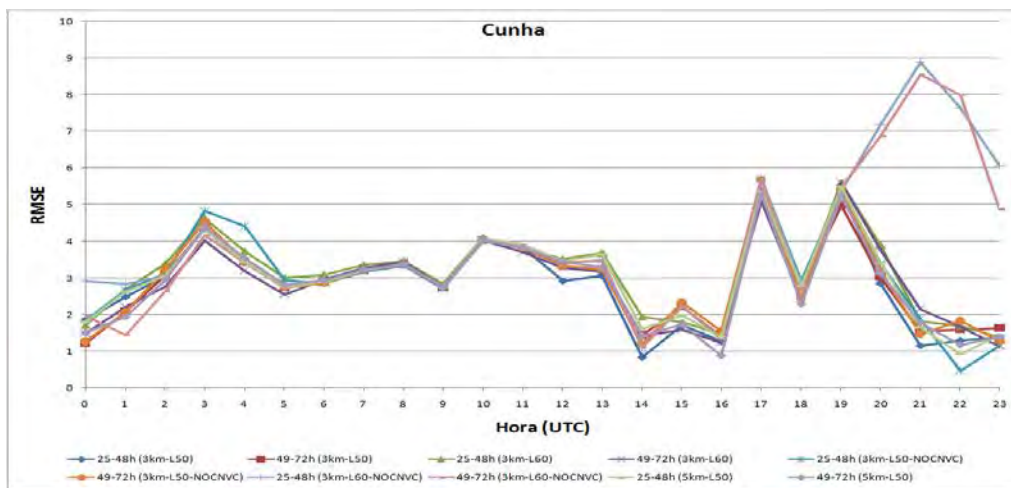


Figura 5.41 – Viés da precipitação acumulada (mm/h) no ciclo diurno médio das estações de Angra dos Reis (a), Cunha (b) e Santa Virgínia (c).

a)



b)



c)

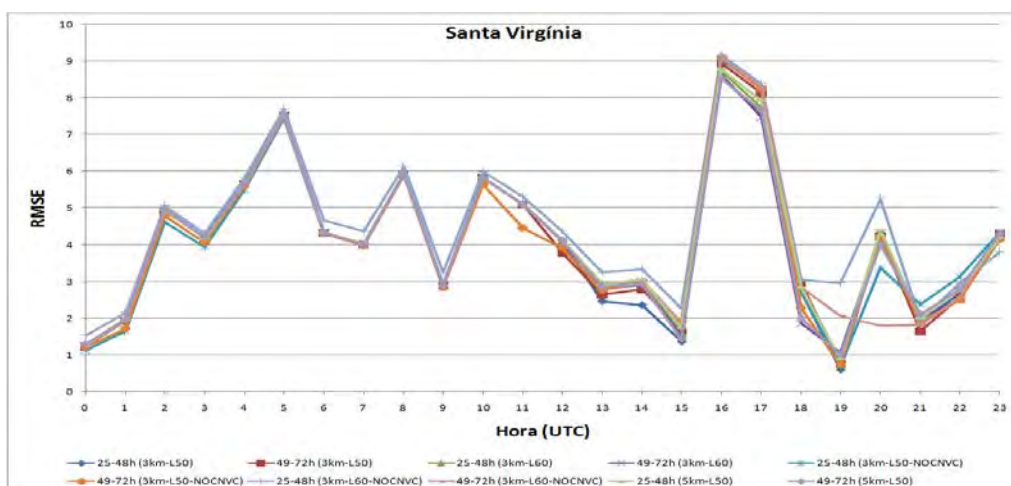


Figura 5.42 – RMSE da precipitação acumulada (mm/h) no ciclo diurno médio das estações de Angra dos Reis (a), Cunha (b) e Santa Virgínia (c).

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Eventos de chuva de alta intensidade em curto período ou de baixa intensidade em longo período podem causar grandes inundações e deslizamento de terra principalmente em regiões com topografias complexas, como no caso de Angra dos Reis no final de Dezembro de 2009. Baseado nisso, o objetivo desse trabalho foi avaliar as previsões do modelo Eta, que é utilizado operacionalmente pelo CPTEC-INPE para previsões de eventos extremos de chuva, e em alta resolução espacial, e para tratar adequadamente os problemas numéricos próximos de regiões com inclinação topográfica.

O caso de Angra dos Reis, que foi considerado como um evento de chuvas intensas que ocorreu no período entre 31 de Dezembro de 2009 a 01 de Janeiro de 2010, foi simulado com o modelo regional Eta com resoluções horizontais de 5 e 3 km, mantendo o mesmo domínio em ambos. Foram realizados cinco experimentos numéricos e comparados com as observações de estações localizadas em Angra dos Reis, Cunha e Santa Virgínia. A importância desses experimentos envolve a análise do esquema de convecção e desempenho do esquema de microfísica de nuvens em altas resoluções espaciais.

O aumento da resolução horizontal de 5 para 3 km, com esquema de convecção ligada, resultou na melhor representação do ciclo diurno da temperatura no período da tarde, adequando-se melhor com a observação. Em relação ao ciclo diurno da precipitação, o Eta-3km e o Eta-5km mostraram excesso de chuva no período não chuvoso e falta de chuva no período chuvoso. As previsões de 49-72h do Eta-3km tiveram a maior produção de chuva no final da tarde do que as previsões de 25-48h, no entanto, o modelo ainda teve dificuldade em atingir a quantidade chuva das observações. Assim como o trabalho do Case (2002), o modelo configurado com maior resolução horizontal se mostrou mais eficiente do que com resoluções mais baixas,

porém, mesmo assim apontou dificuldades em prever à hora e o local do início das tempestades e, conseqüentemente, da chuva.

Foram feitas simulações sem a atuação da parametrização de convecção e com isso apenas a microfísica de nuvens assumiu o papel na produção de chuva. Os resultados mostraram que as simulações com esquema explícito obtiveram precipitação mais intensa e mais concentrada num espaço, que condizem com os trabalhos de Mendes (2006) e Gomes (2010). Mendes (2006) afirmou que o aumento da resolução horizontal para 3 km implicou no aumento da precipitação prevista pelo esquema de microfísica de nuvens. Gomes (2010) também mostrou que a redução da atividade desse esquema de convecção possibilitou na maior atividade do esquema explícito, resultando um volume maior de precipitação. Quando foi analisada no ponto de vista do ciclo diurno médio, a chuva explícita se mostrou mais concentrada no período da noite. Para Angra dos Reis, onde houve a maior quantidade de precipitação acumulada observada no período da noite, o modelo representou bem o ciclo diurno médio naquele local e os coeficientes de correlação indicaram bom desempenho do modelo.

A mudança de resolução vertical também teve um grande impacto maior nas previsões. Nas simulações com a atuação de esquema de convecção, a produção e a frequência de chuva aumentaram durante toda a série temporal. Apesar disso, o modelo mostrou que as melhores representações de quantidade e distribuição de chuva foram obtidas pelas simulações com 60 níveis e sem a atuação de parametrização de convecção. O esquema explícito atuando sozinho conseguiu captar a chuva com maior intensidade, no entanto, o modelo ainda teve dificuldade em prever o evento quando ocorreram as maiores taxas de precipitação no final de Dezembro até o começo de Janeiro. As entradas das brisas previstas foram melhores representadas quando foi aumentada a resolução vertical para 60 níveis. Apesar disso, ainda não foi prevista com a mesma magnitude do vento observada na estação. A

intensidade do vento teve um impacto mais significativo na mudança de resolução vertical do que na horizontal.

Espera-se que este trabalho tenha contribuído para a realização de trabalhos futuros relacionados à região da Serra do Mar. Para finalização, algumas sugestões para serem realizadas nos trabalhos futuros:

- 1) Experimentos com maior resolução horizontal para avaliar com mais detalhes o comportamento de chuva explícita no ciclo diurno.
- 2) Simulações com condições iniciais de melhor resolução espacial.
- 3) Testes de sensibilidade com esquema de microfísica de nuvens de Ferrier, com a finalidade de determinar parâmetros sensíveis na produção de precipitação explícita e reduzir erros do modelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAKAWA, A., LAMB, V. R. Computational Design of the Basic Dynamical Processes of the UCLA Generation Circulation Model. **Methods in Computational Physics**, v. 17, p. 173-265, 1977.
- ASAI, T. A Numerical Study of Air-Mass Transformation Over the Japan Sea in Winter. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 43, p. 1-15. 1965.
- ATKINSON, B. W. Meso-scale Atmospheric Circulations. New York, CA: **Academic Press**, 1981, 495p.
- BETTS, A. K. A New Convective Adjustment Scheme. Part I: Observational and Theoretical Basis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 112, p. 677-691, 1986.
- BETTS, A. K., MILLER, M. J. A New Convective Adjustment Scheme. Part II: Single Column Tests using GATE Wave, BOMEX, ATEX and Arctic Air-Mass Data Sets. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 112, 693-709, 1986.
- BLACK, T. L. The New NMC Mesoscale Eta Model: Description and Forecast Examples. **Weather and Forecasting**, v. 9, p. 265-278, 1994.
- CASE, J. L., MANOBIANCO, J.; DIANIC, A. V.; WHEELER, M. M. Verification of High-Resolution RAMS Forecasts over East-Central Florida during the 1999 and 2000 Summer Months. **Weather and Forecasting**, v. 17, p. 1133-1151, 2002.
- CHEN, F., JANJIC, Z. I.; MITCHELL, K. Impact of Atmospheric Surface-Layer Parametrization in the New Land-Surface Scheme of the NCEP Mesoscale Eta Model. **Boundary Layer Meteorology**, v. 85, p. 391-421, 1997.
- CHOU, S. C. Modelo Regional Eta. **Climanálise – Boletim de Monitoramento e Análise Climática**, p. 203-207, out. 1996. (INPE-6882-PRE/2853).
- CLARK, A. J.; GALLUS, W. A. JR.; CHEN, T. C. Comparison of the Diurnal Precipitation Cycle in Convection-Resolving and Non-Convection-Resolving Mesoscale Models. **Monthly Weather Review**, v. 135, p. 3456-3473, 2007.
- DERECZYNSKI, C. P.; OLIVEIRA, J. S.; MACHADO, O. M. Climatologia da Precipitação no Município do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, p. 24-38, 2009.
- EK, M. B., MITCHELL, K. E.; LIN, Y.; ROGERS, E.; GRUNMANN, P.; KOREN, V.; GAYNO, G.; TARPLEY, J. D. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational

mesoscale Eta model. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 108, p. 1984-2012, 2003.

FAST, J. D. Forecasts of Valley Circulations Using the Terrain-Following and Step-Mountain Vertical Coordinates in the Meso-Eta Model. **Weather and Forecasting**, v. 18, p. 1192-1206, 2003.

FELS, S. B.; SCHWARZTKOPF, M. D. The Simplified Exchange Approximation: A New Method for Radiative Transfer Calculations. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 32, p. 1475-1488, 1975.

FERRIER, B., 2002: A New Grid-Scale Cloud and Precipitation Scheme in the NCEP Eta Model. In **Spring Colloquium on the the Physics of Weather and Climate: Regional Weather Prediction Modelling and Predictability**, Trieste, Italy. **Proceedings...** Trieste: ITCP, 2002.

FERRIER, B., LIN, Y.; PARRISH, D.; PONDECA, M.; ROGERS, E.; MANIKIN, G.; EK, M.; HART, M.; DIMEGO, G.; MITCHELL, K.; CHUANG, H. Changes to the NCEP Meso Eta Analysis and Forecast System: Modified Cloud Microphysics, Assimilation of GOES Cloud-top Pressure, Assimilation of NEXRAD 88D Radial Wind Velocity Data. **NWS Technical Procedures Bulletin**. 2003. Disponível em: <<http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/tpb.spring03/tpb.htm>>. Acesso em: 30 Maio 2013.

FONSECA, J. F. B. **Estudo da Previsibilidade de Eventos Severos sobre o Sudeste da América do Sul com ênfase na Região da Serra do Mar usando Previsão de Curto Prazo por Ensemble**. Tese de Doutorado em Meteorologia, 218p. (INPE-16658-TDI/1616). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 2010.

FRITSCH, J. M.; CHAPPELL, C. F. Numerical Prediction of Convectively driven Mesoscale Pressure Systems, Part I: Convective Parametrization. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 37, p. 1722-1733, 1980.

GOMES, J. L. **Estrutura dos Sistemas Precipitantes de Verão do Estado de São Paulo: Estudo Diagnóstico e Numérico**. Tese de Doutorado em Meteorologia, 156p. (INPE-16659-TDI/1617). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 2010.

HOUZE, R. A. JR. Mesoscale Convective Systems. **Review of Geophysics**, 42, 2004.

JANJIC, Z. I., 1979: Forward-backward scheme modified to prevent two-grid-interval noise and its application in sigma coordinate models. **Contributions to Atmospheric Physics**, 52, 69-84.

_____. The Step-mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer, and Turbulence Closure Schemes. **Journal of the Atmospheric Sciences**, 122, p. 927-945, 1994.

_____. **Nonsingular implementation of the mellor-yamada level 2.5 scheme in the NCEP Meso Model**. 2001. 61p. (NOAA/NWS/NCEP Office Note #437). Disponível em: <<http://www.emc.ncep.noaa.gov/officenotes/newernotes/on437.pdf>>. Acesso em: 30 Maio 2013.

KAIN, J. S. The Kain-Fritsch Convective Parametrization: An Update. **Journal of Applied Meteorology**, 43, p. 170-181, 2004.

KODAMA, Y. M. Large-scale Common Features of Sub-tropical Precipitation Zones (The Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ). Part I: Characteristics of Subtropical Frontal Zones. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, 70, p. 813-835, 1992.

_____. Large-scale Common Features of Sub-tropical Precipitation Zones (The Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ). Part II: Conditions of the Circulations for Generating the STCZs. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, 71, p. 581-610, 1993.

LACIS, A. A.; HANSEN, J. A. Parametrization of the Absorption of Solar Radiation in the Earth's Atmosphere. **Journal of the Atmospheric Sciences**, 31, p. 118-133, 1974.

MADDOX, R. A. Mesoscale Convective Complex. **Bulletin American Meteorological Society**, 61, p. 1374-1387, 1980.

MARQUES, V. S.; CARDOSO, D. ; F. M. A. PINHEIRO; MOREIRA, J. C. Análise de Temporais Intensos no Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 16, p. 145-156, 2001.

MELLOR, G. L.; YAMADA, T. A Hierarchy of Turbulence Closure Models for Planetary Boundary Layers. **Journal of the Atmospheric Sciences**, 31, p. 1791-1806, 1974.

_____. Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problems. **Reviews of Geophysics and Space Physics**, 20, 4, p. 851-875, 1982.

MESINGER, F. A Blocking Technique for Representation of Mountains in Atmospheric Models. **Rivista di Meteorologia Aeronautica**, 44, p. 195-202, 1984.

_____. Bias Adjusted Precipitation Threat Scores. **Advances in Geosciences**, 16, p. 137-142, 2008.

MENDES, L. L. **Simulação Numérica de Evento Extremo de Chuva: Um Estudo de Caso sobre Angra dos Reis – RJ**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, 136p. (INPE-14599-TDI/1181). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 2006.

MONIN, A.S.; OBUKHOV, A. M. Basic Laws of Turbulent Mixing in the Surface Layer of the Atmosphere. **Tr. Akad. Nauk SSSR Geofiz. Inst**, 24, p. 163–187, 1954.

MOURÃO, C. E. F. **Estudo Numérico da Produção de Chuvas Intensas na Região da Serra do Mar Paulista**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, 119p. (INPE-16681-TDI/1626). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 2010.

NOGUEIRA, J. H. A. **Sensibilidade da Precipitação simulada na Região do Centro de Lançamento de Alcântara a Esquemas de Convecção Explícita: Estudos de Caso**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, 154p. (INPE-0000-TDI/00). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 2010.

OLIVEIRA, A. P.; SILVA DIAS, P. L. **Aspectos observacionais da brisa marítima em São Paulo**. II Congresso Brasileiro de Meteorologia , 2, Pelotas, Rio Grande do Sul, p. 129-145, 1982.

ORLANSKI, I. A Rational Subdivision of Scales for Atmospheric Processes. **Bulletin of The American Meteorological Society**, 56, p. 527-530, 1975.

PAULSON, C. A. The Mathematical Representation of Wind Speed and Temperature Profiles in the Unstable Atmospheric Surface Layer. **Journal of Applied Meteorology**, 9, p. 857-861, 1970.

PIELKE, R. A. Mesoscale Meteorological Modeling. San Diego, CA: **Academic Press**, 2002, 676p.

QUADRO, M. F. L.; SILVA DIAS, M. A. F.; HERDIES, D. L.; GONÇALVES, L. G. G. Análise Climatológica da Precipitação e do Transporte de Umidade na Região da ZCAS através da Nova Geração de Reanálises. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 27, p. 152-162, 2012.

ROCHA, A. M. G. C.; GANDU, A. W. A Zona de Convergência do Atlântico Sul. **Climanálise Especial: Edição Comemorativa de 10 anos**, 140-142, 1996.

RODRIGUEZ, D. A. **Impactos dos Padrões Espaciais da Vegetação nas Variáveis Atmosférica e Terrestre do Ciclo Hidrológico em Bacia de Floresta**. Tese de Doutorado em Meteorologia, 220p. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 2011.

ROGERS, E., T. BLACK, B. FERRIER, Y. LIN, D. PARRISH, G. DIMEGO, 2001: Changes to the NCEP Meso Eta Analysis and Forecast System: Increase in Resolution, New Cloud Microphysics, Modified Precipitation Assimilation, Modified Precipitation Assimilation, Modified 3DVAR Analysis. **NWS Technical Procedures Bulletin**. Disponível em: <<http://wwwt.emc.ncep.noaa.gov/mmb/mmbpll/eta12tpb/>>. Acesso em: 30 Maio 2013.

SANCHES, M. B. **Análise Sinótica da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) utilizando-se a Técnica de Composição**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 2002.

SATYAMURTY, P.; MATTOS, L. F.; NOBRE, C. A.; SILVA DIAS, P. L. Tropics – South America. In: Meteorology of the Southern Hemisphere. Meteorological Monographs. **American Meteorological Society**, p. 119-139, 1998.

SCHLÜNZEN, K. H. On the Validation of High-Resolution Atmospheric Mesoscale Models. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 67&68, p. 479-492, 1997.

SELUCHI, M. E.; CHOU, S. C. Synoptic Patterns Associated with Landslide Events in the Serra do Mar, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, 98, p. 67-77, 2009.

SELUCHI, M. E.; MARENGO, J. A. A tropical-mid latitude exchange of air masses during summer and winter in South American: Climatic aspect and extreme events. **International Journal of Climatology**, v. 20, p. 1167-1119, 2000.

SHEM, W.; SHEPHERD, M. On the Impact of Urbanization on Summertime Thunderstorms in Atlanta: **Two Numerical Model Case Studies**. **Atmospheric Research**, 92, 172-189, 2009.

SIMMONS, A. J.; UPPALA, S.; DEE, D.; KOBAYASHI, S. **Era-Interim: New ECMWF Reanalysis Products from 1989 Onwards**, 110, p. 25-35, 2007.

STEINER, M.; HOUZE, R. A. JR.; YUTER, S. E. Climatological Characterization of Three-Dimensional Storm Structure from Operational Radar and Rain Gauge Data. **Journal of Applied Meteorology**, 34, p. 1978-2007, 1995.

SUNDQVIST, H.; BERGE, E.; KRISTJÁNSOON, J. E. Condensation and Cloud Parametrization Studies with a Mesoscale Numerical Weather Prediction Model. **Monthly Weather Review**, 117, p. 1641-1657, 1989.

TOMASELLA, J.; MOIRA, D. Teste com Novo Mapa de Solo e Umidade do Solo Inicial. In: **III Workshop Projeto Serra do Mar**, 3., 2008, São Sebastião, SP.

VALVERDE BRAMBILA, M. C.; FERREIRA, N. J.; VELHO, H. F. C. **Padrão de Verão: ZCAS-VCAN atuando Sobre a Região Sudeste do Brasil**. XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Fortaleza, Ceará, 2004.

VALVERDE RAMÍREZ, M.C. **Padrões climáticos dos vórtices ciclônicos em altos níveis no Nordeste do Brasil**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, 132p. (INPE-6408-TDI/618). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 1996.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. Atmospheric Science: An Introduction Survey. **Academic Press**, 483pp, 2006.

ZHAO, Q.; CARR, F.H. A Prognostic Cloud Scheme for Operational NWP Models. **Monthly Weather Review**, 125, p. 1931-1953, 1997.

ZHONG, S.; FAST, J. An Evaluation of the MM5, RAMS, and Meso-Eta Models at Subkilometer Resolution Using VTMX Field Campaign Data in the Salt Lake Valley. **Monthly Weather Review**, 131, p. 1301-1322, 2003.