

**Universidade Federal do Rio de Janeiro**

**Simulações de Eventos de Chuvas Intensas no Estado do Rio de Janeiro usando o Modelo WRF**

Sheila Felizardo Padilha

Dissertação de Mestrado do Curso de pós-graduação em Meteorologia, IGEO, da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Orientador: Isimar de Azevedo Santos

Rio de Janeiro

# Simulações de Eventos de Chuvas Intensas no Estado do Rio de Janeiro usando o Modelo WRF

Sheila Felizardo Padilha

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia do Instituto de Geociências do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências (área: Meteorologia).

Orientador: Isimar de Azevedo Santos

Rio de Janeiro  
Agosto de 2011

# Simulações de Eventos de Chuvas Intensas no Estado do Rio de Janeiro usando o Modelo WRF

Sheila Felizardo Padilha

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DO CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ) COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM METEOROLOGIA.

Examinada por:

---

Prof. Isimar de Azevedo Santos, D. Sc.

---

Prof. Wallace Figueiredo Menezes, D. Sc.

---

Prof<sup>a</sup>. Carla Maciel Salgado, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

AGOSTO DE 2011

Padilha, Sheila Felizardo

Simulações de Eventos de Chuvas Intensas no Estado do Rio de Janeiro usando o Modelo WRF / Sheila Felizardo Padilha – Rio de Janeiro: UFRJ/PPGM/IGEO/CCMN, 2011.

xiv, 71 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Isimar de Azevedo Santos.

Dissertação (Mestrado) – UFRJ/PPGM/IGEO/CCMN Programa de Pós-graduação Meteorologia, 2011.

Referências Bibliográficas: p. 67-71

1. Chuvas Intensas no Rio de Janeiro. 2. Previsão Numérica do Tempo. 3. Modelo de mesoescala WRF. I. Santos, Isimar de Azevedo. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, PPGM/IGEO/CCMN, Programa de Pós-graduação em Meteorologia. III. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências.

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGM/IGEO/CCMN/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

Simulações de Eventos de Chuvas Intensas no Estado do Rio de Janeiro  
usando o Modelo WRF

Sheila Felizardo Padilha

Agosto/2011

Orientador: Isimar de Azevedo Santos

Programa de Pós-graduação em Meteorologia

Neste estudo foram simulados três eventos de chuvas intensas ocorridas no Estado do Rio de Janeiro: o primeiro ocorrido em Angra dos Reis no fim de 2009, o segundo com enchentes e deslizamentos de terra em abril de 2010 nas cidades do Rio de Janeiro, Niterói e São Gonçalo, e o terceiro evento as chuvas intensas na região Serrana do estado do Rio de Janeiro, atingindo drasticamente as cidades de Petrópolis, Teresópolis e Nova Friburgo. O modelo de mesoescala WRF foi integrado em grades aninhadas de 54, 18, 6 e 2 km, sendo assimiladas as análises e previsões do NCEP. Os resultados, embora não totalmente satisfatórios, demonstraram que a técnica de modelagem numérica de eventos de chuvas intensas é promissora.

Palavras chave: Chuvas intensas; Modelagem numérica; Modelo WRF.

Abstract of Dissertation presented to PPGM/IGEO/CCMN/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

Simulations of heavy rainfall events in the State of Rio de Janeiro using the  
WRF Model

Sheila Felizardo Padilha

August/2011

Advisor: Isimar de Azevedo Santos

Department: Meteorology

In this study was simulated three events of heavy rain that occurred in the State of Rio de Janeiro: the first took place in Angra dos Reis at the end of 2009, the second with floods and landslides in April 2010 in the cities of Rio de Janeiro, Niterói and Sao Goncalo, and the third event of heavy rains in the mountainous region of the state of Rio de Janeiro, drastically affecting the cities of Petrópolis, Teresópolis and Nova Friburgo. The WRF mesoscale model has been integrated on nested grids of 54, 18, 6 and 2 km, and assimilated the analysis and forecasts of the NCEP. The results, although not entirely satisfactory, demonstrated that the technique of numerical modeling of heavy rainfall events is promising.

Key words: Heavy rainfall; Numerical modeling; WRF model.

## Sumário

Agradecimentos

Resumo

Abstract

Lista de Figuras

Lista de Quadros

1. Introdução
2. Revisão Bibliográfica
3. Metodologia e Dados
  - 3.1 Metodologia
    - 3.1.1 O Modelo WRF
    - 3.1.2 Estrutura das Grades do Modelo
    - 3.1.3 Domínio e Grades
    - 3.1.4 Coordenadas Verticais
    - 3.1.5 Equações Governantes
    - 3.1.6 Discretização Temporal
    - 3.1.7 Discretização Espacial
    - 3.1.8 Aninhamento de Grades
    - 3.1.9 Inicialização e Condições de Fronteira
  - 3.2 Dados e Análises
    - 3.2.1 Dados Convencionais
    - 3.2.2 Imagens de Satélite Meteorológico
    - 3.2.3 Dados Gerados pelo Modelo WRF
4. Resultados

- 4.1 Estudo do Caso Angra dos Reis
  - 4.1.1 Descrição do Caso Angra dos Reis
  - 4.1.2 Simulação do Caso Angra dos Reis pelo WRF por 72 horas
  - 4.1.3 Simulação do Caso Angra dos Reis pelo WRF por 144 horas
- 4.2 Estudo do Caso Morro do Bumba
  - 4.2.1 Descrição do Caso Morro do Bumba
  - 4.2.2 Simulação do Caso Morro do Bumba com o Modelo WRF
- 4.3 Estudo do Caso Região Serrana
  - 4.3.1 Descrição do Caso Região Serrana
  - 4.3.2 Simulação do Caso Região Serrana com o Modelo WRF por 72 horas
  - 4.3.3 Caso Região Serrana com o Modelo WRF por 96 horas
  - 4.3.4 Caso Região Serrana com o Modelo WRF por 120 horas
  - 4.3.5 Caso Região Serrana com o Modelo WRF por 144 horas
  - 4.3.6 Previsão com a Microfísica do Esquema de Parametrização de Goddard
- 5. Conclusões e Recomendações
- 6. Referências bibliográficas

Apêndice: Parametrizações Físicas do Modelo WRF

## **Agradecimentos**

DEUS, meu amado amigo de todas as horas, agradeço por tudo que o Senhor concedeu-me até hoje.

Queridos mãe (in memorium) e pai agradeço por permitirem a minha chegada a este mundo, por me educarem com muito amor, carinho e bons exemplos.

Agradeço aos amados sobrinhos, ao meu irmão e a minha cunhada e em especial ao meu afilhado Cezar que foi fundamental neste último ano, me ajudando sempre que precisei.

Agradeço ao Professor Isimar de Azevedo Santos, por todas as suas sábias orientações e sugestões que me auxiliaram a encontrar as soluções para as dificuldades que surgiram naturalmente no desenvolvimento deste trabalho e todo o seu otimismo contagiante que me ajudou chegar até aqui.

Agradeço a Dr<sup>a</sup> Tânia Ocimoto Oda, da Marinha do Brasil que em momento crucial auxiliou-me a resolver os obstáculos que surgiram na rodada do modelo.

Agradeço ao meteorologista Reginaldo da Aquamet que sem o seu apoio na instalação do modelo, não teria conseguido realizar este trabalho no tempo devido.

Agradeço ao Sr. Honorio dos Santos Filho, Vice-Coordenador do SIMERJ, que proporcionou condições para que eu pudesse participar das aulas ministradas durante a primeira fase do mestrado

Agradeço ao Sr. José Sozinho (in Memorium), além de ter sido um grande amigo, foi um incentivador para que eu buscasse realizar meu sonho de fazer o Mestrado em Meteorologia.

Aos funcionários do Departamento de Meteorologia e das bibliotecas que sempre me atenderam e auxiliaram com muita competência e carinho.

## Lista de Figuras

Figuras	Páginas
1.1 Estado do Rio de Janeiro	2
1.2 Rio de Janeiro. Baía de Ilha Grande. Ilha Grande	6
1.3 Enseada do Bananal. Região do deslizamento ocorrido em Ilha Grande, no dia 31 de dezembro de 2009	6
1.4 Praia da Enseada do Bananal, onde ocorreu um dos deslizamentos no dia 31 de dezembro de 2009, no Caso Angra dos Reis	7
1.5 Morro do Bumba, aterro sanitário onde ocorreu o deslizamento em Niterói	8
1.6 Deslizamento ocorrido no Morro do Bumba (aterro sanitário) em Niterói, no dia 6 de abril de 2010	9
1.7 Mapa Região Serrana	10
1.8 Região Serrana antes da catástrofe e depois da catástrofe	11
1.9 Mapa da destruição geral das cicatrizes do desastre de janeiro de 2011	12
1.10.a Imagens infravermelhas do GOES-12 – (a) 11 de janeiro de 2011 às 06:00 UTC mostra a ZCOU	13
1.10.b Imagens infravermelhas do GOES-12 – (b) 14 de janeiro de 2011 às 06:00 UTC mostra a ZCAS	13
1.11 Enxurrada ocorrida em Teresópolis no período iniciado no dia 12 de janeiro de 2011	14
2.1 Envoltória de deslizamentos (TATIZANA et al., 1987a, b)	25
2.2 Envoltória de deslizamentos : acumulado de chuvas em uma hora x acumulado em 96 horas incluindo o evento (D'ORSI et al., 1997)	26
2.3 Envoltória de deslizamentos: acumulado de chuvas em 24 horas x acumulado em 96 horas incluindo o evento (D'ORSI et al., 1997)	26

3.1.a	Grades aninhadas - Grade mãe (1) de 18 km e Grade 2 de 6 km	32
3.1.b	Grades aninhadas - Grade 1 de 18 km e Grade 3 de 2km	32
3.1.c	Grades aninhadas - Grade 2 de 6 km e Grade 3 de 2 km	33
4.1.1.a	Imagem do canal infravermelho do GOES-12 – 31 de dezembro de 2009 às 21:00 UTC	36
4.1.1.b	Imagem do canal infravermelho do GOES-12 – 01 de janeiro de 2010 às 03:00 UTC	36
4.1.2.a	Carta de pressão ao nível do mar em 31 de dezembro de 2009 às 1200Z	37
4.1.2.b	Carta de pressão ao nível do mar em 01 de janeiro de 2010 à 00Z	38
4.1.3	Rede Pluviométrica CBMERJ- Angra dos Reis/Dez09 com o número de dias de chuvas	39
4.1.4	Rede Pluviométrica CBMERJ – Angra dos Reis/Jan10 com o número de dias de chuvas	39
4.1.5	: Precipitação acumulada (simulada) em 72 h (3 dias) do caso de chuvas intensas em Angra dos Reis	40
4.1.6	Precipitação acumulada implícita. Caso chuvas intensas de Angra dos Reis	41
4.1.7	Precipitação Acumulada de 144 h (6 dias) do caso de chuvas intensas em Angra dos Reis	42
4.1.8	Precipitação convectiva (implícita) acumulada de 144h (6 dias) do caso de chuvas intensas em Angra dos Reis	43
4.1.9	Precipitação microfísica acumulada de 144h (6 dias) do caso de chuvas intensas em Angra dos Reis	44
4.2.1	Chuva Acumlada Mensal x Chuva (Normal Climatológica 61-90)	45
4.2.2	Chuva acumulada 24h, mês abril de 2010	46
4.2.3	Índice Pluviométricodas estações da Fundação GEORIO e da estação Climatológica do Laboratório de Geociências da	46

	FFP/UERJ, situada em São Gonçalo. Período 05 de abril de 2010	
4.2.4	Índice Pluviométrico das estações da Fundação Geo-Rio e da estação Climatológica do Laboratório de Geociências da FFP/UERJ, situada em São Gonçalo. Período 06 de abril de 2010	46
4.2.5	Imagens infravermelhas do GOES-12 – 04 de abril de 2010 às 19:00 UTC	47
4.2.6.a	Carta de pressão ao nível do mar em 5 de abril de 2010 às 1200Z	48
4.2.6.b	Carta de pressão ao nível do mar em 6 de abril de 2010 às 00Z	49
4.2.7	Anomalia dos campos do vento e da umidade específica (g/kg) no intervalo entre à 0 UTC do dia 4 e 0 UTC do dia 5 de abril de 2010	50
4.2.8	Anomalia dos campos do vento e da umidade específica (g/kg) no intervalo entre à 0 UTC do dia 5 e 0 UTC do dia 6 de abril de 2010	51
4.2.9	Anomalia dos campos do vento e da umidade específica (g/kg) no intervalo entre à 0 UTC do dia 6 e 0 UTC do dia 7 de abril de 2010	52
4.2.10	Precipitação acumulada (simulada) em 72 h (3 dias) do caso de chuvas intensas no Morro do Bumba	53
4.2.11	Perfil vertical da razão de mistura da água de chuva (g/kg) às 20UTC – Caso Morro do Bumba	54
4.2.12	Razão de mistura da água de chuva (g/kg) -Caso Morro do Bumba	54
4.2.13	Umidade específica (g/kg) no dia 5/4/2010 às 23UTC. Caso Morro do Bumba.	55
4.2.14	Vento a 1.000hPa – Caso Morro do Bumba em 04 de abril de 2010 às 23 UTC	56
4.2.15	Vento a 1.000hPa – Caso Morro do Bumba em 05 de abril	56

	de 2010 às 23 UTC.	
4.2.16	Temperatura a 2m. Caso Chuvas intensas do Morro do Bumba em 04/04/2010	58
4.2.17	Temperatura a 2m. Caso das chuvas intensas no Morro do Bumba em 05/04/2010	58
4.2.18	Temperatura a 2m. Caso Chuvas intensas Morro do Bumba em 06/04/2010	59
4.3.1	Imagens infravermelhas do GOES-12 – 11 de janeiro de 2011 às 03:00 UTC	61
4.3.2	Imagens infravermelhas do GOES-12 – 12 de janeiro de 2011 às 3:00 UTC	61
4.3.3.a	Carta de pressão ao nível do mar - 11 de janeiro de 2011 1200Z	62
4.3.3.b	Carta de pressão ao nível do mar - 12 de janeiro de 2011 à 00Z	63
4.3.4	Localização das estações do INEA	64
4.3.5	Chuva observada na estação Nova Friburgo do INEA em 11 de janeiro de 2011	64
4.3.6	Chuva observada na estação Nova Friburgo do INEA em 12 de janeiro de 2011.	65
4.3.7	Simulação de 3 dias de Precipitação. Caso Região Serrana	66
4.3.8	Precipitação acumulada (simulada) em 72 horas (3 dias) do caso Região Serrana (Nova Friburgo)	67
4.3.9	Precipitação acumulada (simulada) em 72 h (3 dias) do caso Região Serrana (Petrópolis)	68
4.3.10	Precipitação convectiva acumulada num período de 72 horas, num horizonte de 72 horas	69
4.3.11	Precipitação de microfísica acumulada num período de 72 horas, num horizonte de 72 horas	69
4.3.12	Precipitação convectiva acumulada por um período de 72 horas, num horizonte de 96 horas	70
4.3.13	Precipitação acumulada da microfísica, por um período de	71

	72 horas, num horizonte de 96 horas	
4.3.14	Precipitação convectiva acumulada por um período de 72 horas, num horizonte de 120 horas	71
4.3.15	Precipitação acumulada da microfísica, em 72 horas, num horizonte de 120 horas	72
4.3.16	Precipitação convectiva acumulada por um período de 72 horas, num horizonte de 144 horas	73
4.3.17	Precipitação convectiva acumulada por um período de 72 horas, num horizonte de 120 horas	73
4.3.18	Precipitação acumulada por microfísica por um período de 72 horas, num horizonte de 120 horas	74
4.3.19	Precipitação acumulada num período de 72 horas, num horizonte de 72 horas, usando o esquema de microfísica de Goddard	75

## Lista de Quadros

Quadro		Página
2.1	Classificação Racional de Olanski	19
2.2	Classificação dos Deslizamentos segundo TATIZANA et al. (1987a, b)	25
3.1	Descrição e dimensões das grades usadas no caso Angra dos Reis	33
3.2	Descrição e dimensões das grades usadas nos casos Morro do Bumba e Região Serrana	34

## 1. Introdução

Nestes últimos anos as chuvas intensas têm castigado o Estado do Rio de Janeiro e este tipo de evento meteorológico tem preocupado muito a população do estado, a Defesa Civil, os Centros de Previsão do Tempo Regional e Nacional, os meteorologistas, profissionais envolvidos com pesquisas nesta área e também os Governos Federal e Estadual.

O Estado do Rio de Janeiro é uma das 27 unidades federativas do Brasil. Situa-se na parte leste da região Sudeste do Brasil, tendo como limites os estados de Minas Gerais ao norte e noroeste, Espírito Santo a nordeste e São Paulo ao sudoeste. Tendo também o Oceano Atlântico a leste e sul. Ocupa uma área de 43.696,054 km<sup>2</sup> e sua capital é homônima, Rio de Janeiro.

O Estado do Rio de Janeiro é uma importante unidade da federação, possui uma população estimada de 15.993.583, e um total de 92 municípios (IBGE, 2011), tendo entre os mais populosos municípios do Rio de Janeiro, São Gonçalo, Niterói, Nova Friburgo, Petrópolis entre outros.

O relevo do Estado do Rio de Janeiro é muito variado, apresentando, por exemplo, escarpas elevadas, morros, colinas e vales, rochas diversificadas e possui duas unidades de relevo, a baixada fluminense, que ocupa quase metade do território, e o planalto fluminense (oeste do território).

O Estado do Rio de Janeiro possui muitas cidades com vocação turística, como por exemplo, Angra dos Reis, Paraty, Petrópolis, Teresópolis entre outras.

No Estado do Rio de Janeiro predominam os climas tropical (baixadas) e tropical de altitude (planalto), mas cada região possui sua característica climática.

Na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, domina o clima tropical semiúmido, com chuvas abundantes no verão, que é muito quente e invernos secos, com temperaturas amenas, e a sua temperatura média anual, é de 22°C a 24°C com índice pluviométrico entre 1.000 a 1.500 milímetros anuais. Nesta região encontra-se a cidade do Rio de Janeiro que é considerada a segunda maior mancha urbana do Brasil, um dos maiores centros econômicos e culturais da América Latina.



A cidade do Rio de Janeiro desenvolveu-se ao redor do Maciço da Tijuca, que a divide em “Zona Norte” e “Zona Sul”. O relevo acidentado e diversificado da cidade, como os dois maciços, Gericinó-Mendanha ao norte e da Pedra Branca a oeste, contribui para a grande variabilidade espacial da precipitação (Dereczynski et al., 2009). Em sua área territorial de 1.224,56 km<sup>2</sup>, 70,7% é urbanizada (IPP, 2005).

Nos pontos mais elevados da região serrana, limite entre a Baixada Fluminense e a Serra Fluminense, observa-se o clima tropical de altitude, com verões um pouco quentes e chuvosos e invernos frios e secos e temperatura média anual de 16°C. Na maior parte da Serra Fluminense, o clima também é tropical de altitude, com verões variando entre quentes e amenos e na maioria das vezes, chuvosos, e invernos frios e secos, com índice pluviométrico elevado, se aproximando dos 2.500 mm anuais em alguns pontos.

Nas Baixadas Litorâneas, a famosa Região dos Lagos, o clima é tropical marítimo, com média anual de 24°C com verões moderadamente quentes, mas amenizados devido ao vento do mar e invernos amenos. Além disto, também é devido ao vento frio vindo do mar, com águas frias devido à ressurgência, que esta região é uma das mais secas do Sudeste, com precipitação anual de apenas cerca de 750mm em cidades como Arraial do Cabo, Cabo Frio e Armação dos Búzios, e não passando de cerca de 1.100 mm nas cidades mais chuvosas da região, Maricá e Saquarema.

Ocasionalmente, podem ocorrer precipitações de neve nas partes altas do Parque Nacional do Itatiaia, onde está situado o Pico das Agulhas Negras. Em 1985, foi registrada precipitação de neve nas proximidades deste pico, com acumulações de 1 metro em certos pontos.

Quanto à vegetação no Estado do Rio de Janeiro, atualmente, as florestas ocupam aproximadamente dez por cento do território e uma das causas desta pequena porcentagem é devido à ocupação agropastoril, pois o desmatamento modificou sensivelmente a vegetação original do estado. As florestas concentram-se principalmente nas serras e no ponto mais alto destas. Há grandes extensões de campos usados para a pecuária, mas que foram produzidos devido à destruição da vegetação original. No litoral e no fundo das baías, registra-se a presença de manguezais.

O principal rio do estado é o Paraíba do Sul, que nasce em Taubaté, estado de São Paulo, e desemboca no Oceano Atlântico no norte fluminense. O litoral é pontilhado por numerosas lagoas, antigas baías fechadas por cordões de areia. As mais importantes são a Lagoa Feia, a maior do estado, e as lagoas de Saquarema, Maricá, Marapendi, Jacarepaguá e Rodrigo de Freitas, as três últimas no município do Rio de Janeiro.

O Estado conta ainda com a maior laguna hipersalina do mundo, a Laguna Araruama, que é chamada de lagoa pelos leigos por um erro, pois além de ser salobra tem ligação com o mar através do Canal do Itajuru. Embora ainda haja muitas informações sobre o Estado do Rio de Janeiro que são de importância relevante, como por exemplo, a educação, a etnia, a política, a economia etc., neste estudo elas não serão abordadas.

A principal motivação deste estudo é de auxiliar a todos aqueles que foram afetados direta ou indiretamente pelas chuvas intensas que ocorreram no estado do Rio de Janeiro nos últimos anos, e isto inclui população, ora vítima e ora algoz, o Estado, ora omissos e ora negligentes, e aos profissionais que desejam verdadeiramente melhorar a qualidade de vida de toda uma população.

Este trabalho também procura contribuir para que a previsão numérica do tempo fornecida pelos órgãos responsáveis pela meteorologia fluminense, como o SIMERJ, seja cada vez mais próxima da realidade dos eventos meteorológicos observados, sejam eles severos ou não.

Com o aumento da capacidade de processamento nos computadores de menor porte e a necessidade de prognósticos de tempo mais rápidos para domínios mais localizados, os modelos atmosféricos regionais, também chamados de modelos de mesoescala ou de área limitada, têm se constituído numa ferramenta indispensável aos centros de previsão de tempo e grupos de pesquisa atmosférica. Os modelos atmosféricos regionais podem fazer o “downscaling” de previsões obtidas por modelos globais e, assim, reproduzir com maior detalhamento espacial os campos atmosféricos nas áreas de interesse. Por exemplo, o Laboratório de Prognósticos em Mesoescala da Universidade Federal do Rio de Janeiro (LPM/UFRJ) faz previsões utilizando

dois modelos regionais (MM5 e WRF) com espaçamento de grade de 20 km para o Estado do Rio de Janeiro (<http://www.lpm.meteoro.ufrj.br/>).

Apesar dos contínuos avanços na área de modelagem atmosférica, a comunidade meteorológica em geral concorda sobre as dificuldades envolvidas na previsão quantitativa de precipitação tanto por modelos globais quanto por modelos atmosféricos regionais.

Os fenômenos atmosféricos afetam de uma forma direta, diversos aspectos da vida humana no mundo todo. As tempestades e precipitações, quando muito intensas, causam impactos econômicos de grande relevância, podendo causar prejuízos irreparáveis quando têm como consequência vítimas fatais. Quando ocorrem tempestades e chuvas intensas durante um grande período, existe o risco de deslizamentos, pois o solo já se encontra encharcado, o que reduz sua aderência e estabilidade.

No início do verão de 2009/2010, ocorreu um evento de chuva intensa na Região da Costa Verde, na Enseada do Bananal, na Ilha Grande situada na Baía da Ilha Grande. A figura 1.2 mostra a posição desta localidade e, pela figura 1.3, pode-se notar uma grande cicatriz, consequência de um terrível deslizamento ocorrido na noite do dia 31 de dezembro de 2009. A figura 1.4 mostra como ficou a praia da Enseada do Bananal na passagem do ano de 2009 para 2010, a localização da Pousada Sankay onde ocorreu o deslizamento que teve grande repercussão na mídia devido a uma vítima fatal.

Embora a mídia tenha enfatizado este acontecimento de forma localizada, toda a região de Angra dos Reis e arredores foram afetados, com bairros inteiramente alagados e a população mais carente perdendo seus pertences. As questões que permanecem são: o que poderia ter sido feito para minimizar tais efeitos? Porque os modelos numéricos de previsão do tempo não previram com a antecedência necessária? Ocorreu alguma falha no sistema de alerta que teria deixado a população vulnerável?

Estas foram as questões que surgiram como motivação da escolha do estudo deste caso, aqui denominado caso Angra dos Reis, e que teve como objetivo maior a tentativa de verificar se o Modelo Numérico WRF, escolhido pelo SIMERJ para suas previsões operacionais, teria sido satisfatório para a

previsão de tais eventos e se observar a habilidade do modelo WRF em simular de forma fisicamente adequada estes casos de chuvas intensas.



Figura1.2: Rio de Janeiro. Baía de Ilha Grande. Ilha Grande.

Fonte: sitio <http://maps.google.com.br>



Figura 1.3: Enseada do Bananal. Região do deslizamento ocorrido em Ilha Grande, no dia 31 de dezembro de 2009.

Fonte: Google-Earth: Earth Gallery



Figura 1.4: Praia da Enseada do Bananal, onde ocorreu um dos deslizamentos no dia 31 de dezembro de 2009, no Caso Angra dos Reis.

Fonte: Google-Earth: Earth Gallery.

O Caso Morro do Bumba, como o caso Angra dos Reis, teve como motivação as mesmas questões, isto é, de que modo a modelagem numérica pode ser uma ferramenta mais útil na prevenção de desastres decorrentes de intempéries intensas. Este segundo episódio estudado refere-se a chuvas intensas que se abateram principalmente sobre as cidades do Rio de Janeiro, Niterói e São Gonçalo no início de abril de 2010. Estas fortes chuvas que caíram sobre a cidade do Rio de Janeiro foram provocando alagamentos em diversos pontos da cidade desde a noite do dia 05 de abril 2010. A imprensa, naquele período, informou que o trânsito esteve totalmente congestionado nas principais vias do Centro da Cidade do Rio de Janeiro, no bairro da Tijuca, a situação foi crítica, e o Rio Maracanã transbordou. As rajadas de vento chegaram a 75 km/h às 17 horas no forte de Copacabana (estação meteorológica do INMET). Foi registrada também na região do Aeroporto Santos Dumont rajadas de 50 km/h às 19 horas. Segundo a GEORIO, o

volume de chuva acumulado entre 17 horas e 30 minutos e 18 horas e 30 minutos chegou a 40 mm no Sumaré e a 37 mm no bairro do Méier, entre outros.

O temporal deixou um saldo de 180 mortes, a maioria soterrada por deslizamentos de terra. Do total de vítimas, mais de 100 pessoas feridas, segundo o Centro de Operações do Corpo de Bombeiros. O município de Niterói foi um dos mais afetados e contabilizou 48 mortos. Este temporal foi, segundo o Prefeito Eduardo Paes, o maior desde 1966. Naquele ano o índice pluviométrico atingiu 245 mm, enquanto que nas chuvas de abril de 2010 o nível chegou a 288 mm (Fonte: oglobo.globo.com).

Na figura 1.5 observa-se a região de Niterói mais afetada pelas chuvas intensas do mês de abril de 2010 e na figura 1.6 a área onde ocorreu o deslizamento, o aterro sanitário conhecido como Morro do Bumba, no dia 6 de abril de 2010.

Assim, após todas as informações encontradas na mídia, ficou evidente mais uma vez a necessidade de se realizarem previsões meteorológicas com antecedência suficiente e maior realismo, buscando através da modelagem numérica, no caso o modelo WRF, uma melhor solução.



Figura 1.5: Morro do Bumba, aterro sanitário onde ocorreu o deslizamento em Niterói.

Fonte: Sítio G1 da TV Globo (<http://g1.globo.com>).



Figura 1.6: Deslizamento ocorrido no Morro do Bumba (aterro sanitário) em Niterói, no dia 6 de abril de 2010.

Fonte: Sítio G1 da TV Globo (<http://g1.globo.com>).

O Caso Região Serrana dentre os três casos estudados neste trabalho foi o que mais abalou, em todos os sentidos, não só todo o Estado do Rio de Janeiro, mas também a Região Sudeste, o Brasil e o mundo. Segundo texto denominado Síntese Mensal, encontrado no sítio do CPTEC/INPE, a situação mais crítica associada à ZCAS ocorreu no Estado do Rio de Janeiro, principalmente na região serrana, que no dia 12 de janeiro de 2011, sofreu a maior tragédia natural já observada no país. Choveu forte durante várias horas seguidas, acumulando mais de 180 mm em Nova Friburgo (INMET). O grande volume de chuva, a saturação do solo e a vulnerabilidade da região provocaram transbordamento de rios e córregos e deslizamentos de encostas, causando a morte de mais de 800 pessoas. As áreas mais atingidas foram as regiões de Nova Friburgo, Teresópolis e Petrópolis. Como pode ser notado na figura 1.7, a área em torno da cidade de Nova Friburgo está com várias

cicatrices, que são as marcas deixadas pelas chuvas intensas e catastróficas e pelos deslizamentos ocorridos na primeira quinzena de janeiro de 2011. Na figura 1.8 observa-se uma parte da região antes e depois da catástrofe.

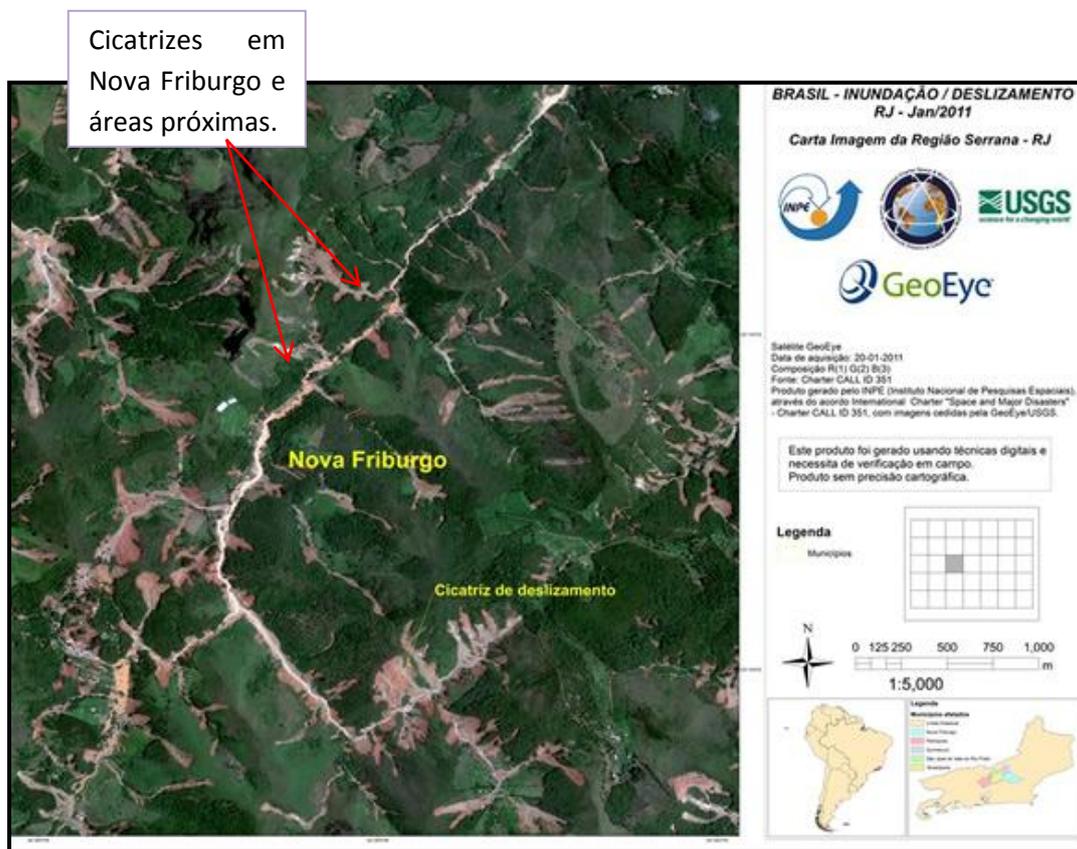


Figura 1.7: Mapa Região Serrana.

Fonte: <http://www.google.com.br>



Figura 1.8: Região Serrana antes da catástrofe e depois da catástrofe.

Fonte: <http://www.google.com.br>

No relatório do Departamento de Recursos Minerais, DRM-RJ, este episódio também foi considerado como “o megadesastre” da Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, como pode ser observado na figura 1.9, que mostra o mapa da distribuição geral das cicatrizes como um legado deixado por este episódio. Esta calamitosa situação não foi gerada somente pela geologia, geomorfologia, hidrogeologia, conforme estudo feito, mas também, pela erosão fluvial e pelas chuvas intensas ocorridas anteriormente, chuvas estas de grande intensidade em intervalos de 15 minutos e de uma hora. Na estação de Nova Friburgo do INEA, no dia 11 de janeiro de 2011, a precipitação acumulada superou 40 mm em 6 horas.

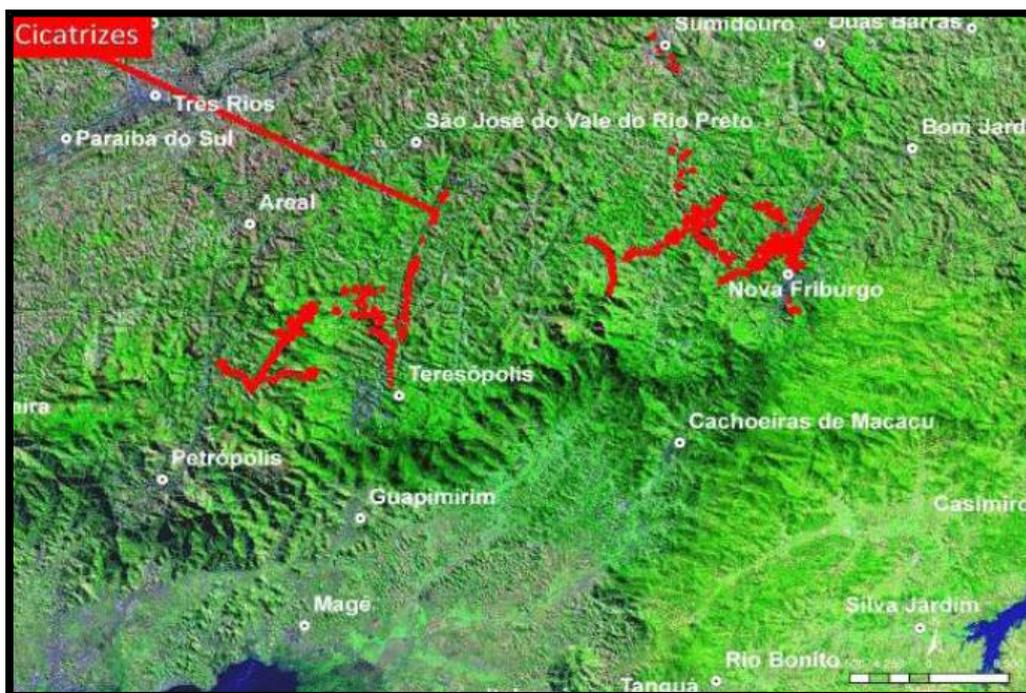
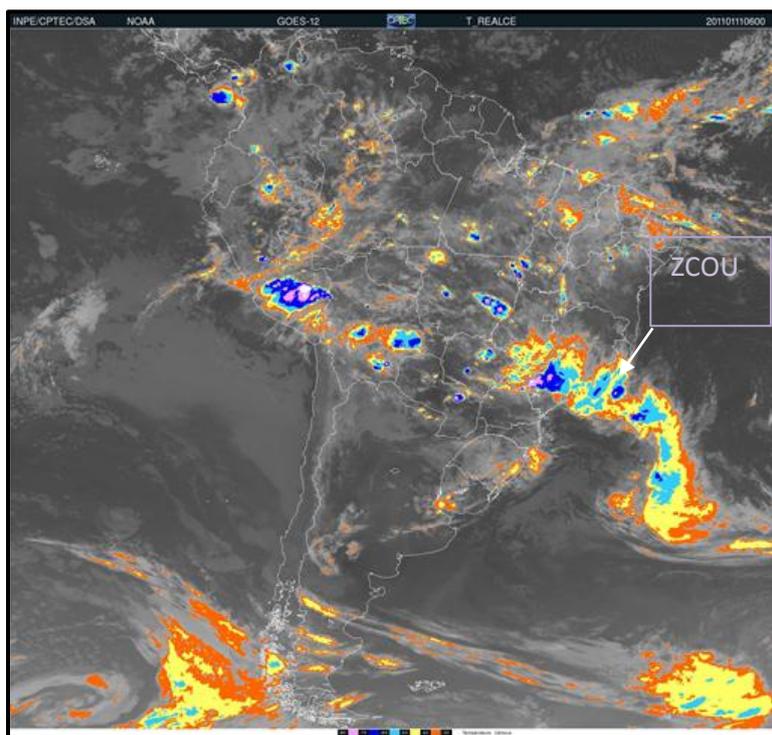


Figura 1.9: Mapa da destruição geral das cicatrizes do desastre de janeiro de 2011.

Fonte: Sítio DRM –RJ

Segundo explicação dos meteorologistas Henri Pinheiro, Naiane Araújo e Gustavo Escobar, em relatório disponível no sítio do CPTEC/INPE, no período em questão houve a formação de um episódio de ZCOU, Zona de Convergência de Umidade, e dias depois, este sistema foi se reforçando e adquiriu características da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), provocando ainda mais instabilidade e maior volume acumulado de chuva (figuras 1.10a e 1.10b).

(a)



(b)

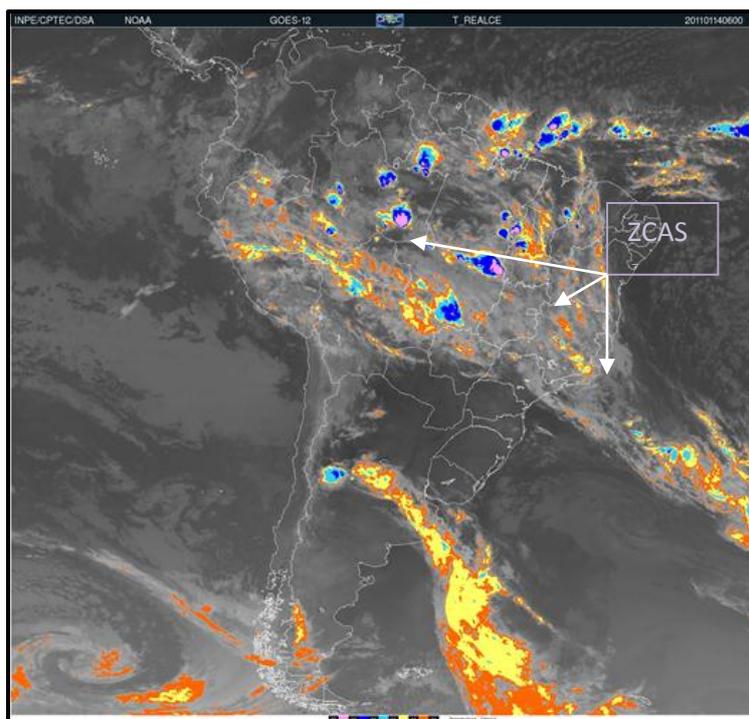


Figura 1.10: Imagens infravermelhas do GOES-12 – (a) 11 de janeiro de 2011 às 06:00 UTC mostra a ZCOU e (b) 14 de janeiro de 2011 às 06:00 UTC mostra a ZCAS.

Fonte: INPE/CPTEC/DAS NOAA.

Na figura 1.11 pode ser observada uma pequena amostra dos imensos transtornos sofridos pela população de Teresópolis após estas chuvas episódicas.



Figura 1.11: Enxurrada ocorrida em Teresópolis no período iniciado no dia 12 de janeiro de 2011.

Fonte: <http://ultimosegundo.ig.com.br>

De posse de todas estas importantes informações da comunidade científica, e adicionado a isso, tudo que foi possível acompanhar pela mídia daquela megatragédia e de todo aquele megadesespero passado pela população, não se pode ter outra alternativa a não ser tentar encontrar um caminho para que se realizem previsões meteorológicas com antecedência suficiente e com maior realismo. Neste estudo a opção escolhida foi a modelagem numérica e o modelo utilizado, o WRF.

Neste estudo foi empregada a modelagem numérica, utilizando-se o modelo de previsão atmosférica de alta resolução WRF (Weather Research Forecasting), procurando-se observar a habilidade do modelo em simular de

forma fisicamente adequada três casos de chuvas intensas ocorridos nestes últimos três anos no Estado do Rio de Janeiro. Portanto, para uma área limitada, o modelo WRF precisa das condições de fronteira laterais que representem o estado real da atmosfera nas vizinhanças ao longo do tempo de integração das equações dinâmicas. Estas condições são fornecidas por um modelo de previsão numérica do tempo em escala global, o GFS (Global Forecast System) e, como se deseja analisar mais detalhadamente as regiões de interesse, Ilha Grande, Niterói e região Serrana, as quais estão inseridas na grade mãe utilizada, foi feito um aninhamento de grades com maior resolução espacial. A vantagem em utilizar grades aninhadas é obter resultados em uma área com uma alta resolução espacial, sem que a grade mãe que recebe os dados de entrada tenha que ser integrada em alta resolução. Assim, foram escolhidas para os estudos de casos desta pesquisa, três grades com espaçamento de 18 km, 6 km e 2 km.

Para o estudo do caso Angra dos Reis, na parte insular de Ilha Grande, a simulação de precipitação acumulada foi realizada para um período de 72 horas, com horizontes de 72 horas (modelo integrado no período de três dias), e com horizonte de 144 horas (modelo começou a ser rodado três dias antes do período de chuva), e estes testes foram comparados com os dados observados de estações meteorológicas da rede pluviométrica do CBMERJ, com as cartas sinóticas de superfície da Marinha do Brasil e imagem de satélite do INPE/CPTEC. No estudo deste caso foi usada a parametrização de microfísica denominada “*WSM 3-class simple ice scheme*”.

Para o estudo do Caso Morro do Bumba, no Município de Niterói, foram feitas algumas simulações, como por exemplo, de temperatura, umidade específica e precipitação entre outras. A simulação de precipitação acumulada para o período de 72 horas foi comparada com os dados observados de estações do INMET e da Fundação GEORIO, e com a estação Climatológica do Laboratório de Geociências da FFP/UERJ, situada em São Gonçalo.

Finalmente, para o estudo do Caso da Região Serrana, os dados simulados de precipitação acumulada pelo modelo foram calculados para um período de 72 horas com horizontes de 72, 96, 120 e 144 horas. Estas simulações foram comparadas com dados observados da estação de Nova

Friburgo do Instituto Estadual do Ambiente (INEA), em forma de gráfico disponíveis no sítio do INEA. Além destas simulações também foram feitas outras, como por exemplo, teste comparativo do uso do esquema de parametrização de microfísica de Goddard com o *WSM 3-class simple ice scheme*.

Os eventos estudados neste trabalho foram denominados de Caso Angra dos Reis, Morro do Bumba e Região Serrana e os dados reais que auxiliaram nas análises foram oriundos de estações meteorológicas, dados de satélite, cartas sinóticas de superfície da Marinha do Brasil. Sendo importante enfatizar que este trabalho objetivou observar a habilidade do modelo em simular de forma fisicamente adequada os três casos de chuvas intensas escolhidos.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A meteorologia é a ciência que estuda a atmosfera terrestre e tem como foco o estudo dos processos atmosféricos e a previsão do tempo. Os estudos no campo da meteorologia foram iniciados há mais de dois milênios (os povos antigos prediziam o tempo baseados na observação dos astros), mas apenas a partir do século XVII a meteorologia avançou significativamente. No século XVIII, ela progrediu ainda mais com o desenvolvimento de redes de intercâmbio de dados em vários países. Com a maior eficiência na observação da atmosfera e uma troca mais rápida de dados meteorológicos, as primeiras previsões numéricas do tempo tornaram-se possíveis no século XX com o advento dos modelos meteorológicos. Entretanto, o caminho que teve que ser percorrido até os dias atuais não foi fácil.

A base da previsão numérica do tempo, a “Numerical Weather Prediction”, foi formalizada pelo meteorologista norueguês Vilhelm Bjerkness. Ele propôs, em 1903, que a previsão do tempo poderia ser baseada nas leis físicas, sendo descrita por sete variáveis primárias: pressão, temperatura, densidade do ar, umidade e três componentes da velocidade do ar. Para ele, a previsão do tempo poderia, essencialmente, ser vista como um problema matemático de valor inicial, ou seja, conhecendo-se as condições iniciais da atmosfera para um único instante de tempo seria possível resolver as equações para um instante de tempo posterior. Bjerkness não acreditava que estas equações pudessem ser resolvidas analiticamente devido a sua complexidade (NEBEKER, 1995).

Lewis Fry Richardson, meteorologista britânico, publicou em 1922, o primeiro importante livro chamado *Weather Prediction by Numerical Process* (Previsão do Tempo por Métodos Numéricos) no qual ele descrevia a integração numérica das equações das variáveis atmosféricas médias de forma a obter uma previsão do tempo em 24 horas adiante. Richardson mostrou como os termos de menor magnitude relativa das equações do movimento do ar podiam ser negligenciados em primeira aproximação. Devido ao fato de que o campo inicial utilizado por Richardson não ser exatamente o que chamamos de um campo suficientemente filtrado (ou alisado), isto é, dele ter utilizado um

campo onde as diferentes variáveis não se apresentam consistentes uma com a outra, do ponto de vista físico, seus resultados pioneiros não foram muito encorajadores. Mas foi Jule Charney que fez a primeira previsão numérica do tempo em um computador ENIAC usando um modelo numérico de uma dimensão. (Jacobson, 1999).

A percepção de John Von Neumann de que a Meteorologia seria uma das áreas que mais se beneficiaria com o advento da técnica de computação digital rápida e programável se confirma hoje em dia, quando a sociedade se beneficia de previsões de tempo bastante acuradas para horizontes de 72 horas e em nível mundial (Moura, 1995).

L. F. Richardson, nos idos de 1922, formulou a seguinte pergunta: dado um determinado estado (instantâneo) da atmosfera como ponto inicial, qual será seu estado final passado um determinado intervalo de tempo? Os modelos de previsão numérica do tempo de alta resolução aproximam-se cada vez mais da resposta desta pergunta. A capacidade de fazer uma previsão hábil requer que o modelo seja uma representação realista da atmosfera, e que as condições iniciais sejam conhecidas com precisão. (Kalnay, 2003).

Na modelagem atmosférica, a previsão quantitativa de precipitação é de grande complexidade, pois os processos de precipitação podem ocorrer em várias escalas, desde grandes massas de ar até eventos convectivos extremamente localizados (Ganguly & Bras, 2003).

A precipitação é influenciada simultaneamente pelo movimento de grandes massas de ar e por vórtices (eddies) em microescala, propriedades dos aerossóis e processos microfísicos como o crescimento e evaporação de gotas. Esses fatores tornam a precipitação extremamente variável no tempo e no espaço. (Conselman, 2006).

O NCEP (antigo Centro Meteorológico Nacional ou NMC) realizou previsões meteorológicas operacionais em computador desde 1950. De 1955 a 1973, as previsões incluíam apenas o Hemisfério Norte, tendo se tornado globais desde 1973. Ao longo dos anos, a qualidade dos modelos e métodos de assimilação de observações atmosféricas tem melhorado continuamente, resultando em melhorias evidentes na previsão. (Kalnay, 2003).

Segundo Kalnay (2003) a melhoria na habilidade de previsão numérica de tempo ao longo dos últimos 40 anos se deve a quatro fatores:

- 1) o aumento da potência dos supercomputadores, o que permite melhor resolução e aproximações numéricas muito menores nos modelos operacionais atmosféricos;
- 2) a melhor representação dos processos físicos (nuvens, precipitação, radiação e transferências turbulentas de calor, de umidade e de momento) nos modelos;
- 3) o uso de métodos mais precisos de assimilação de dados, que resultam em melhoria das condições iniciais para os modelos e
- 4) o aumento da disponibilidade de dados, especialmente dados de satélite e aviões ao longo dos oceanos e do hemisfério sul.

Com o desenvolvimento de computadores mais rápidos e processamento paralelo, os modelos numéricos de previsão do tempo ficaram mais elaborados, podendo realizar simulações atmosféricas em diversas escalas espaciais. Essas escalas são classificadas como global ou sinótica quando visam identificar o comportamento geral da atmosfera em áreas extensas. Quando são capazes de identificar fenômenos meteorológicos mais detalhadamente, sobre regiões mais específicas, são classificadas como regionais ou mesoescala. Um sistema de classificação dos fenômenos atmosféricos bastante utilizados é o sistema racional proposto por Orlanski, apresentado no quadro 2.1. (Orlanski, 1975).

Quadro 2.1. Classificação Racional de Orlanski.

Escala espacial	Classificação	Observação
10000 km – 2000 km	macro- $\beta$	
10000 km – 2000 km	macro- $\beta$	
2000 km – 200 km	meso- $\alpha$	Inclui os complexos convectivos de mesoescala e os vórtices de ar frio do tipo <i>virgula</i> .
200 km – 2 km	meso- $\beta$	Inclui linhas de instabilidade e circulações térmicas topograficamente induzidas.
2 km – 200m	meso- $\gamma$	Inclui as nuvens cumulus nimbus individuais.
2000 km – 200 km	micro- $\alpha$	
200 m – 20 m	micro- $\beta$	
20 m – 0 m	micro- $\gamma$	

Na década de 1980, a aplicação dos modelos de mesoescala, principalmente por meio de estudos de casos e testes de sensibilidade, permitiu a obtenção de informações físicas sobre diversos sistemas de mesoescala como tempestades severas (Anthes et al., 1982), ciclones tropicais (Chang, 1982), sistemas convectivos de mesoescala (Zhang & Fritsch, 1982), ciclones extratropicais (Kuo & Reed, 1988), e eventos de precipitação intensa (Lee & Hong, 1989). Podem-se definir os sistemas convectivos de mesoescala como sistemas que se desenvolvem, evoluem e produzem chuvas significativas (Zhang & Fritsch, 1982).

Chuvas intensas provenientes de sistemas tanto de escala sinótica como na escala local ou mesoescala, tem o poder de provocar transtornos incalculáveis tanto do ponto de vista material/ econômico como do ponto de vista social, podendo provocar inclusive perda de vidas humanas. Diversos casos de chuvas intensas e sistemas de caráter severo ocorridos na Região Sudeste já foram estudados tanto do ponto de vista observacional como das simulações numéricas (Menezes et al., 1994).

Para o Estado do Rio de Janeiro, já foram feitos vários trabalhos como o Silva Paiva (2000), Silva Paiva e Menezes (2000), Xavier (2002), Oliveira (2003), entre outros. Portanto, um melhor conhecimento dos aspectos dinâmicos e termodinâmicos, entre outros, pode auxiliar na melhoria da previsão na tentativa de se evitar, se possível, as consequências decorrentes destes eventos extremos (Menezes et al., 1994).

No período da primeira terça parte do mês de janeiro de 2011, segundo os meteorologistas Henri Pinheiro, Naiane Araújo e Gustavo Escobar, foi observado a presença de dois importantes sistemas, a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e a Zona de Convergência de Umidade (ZCOU), atuando no Estado do Rio de Janeiro.

A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é definida como uma persistente banda de nebulosidade e precipitação com orientação norte-sudeste, que se estende desde o sul e leste da Amazônia até o sudoeste do Oceano Atlântico Sul (Kodama 1992, 1993; Satyamurti et al., 1998; Liebmann

et al, 2001; Carvalho et al., 2002 a 2004). A ZCAS é o principal sistema de grande escala responsável pelo regime de chuvas sobre as Regiões Sul e Sudeste do Brasil durante os meses de primavera e verão. Em suas características gerais a ZCAS possui forte indício de confluência entre o ar da Alta Subtropical do Atlântico Sul e o ar oriundo de latitudes mais altas. Ocorre convergência de umidade na baixa troposfera e tem presença de um cavado a leste da Cordilheira dos Andes, orientado na direção noroeste-sudeste em 850 hPa e, além disso, há o transporte de umidade em baixos níveis, manutenção da convecção pela convergência de umidade na baixa e na média troposfera e alto contraste de umidade (Kodama, 1992).

Estudando as características da ZCAS, Ferreira et al. (2004) indicam a presença de um cavado semi-permanente a leste da cordilheira dos Andes orientado na direção noroeste-sudeste em 500 hPa e associado a movimentos ascendentes que incentivam a divergência em níveis superiores. Observam também a permanência de uma banda de nebulosidade por no mínimo 4 dias, estendendo-se do sul e leste da Amazônia até o sudoeste do Oceano Atlântico Sul.

A Zona de Convergência de Umidade (ZCOU) se assemelha à ZCAS em vários parâmetros, como o fato de ambas serem zonas de convergência de umidade marcadas por nebulosidade e precipitação intensas, porém há diferenças no padrão de escoamento clássico, principalmente em médios e baixos níveis, que desfavorecem a persistência e organização da banda de nebulosidade/precipitação, caracterizando assim uma ZCOU ao invés de ZCAS (Pallotta & Nakazato).

Segundo o Grupo de Previsão de Tempo do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (GPT-CPTEC), em termos puramente ligados ao tempo de persistência, uma ZCOU pode ser caracterizada em situações onde os padrões são similares aos de ZCAS, porém a duração do sistema é de apenas 3 dias. Há ressalva de que caso o padrão persista por um quarto dia, o sistema passa a ser considerado ZCAS. Ainda no âmbito da duração, uma ZCOU pode ser atribuída à uma situação previamente estabelecida de ZCAS em situação de dissipação, onde ainda é possível ser identificada uma banda de nebulosidade organizada.

Saindo do âmbito temporal, pois há ocorrência de ZCOU com mais do que 3 dias de duração, a análise de escoamento e convergência nos diferentes níveis da atmosfera apresenta características expressivas. Em níveis médios observa-se o deslocamento de cavados entre o norte e nordeste da Argentina, o Paraguai, o Mato Grosso do Sul e a região sul do Brasil. O fato desses cavados se movimentarem consideravelmente quebra o padrão de persistência de nebulosidade e precipitação para a situação de ZCAS, desfavorecendo os escoamentos típicos dos níveis abaixo (Pallotta & Nakazato).

Em baixos níveis, por consequência do movimento da troposfera média, verifica-se uma desconfiguração do JBN, que não apresenta orientação preferencial NO-SE, podendo apresentar bifurcação para Sul ou mesmo não se estabelecer adequadamente. Como a convergência de umidade acompanha o escoamento do JBN, no caso de ZCOU ela fica desfavorecida, podendo até se encontrar direcionada para o Sul do Brasil, ou da Argentina, não gerando nebulosidade (Pallotta & Nakazato).

Vale ressaltar que para uma situação estabelecida de ZCOU, já que a persistência é quebrada, os campos de convergência em baixos níveis aparecem relativamente defasados quando comparados com os campos de Omega negativo em 500h Pa, que mesmo assim apresentam uma área relativamente bem organizada de ascensão de ar. Neste caso a banda de nebulosidade associada não se apresenta bem organizada. (Pallotta & Nakazato).

No episódio do megadesastre da Região Serrana, não foram somente os dois sistemas (ZCAS e ZCOU) que contribuíram para aquele mega desfecho, os deslizamentos ocorridos também tiveram sua parcela de contribuição, uma vez que existe uma relação entre a precipitação e os deslizamentos. E esta relação há muito se apresenta como tema de estudos em diversas regiões do mundo. Como exemplo, pode-se citar alguns trabalhos, como o de Brand et al. (1985), que estuda solos e a influência das chuvas para região de Hong Kong; Brugger & Lacerda (1997), que apresenta estudos de monitoramento de encostas e sua movimentação através da precipitação pluviométrica; Govi & Sorzana (1980), que estudam a suscetibilidade de ocorrência de deslizamentos devido a chuvas críticas no noroeste da Itália;

Guidicini Iwasa (1976) que, desenvolvendo estudos em nove regiões do Brasil, apresentam resultados para a previsibilidade de ocorrência de deslizamentos com a implantação das cartas de periculosidade.

Para o desenvolvimento de metodologias correlacionando deslizamentos com precipitação em uma determinada região, estudos mostram que se faz necessário o conhecimento do modelo fenomenológico.

Cerri et al. (1992) e Macedo (1992), para uma melhor análise do risco, propõem primeiramente a identificação por zona, precedida do levantamento de cada risco, individualmente, possibilitando uma análise coletiva do risco. CERRI (1992) propõe que a ficha de levantamento de campo, para ser completa, englobe informações sobre o perfil geológico e suas características; antigas feições erosivas, cicatrizes de deslizamento; existência de matacões, blocos de rocha, e/ou paredões rochosos; seus condicionantes; estruturais; ocorrência de taludes naturais, taludes de corte, aterro compactado; relação da declividade-estabilidade da encosta/talude; existência de trincas no solo e ou construções; existência de degraus de abatimento; inclinação de árvores, muros, postes e/ou qualquer outro elemento que possa sugerir uma movimentação do terreno; ocorrência de aterros, tipo de material usado e aspecto da compactação (aparência visual); acúmulo de lixo e estimativa de volume; águas servidas lançadas em superfície; presença de fossas e sumidouros; sistemas de abastecimento de águas e esgoto; sistemas de drenagens; vegetação local; tipos de cultivos que favorecem a instabilidade e construções próximas à base e ao topo de taludes e encostas.

Analisando o avanço das frentes de saturação para os solos de Hong Kong, Lumb (1975) concluiu que a infiltração das águas de chuvas, independente da intensidade, provoca um aumento no grau de saturação do maciço. Este estudo baseia-se na associação de precipitação acumulada relativa média anual, aos dias imediatamente antecedentes e ao dia que ocorreu o deslizamento, onde é proposto, após várias combinações, a parametrização de quatro tipos de previsibilidade de deslizamentos, baseados na precipitação pluviométrica nas 24 horas do dia do deslizamento e a precipitação acumulada nos 15 dias antecedentes ao mesmo, donde obtendo-

se a seguinte classificação: deslizamentos isolados, menores ou secundários, severos e desastrosos.

Para Lumb (1975) as análises de riscos de deslizamentos se baseiam na:

- precipitação pluviométrica nas 24 horas que antecedem o deslizamento (>100mm);
- precipitação pluviométrica nos últimos 15 dias antecedentes ao deslizamento (>200mm);
- definição de categorias de risco em função do número de deslizamentos e chuvas acumuladas de 15 dias; e,
- manutenção das condições de estabilidade do maciço.

Já Brand et al. (1984) e BRAND (1989) fazem associação das precipitações pluviométricas ocorridas em 1 hora e 24 horas, com o número de deslizamentos t, pela qual propõe a seguinte classificação:

- maior: ocorrência acima de 10 deslizamentos por dia;
- menor: ocorrência de menos de 10 deslizamentos por dia.

Conforme encontra-se na tese de mestrado de Elenir Pereira Soares, em junho de 2006, o Município do Rio de Janeiro através da Fundação GEORIO, desde 1997, por ocasião da necessidade da implantação de um Sistema de Alerta de chuvas, desenvolveu um estudo relacionando chuvas e deslizamentos para possibilitar uma previsão de acidentes geológicos devido à precipitação na região (D'ORSI et al.,1997). O método desenvolvido pela GEORIO está baseado no critério de TATIZANA et al. (1987a, b) e GEO (1996). Neste estudo são correlacionadas precipitações diárias e horárias (do dia do evento), que juntamente com a classificação dos eventos de precipitação em categorias relacionadas ao número de movimento de massa (Quadro 2.2), possibilitam a construção de um gráfico de envoltória, onde é demonstrada a suscetibilidade de deslizamentos, classificados em categorias de precipitação, onde o valor de precipitação crítica horária é de 50 mm/h (Figura 2.1), enquanto o valor diário de precipitação crítica é estipulado em 175 mm/24h (Figura 2.2). Este método adota 4 categorias de precipitação, as quais são vinculados ao número de registros de movimentos de massa

(deslizamentos) (Figura 2.3) e , diferentemente de TATIZANA et al. (1987a, b), são utilizados acumulados de 96 horas incluindo o evento.

Quadro 2.2 Classificação dos Deslizamentos segundo TATIZANA et al. (1987a, b).

Envoltória de Deslizamentos	Relação Numérica
Deslizamentos induzidos	$I(Ac) = 2.603 \times Ac^{-0,933}$
Deslizamentos escassos	$I(Ac) = 3.579 \times Ac^{-0,933}$
Deslizamentos generalizados	$I(Ac) = 5.466 \times Ac^{-0,933}$
Corrida de lama	$I(Ac) = 10.646 \times Ac^{-0,933}$

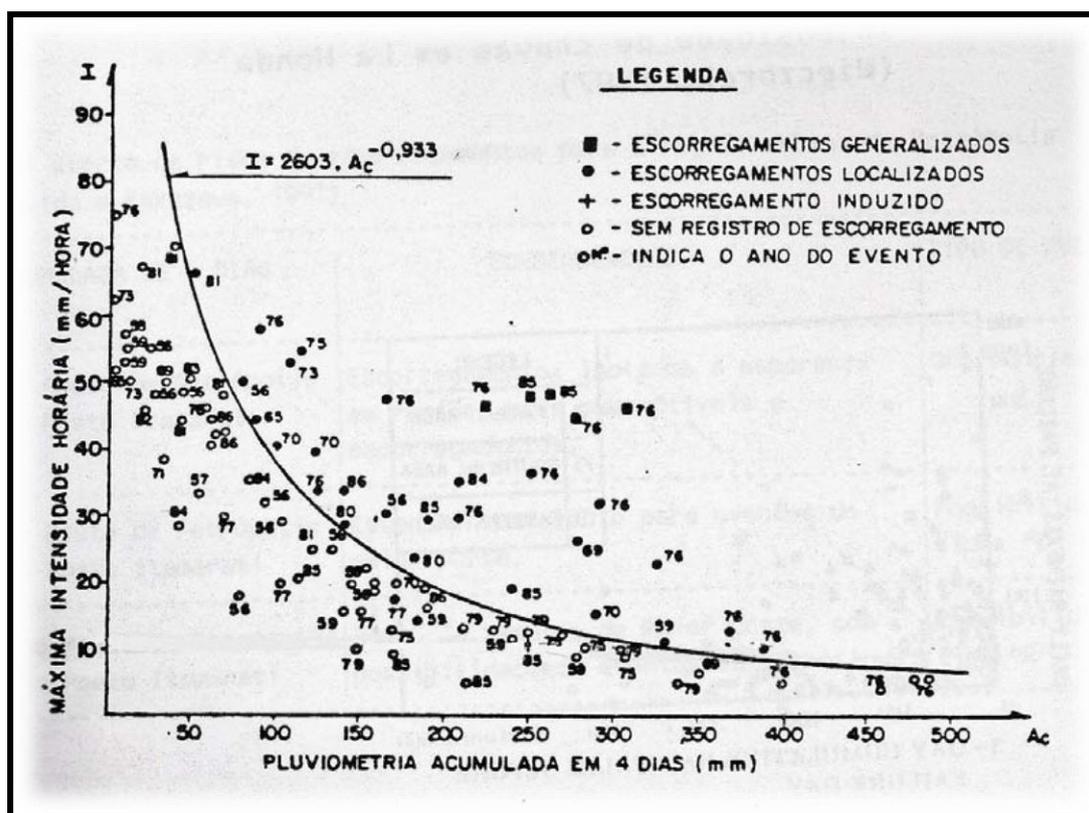


Figura 2.1 - Envoltória de deslizamentos (TATIZANA et al., 1987a, b)

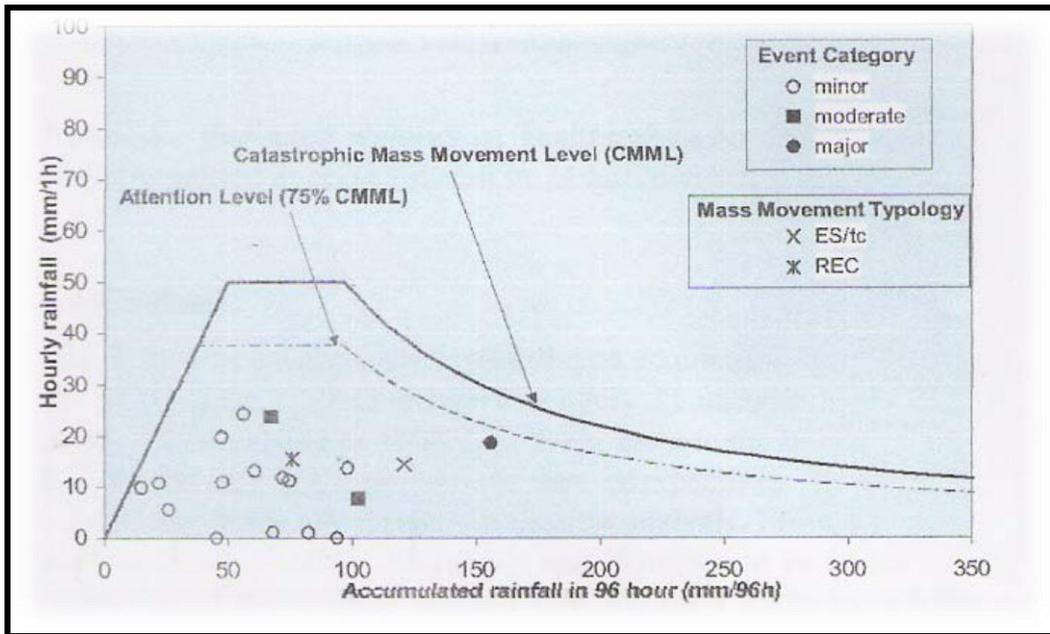


Figura 2.2 - Envolvória de deslizamentos : acumulado de chuvas em uma hora x acumulado em 96 horas incluindo o evento (D'ORSI et al., 1997).

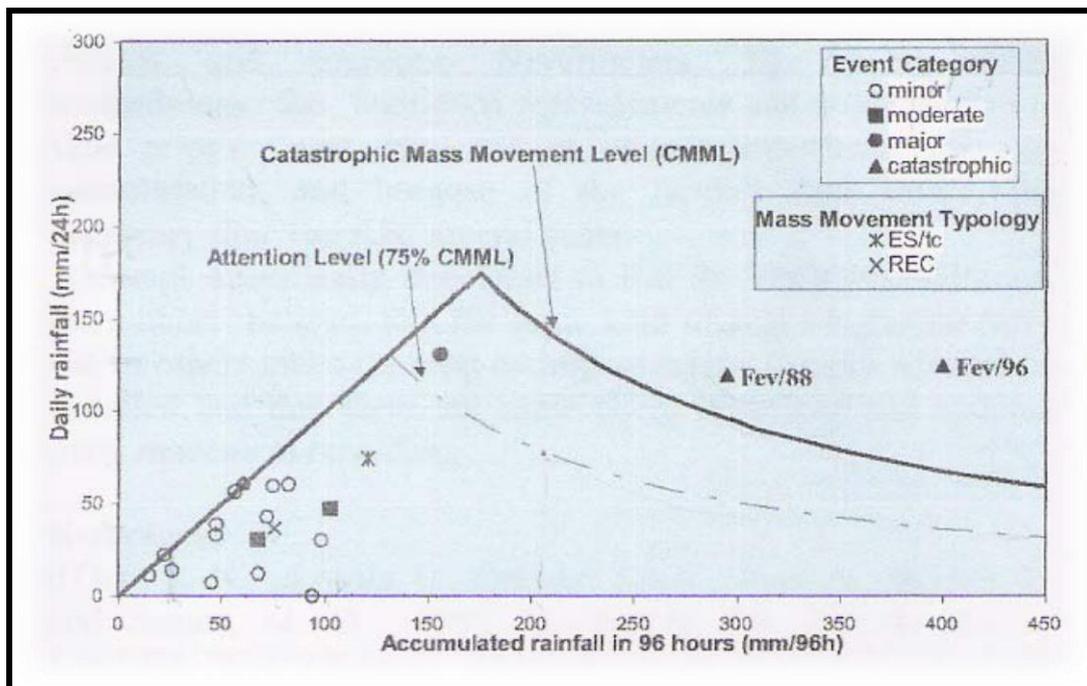


Figura 2.3 - Envolvória de deslizamentos: acumulado de chuvas em 24 horas x acumulado em 96 horas incluindo o evento (D'ORSI et al., 1997).

Em 2004, SOUZA desenvolveu uma metodologia de Mineração de Dados, utilizando Sistemas Geográficos de Informação (SIG) para estudar a ocorrência

dos deslizamentos ocasionados por precipitação de chuva intensa no Município do Rio de Janeiro. Para o modelo de predição de deslizamentos foram usadas as técnicas de classificação com regras de associação (LIU et al., 1998 e 2002).

### 3. METODOLOGIA E DADOS

O presente estudo usou a modelagem numérica de mesoescala, especificamente o modelo WRF, para simular e aprimorar a previsão do tempo realizada por este modelo, sugerindo, inclusive, uma parametrização da microfísica mais adequada para as regiões tropicais que possibilite um melhor desempenho do modelo nos centros operacionais de previsão do tempo.

A seleção dos casos para estudo foi feita a partir de eventos de chuvas intensas ocorridos no Estado do Rio de Janeiro nos períodos de 31 de dezembro de 2009 a 1º de janeiro de 2010, de 4 de abril a 6 abril de 2010 e de 11 a 12 de janeiro de 2011. Os dados foram obtidos a partir das análises e previsões do NCEP e foram usados com dados de entrada e condições de contorno pelo modelo WRF.

No primeiro caso estudado, referente à Angra dos Reis, os resultados da precipitação gerados pelo modelo puderam ser comparados com os dados observados na rede pluviométrica do CBMERJ (Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro), sendo a chuva acumulada em 24 horas, obtida no período das 9 horas local (12:00Z) do dia anterior às 9 horas local (12:00Z) do dia referido, que foi 31 de dezembro de 2009. Foram consultadas as cartas sinóticas disponíveis no sítio da Marinha do Brasil e imagens de satélite que se encontram no banco de imagens do sítio do INPE/CPTEC. Os dados da estação convencional, apresentados em forma de gráfico, foram obtidos no site do INMET.

No segundo caso estudado, referente ao Morro do Bumba, foi possível se comparar os resultados da precipitação gerados pelo modelo WRF com os dados da estação Climatológica do Laboratório de Geociências da FFP/UERJ, situada em São Gonçalo, e estações da Fundação Geo-Rio, localizadas em bairros da cidade do Rio de Janeiro (Ilha do Governador, Penha e Saúde). As três estações situadas no município do Rio de Janeiro foram escolhidas devido à proximidade geográfica com São Gonçalo. Os dados de precipitação coletados, que se encontravam promediados a cada 15 minutos, foram reagrupados para intervalos temporais horários e diários. Observou-se que as chuvas intensas começaram no dia 05 de Abril, com totais diários que

chegaram a 123 mm (Ilha do Governador), e no dia 06 de Abril, os totais chegaram a 178 mm (Rio de Janeiro – Praça XV). Em relação à intensidade, no dia 05 houve, no horário de 18h02min, a precipitação de 43,6mm, classificado como chuva forte segundo critérios na literatura. Nas horas subsequentes, a precipitação continuou intensa, o que nos auxilia a explicar os impactos ocorridos em São Gonçalo, Niterói e Rio de Janeiro (Armond et al, 2010).

Além destes dados das estações acima citadas, acrescentem-se dados da estação convencional do INMET do Rio de Janeiro, cuja latitude e longitude são muito próximas da cidade de Niterói (latitude -22 53 e longitude – 43 07), onde aconteceu o deslizamento do Morro do Bumba, obtida no sítio do INMET. Foram consultadas as cartas sinóticas disponíveis no sítio da Marinha do Brasil e imagens de satélite que se encontram no banco de imagens do sítio do INPE/CPTEC.

No terceiro caso, referente à Região Serrana, os resultados gerados pelo modelo em relação à variável precipitação acumulada foram comparados com os dados observados na estação Nova Friburgo do INEA (Instituto do Meio Ambiente), disponíveis no sítio do próprio INEA. Além destes dados, também foram consultadas cartas sinóticas de superfície disponíveis no sítio da Marinha do Brasil e imagens de satélite que se encontram no sítio do INPE/CPTEC.

A versão do WRF, que foi utilizada neste trabalho experimental é a 3.1. Caso haja necessidade de uma descrição mais precisa da maior parte dos aspectos comentados, sugere-se consultar o “ARW User’s Guide” e a “NCAR Technical Note: A Description of the Advanced Research WRF Version3”. Este último explica em pormenores os fundamentos físicos e matemáticos da formulação dinâmica do modelo; no que diz respeito às parametrizações físicas, o texto remete para as referências dos trabalhos originais dos seus autores.

Todos os cálculos executados pelo modelo WRF a fim de simular as condições da atmosfera são baseados em um conjunto de equações que controlam o comportamento da atmosfera. Os sistemas de equações diferenciais parciais por elas compostas não podem ser resolvidos analiticamente, a menos que várias aproximações sejam feitas. Mas, estas aproximações quase nulificam a capacidade do modelo de representar a

atmosfera. Então foram desenvolvidas várias técnicas para resolver, por exemplo, a influência da solução das ondas acústicas. Desta maneira, reescrevendo as variáveis em função de  $t^*$ , o sistema que resolve as ondas acústicas fica da seguinte forma:

$$\delta_\tau U'' + \mu^{t*} \alpha^{t*} \partial_x p''^\tau + (\mu^{t*} \partial_x \bar{p}) \alpha''^\tau + \left( \frac{\alpha}{\alpha_d} \right) \left[ \mu^{t*} \partial_x \phi''^\tau + (\partial_x \phi^{t*}) (\partial_\eta p'' - \mu'')^\tau \right] = R_U^{t*} \quad (3.20)$$

$$\delta_\tau V'' + \mu^{t*} \alpha^{t*} \partial_y p''^\tau + (\mu^{t*} \partial_y \bar{p}) \alpha''^\tau + \left( \frac{\alpha}{\alpha_d} \right) \left[ \mu^{t*} \partial_y \phi''^\tau + (\partial_y \phi^{t*}) (\partial_\eta p'' - \mu'')^\tau \right] = R_V^{t*} \quad (3.21)$$

$$\delta_\tau \mu_d'' + m^2 \left[ \partial_x U'' + \partial_y V'' \right]^{\tau+\Delta\tau} + m \partial_\eta \Omega''^{\tau+\Delta\tau} = R_\mu^{t*} \quad (3.22)$$

$$\delta_\tau \Theta'' + m^2 \left[ \partial_x (U'' \theta^{t*}) + \partial_y (V'' \theta^{t*}) \right]^{\tau+\Delta\tau} + m \partial_\eta (\Omega''^{\tau+\Delta\tau} \theta^{t*}) = R_\Theta^{t*} \quad (3.23)$$

$$\delta_\tau W'' - m^{-1} g \left[ \left( \frac{\alpha}{\alpha_d} \right)^{t*} \partial_\eta (C \partial_\eta \phi'') + \partial_\eta \left( \frac{c_s^2}{\alpha^{t*}} \frac{\Theta''}{\Theta^{t*}} \right) \right]^\tau = R_W^{t*} \quad (3.24)$$

$$\delta_\tau \phi'' + \frac{1}{\mu_d^{t*}} \left[ m \Omega''^{\tau+\Delta\tau} \phi_\eta - \overline{g W''^\tau} \right] = R_\phi^{t*} \quad (3.25)$$

O estudo dos casos foi feito a partir da análise dos gráficos gerados pelo modelo de previsão numérica WRF com saída para o Grads, e carta sinótica de superfície obtida no sítio oficial da Marinha do Brasil, no sítio <https://www.mar.mil.br/dhn/chm/meteo/prev/cartas/cartas.htm>.

Os dados convencionais pluviométricos foram obtidos de tabelas de pluviômetro, quantidade acumulada de 24h, do CBMERJ, dados da estação convencional do Rio de Janeiro do sítio do <http://www.inmet.gov.br>, dados do sítio do INEA <http://www.inea.rj.gov.br> e os dados pluviométricos do município de São Gonçalo foram obtidos a partir da Estação Meteorológica da Faculdade de Formação de Professores da UERJ, operada pelo Laboratório de

Geociências (Departamento. de Geografia – FFP/UERJ) e situada no bairro Patronato.

As imagens de satélites meteorológicos disponíveis para os estudos dos três casos foram: imagens do satélite GOES no canal infravermelho, com projeção retangular e setor América do Sul. Foram obtidas no sítio do INPE/CPTEC (<http://satelite.cptec.inpe/home/>).

A previsão quantitativa de precipitação, gerada pelo modelo WRF, envolveu as etapas de obtenção dos dados do modelo global GFS, interpolação dos dados para a grade do WRF (por meio do pacote de pré-processamento WPS), a simulação propriamente dita ocorre no pós-processamento dos resultados.

Para se obter os dados gerados pelo modelo atmosférico global GFS (Global Forecast System) é necessário fazer o download via internet no NCEP (National Centers for Environmental Prediction) em quatro simulações diárias (0h, 6h, 12h, 18h UTC), com resolução espacial de 0,5 grau de latitude e longitude e resolução temporal de 6 horas. As simulações com o modelo WRF foram realizadas com o pacote WPS (WRF Preprocessing System) é formado por um conjunto de programas que transformam dados terrestres (topografia, cobertura vegetal etc.) e dados meteorológicos (gerados pelo modelo GFS) em arquivos de condições de contorno e condições iniciais.

A primeira etapa é a definição da grade para que sejam interpolados os campos que descreverão os domínios. Neste trabalho foram utilizadas três grades conforme descrito nos quadros 3.1 e 3.2, onde a grade 1 com 18 km e a grade 2 com 6 km e a grade 3 com 2 km, estas grades podem ser visualizadas nas figuras 3.1.a , 3.1.b e 3.1.c.

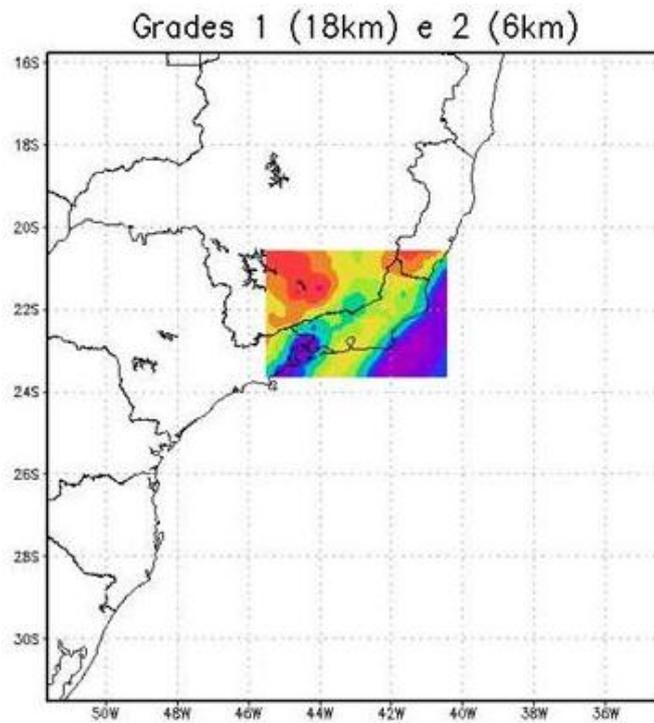


Figura 3.1.a. Grades aninhadas - Grade mãe (1) de 18 km e Grade 2 de 6 km.

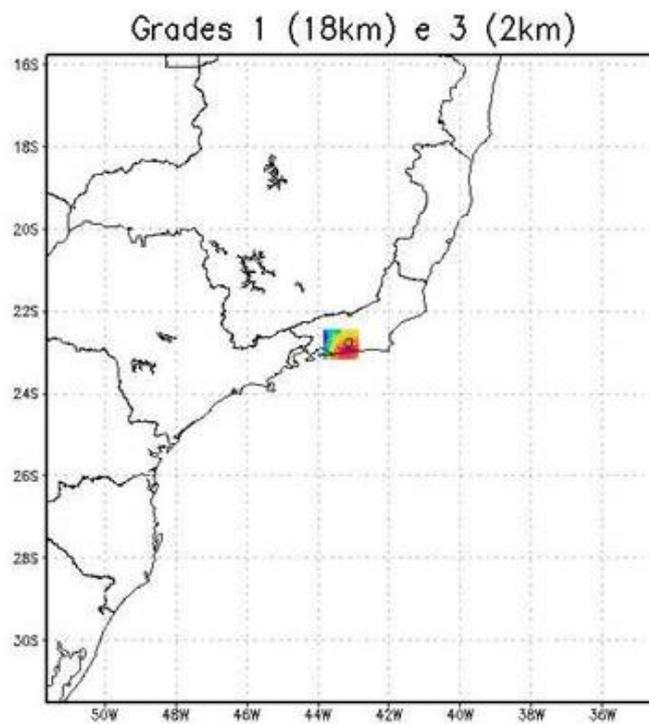


Figura 3.1.b. Grades aninhadas - Grade 1 de 18 km e Grade 3 de 2 km.

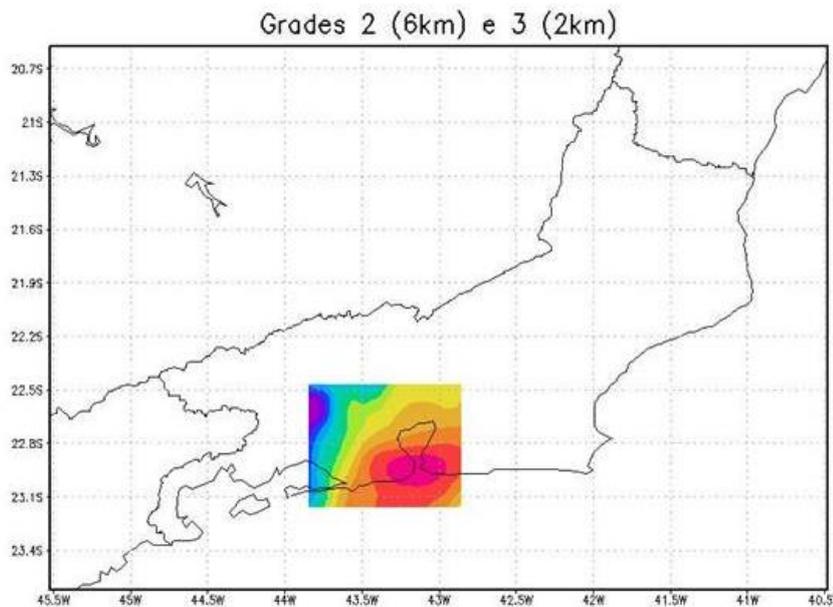


Figura 3.1.c. Grades aninhadas - Grade 2 de 6 km e Grade 3 de 2 km.

Em seguida os dados meteorológicos em escala sinótica, fornecidos pelo modelo global (formato GRIB) são interpolados horizontalmente, no sistema de coordenadas da grade, e verticalmente, no sistema de coordenadas  $\eta$  modificado. Como resultados são gerados arquivos binários, no formato NETCDF (network Common Data Form), com as condições iniciais de contorno que serão usadas pelo modelo WRF.

Quadro 3.1: Descrição e dimensões das grades usadas no caso Angra dos Reis.

Grades	Latitude	Longitude	Espaçamento	Níveis
Grade 1	20°N a 60°S	90°W a 0°E	54km	27
Grade 2	14,9°S a 31,1°S	51.1°W a 34,9°W	18km	27

Quadro 3.2: Descrição e dimensões das grades usadas nos casos Morro do Bumba e Região Serrana.

Grades	Latitude	Longitude	Espaçamento	Níveis
Grade 1	14,9°S a 31,1°S	51.1°W a 34,9°W	18 km	27
Grade 2	19,9° S a 26,1° S	47,75°W a 18,25°W	6 km	27
Grade 3	22,3° S a 23,7° S	43,94°W a 42,06°W	2 km	27

O modelo WRF foi integrado para o caso de Angra dos Reis, com dois tipos de configuração. A primeira, o tempo de simulação foi de 72 horas, esquema de microfísica foi o de parametrização (Hong et al. 2004), baseado no esquema de Kain-Fritsch, radiação de ondas longas foi o baseado em Mlawer et al. (1997); radiação de ondas curtas foi o sistema baseado em Dudhia (1989); camada limite baseado em “MM5 Similarity, camada limite planetária baseado no esquema da Universidade de Yonsei, o fluxo de calor escolhido foi o que opta pela parametrização de cumulus esquema Kain-Fritsch com cobertura de neve sem este efeito e com efeito da nuvem na radiação. A Segunda configuração, o tempo de simulação foi de 144 horas e foram mantidos os esquemas de parametrização escolhidos para o tempo de simulação de 72 horas.

O modelo WRF foi integrado para o caso do Morro do Bumba, com dois tipos de configuração, ou seja, foram mantidas as mesmas configurações de 72 horas e 144 horas. Foram feitas as mesmas parametrizações do caso de Angra dos Reis. Porém, para o caso Região Serrana, optou-se por um outro esquema de parametrização de microfísica, o de Goddard. Quanto aos outros esquemas todos foram mantidos.

## **4. RESULTADOS**

### **4.1 Estudo do Caso Angra dos Reis**

#### **4.1.1 Descrição do Caso Angra dos Reis**

Este caso foi selecionado devido à chuva intensa ocorrida em Angra dos Reis na passagem do ano de 2009 para 2010. Esta intensidade pode ser registrada através de estações meteorológicas do CBMERJ que registraram 120 mm de chuva acumulada do dia 30 de dezembro para o dia 31 e do dia 31 para o dia 01 de janeiro de 2010 148,1 mm. Em Angra dos Reis a normal climatológica (1961-1990) de precipitação mensal no mês de dezembro atinge o valor de 261,1mm e em janeiro é de 241,0 mm. Portanto, pode-se perceber o efeito que esta chuva intensa causou. E isto tudo culminou com a subtração de pelo menos 57 vidas e dezenas de famílias desabrigadas, devido ao desmoronamento de uma imensa barreira que destruiu uma pousada onde se encontrava uma das vítimas, além de bairros terem ficados alagados.

Como pode ser observado nas imagens de satélite, figuras 4.1.1.a e 4.1.1.b havia uma baixa pressão a leste do Estado. Nas cartas sinóticas de superfície da Marinha do Brasil, figura 4.1.2.a e 4.1.2.b, na véspera da passagem do ano de 2009 para 2010, também observa-se esta baixa pressão a leste do Estado do Rio de Janeiro, e ela baixa continuou atuando por um longo período como pode ser notado na data e no horário de cada figura. Certamente, isto foi o que contribuiu para a precipitação acumulada em Angra dos Reis naquele período. Apesar de ter sido um pequeno período, no entanto, choveu mais do que o esperado para a metade do mês de dezembro, e isto pode ser confirmado pelas quantidades de precipitação acumulada registradas nos gráficos das figuras 4.1.3 e 4.1.4 oriundas da rede pluviométrica do CBMERJ. Destaca-se o valor acumulado de precipitação do dia 31 de dezembro que chegou a 120 mm e o valor acumulado do dia 01 de janeiro que alcançou 148,1 mm.

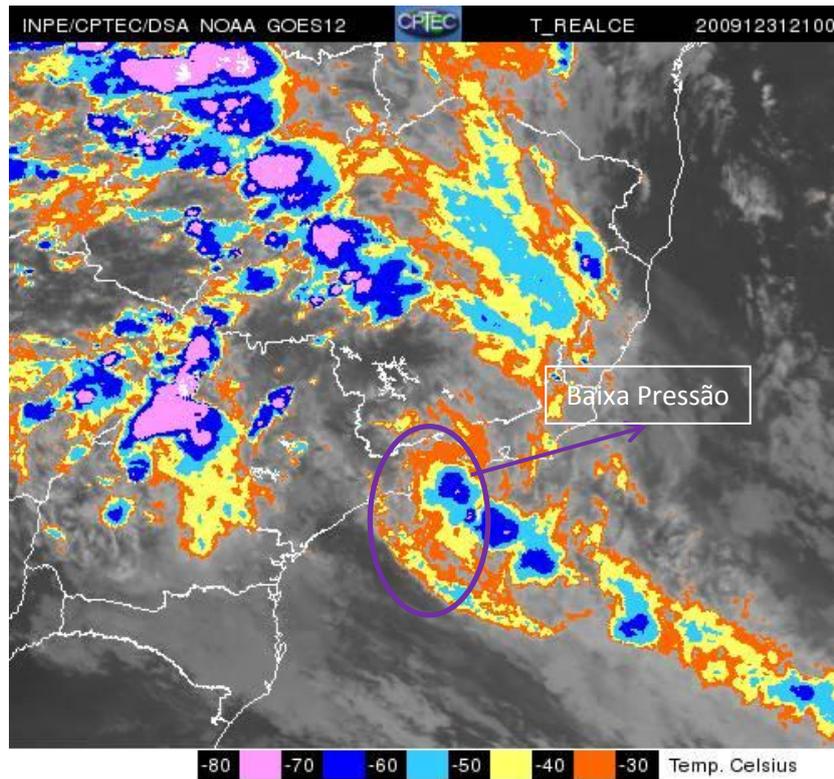


Figura 4.1.1.a: Imagem do canal infravermelho do GOES-12 – 31 de dezembro de 2009 às 21:00 UTC. Fonte: INPE/CPTEC/DAS NOAA.

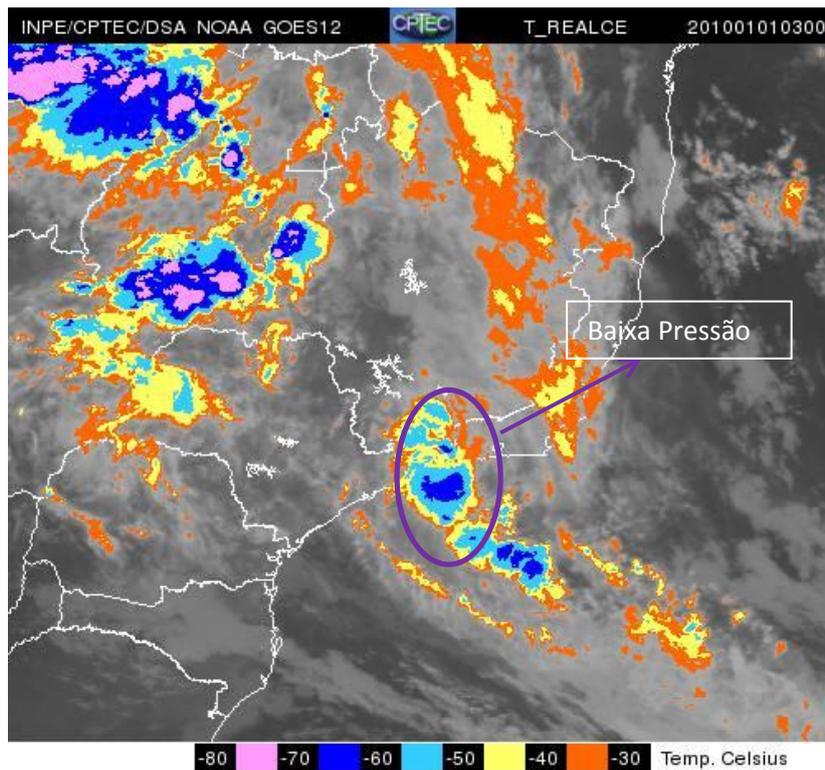


Figura 4.1.1.b: Imagem do canal infravermelho do GOES-12 – 01 de janeiro de 2010 às 03:00 UTC. Fonte: INPE/CPTEC/DAS NOAA.

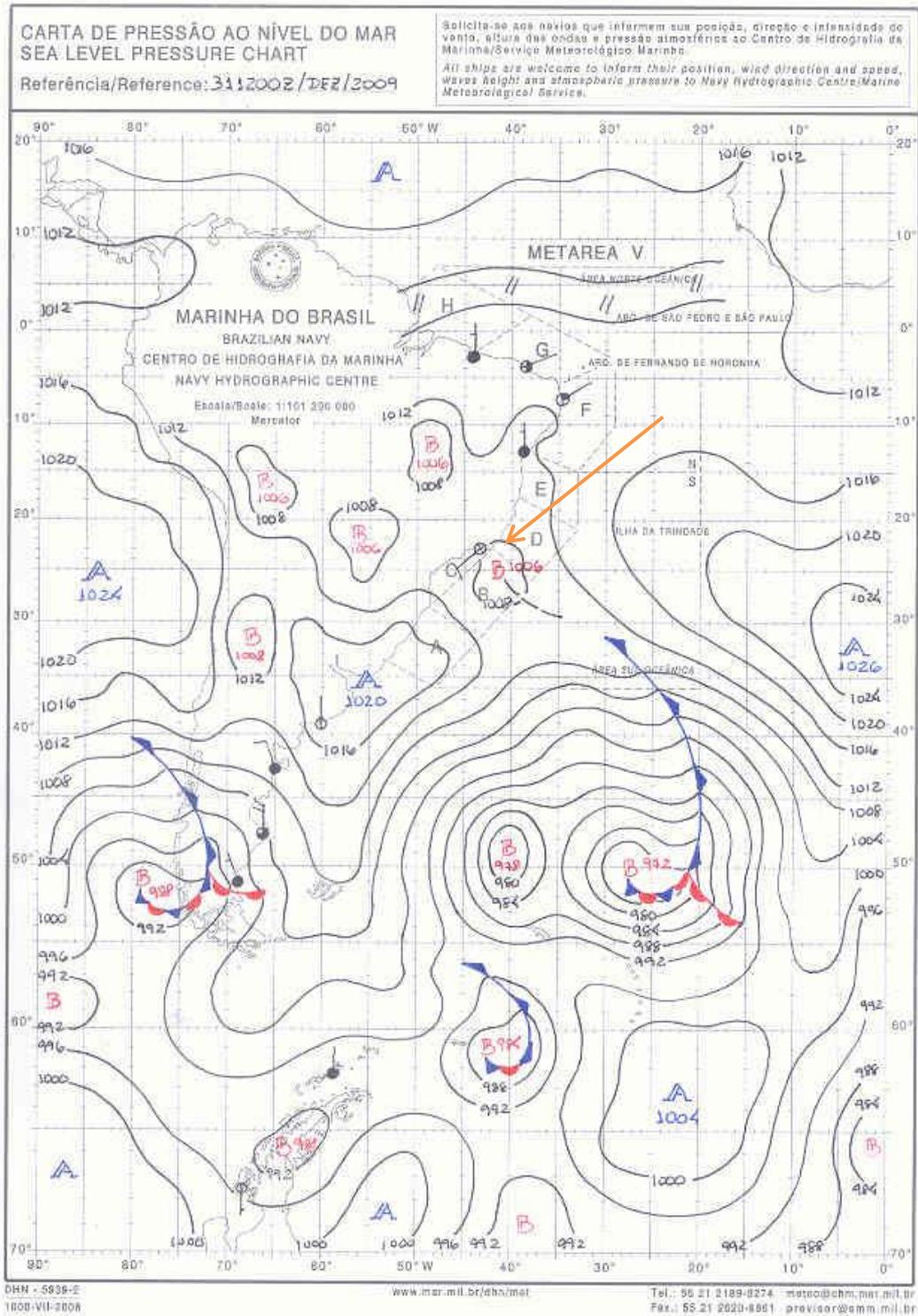


Figura 4.1.2.a: Carta de pressão ao nível do mar em 31 de dezembro de 2009 às 1200Z.

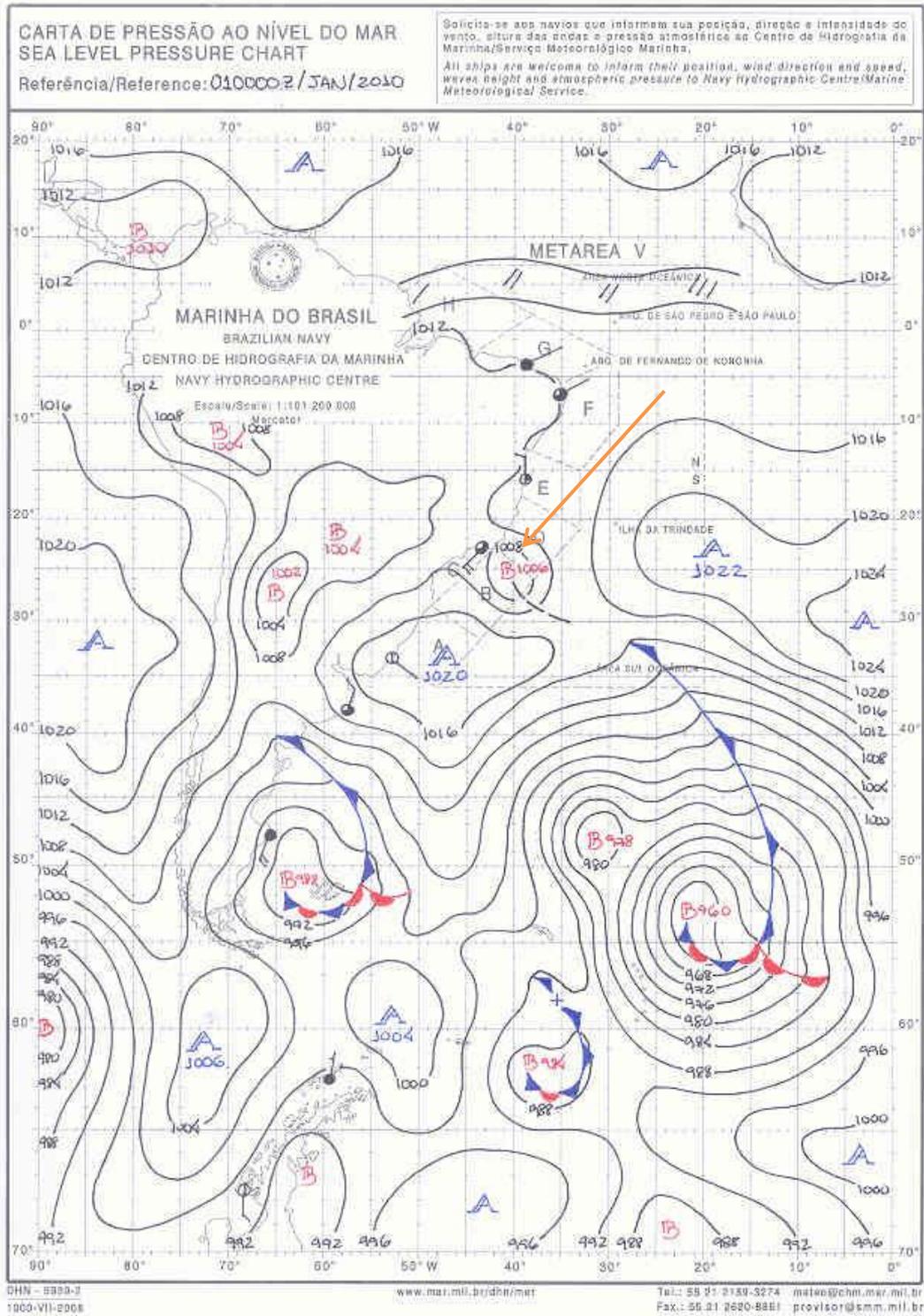


Figura 4.1.2.b: Carta de pressão ao nível do mar em 01 de janeiro de 2010 à 00Z.

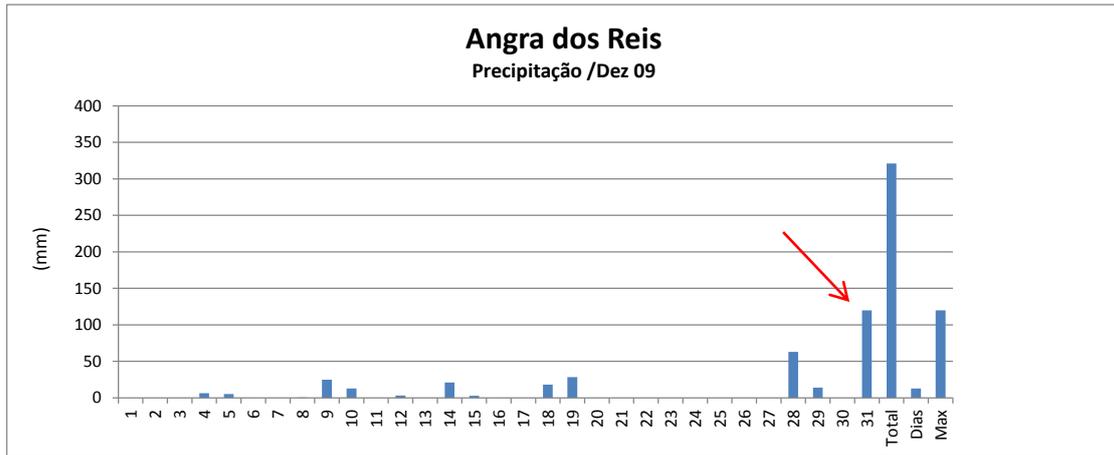


Figura 4.1.3: Rede Pluviométrica CBMERJ- Angra dos Reis/Dez09 com o número de dias de chuvas.

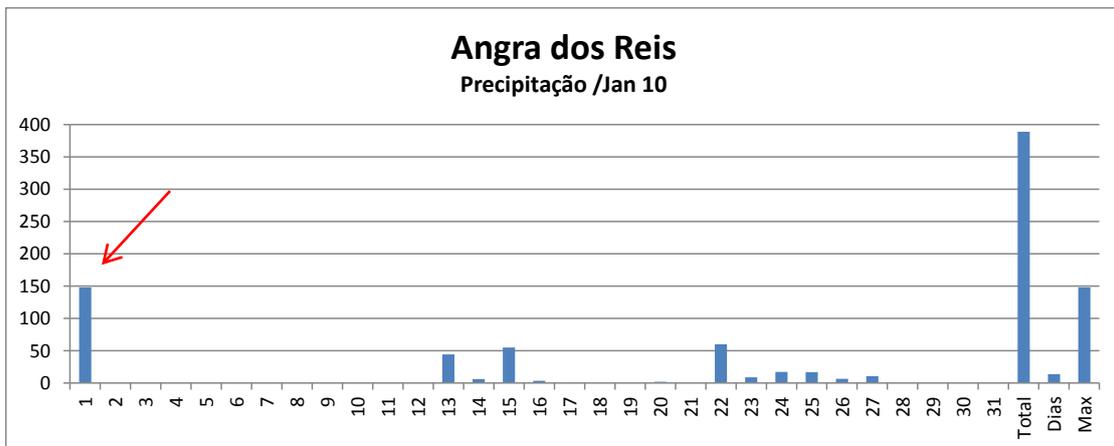


Figura 4.1.4: Rede Pluviométrica CBMERJ – Angra dos Reis/Jan10 com o número de dias de chuvas.

#### 4.1.2 Simulação do Caso Angra dos Reis pelo WRF por 72 horas

Após os experimentos de simulação alguns dos resultados obtidos pela rodada do modelo estão apresentados a seguir. No estudo deste caso é importante enfatizar que o esquema de parametrização de microfísica escolhido foi o de “WSM 3-class simple ice scheme”, no manual classificado como esquema de microfísica 3. Foram usadas duas grades, a maior com espaçamento de 18 km e a menor com 6 km descritas no quadro 3.2 . Na figura

4.15, pode-se observar que a precipitação acumulada por 72 horas simulada pelo modelo, ficou muito subestimada se comparada com o total real obtido em 48h pela Rede Pluviométrica do CBMERJ, cujo valor é de 120 mm (dia 31 de dezembro) e de 150 mm no dia 01 de janeiro de 2010, vide figuras 4.1.3 e 4.1.4. No entanto, a precipitação plotada pelo modelo foi obtida pelo esquema de parametrização convectiva (implícito) e pela microfísica de nuvens (explícita), que na somadas duas obteve-se o resultado da curva com máximo entorno de 43,0mm.

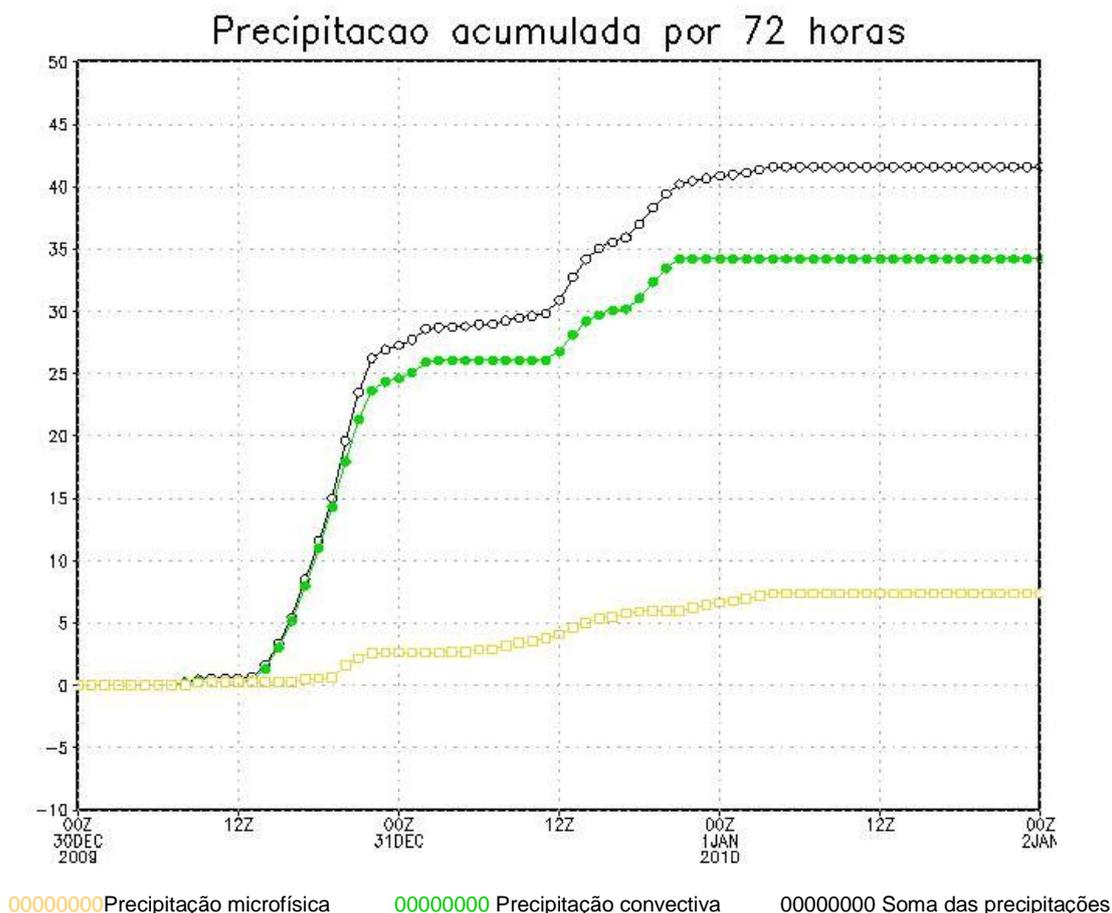


Figura 4.1.5: Precipitação acumulada (simulada) em 72 h (3 dias) do caso de chuvas intensas em Angra dos Reis.

A partição da precipitação convectiva e microfísica gerada pelos modelos numéricos de previsão de tempo é fundamental para se obter uma previsão com maior acurácia. No entanto, a opção pela parametrização de microfísica é a forma mais ideal e mais adequada, como já foi comentado na literatura (Silva Ramalho et. al., 2000). Assim, com o aumento da resolução

especial, os processos de desenvolvimento das nuvens se tornaram mais sensíveis com relação à grade de resolução do modelo. Por este motivo, ao analisarmos a figura 4.1.6, podemos notar a precipitação implícita ( convectiva).

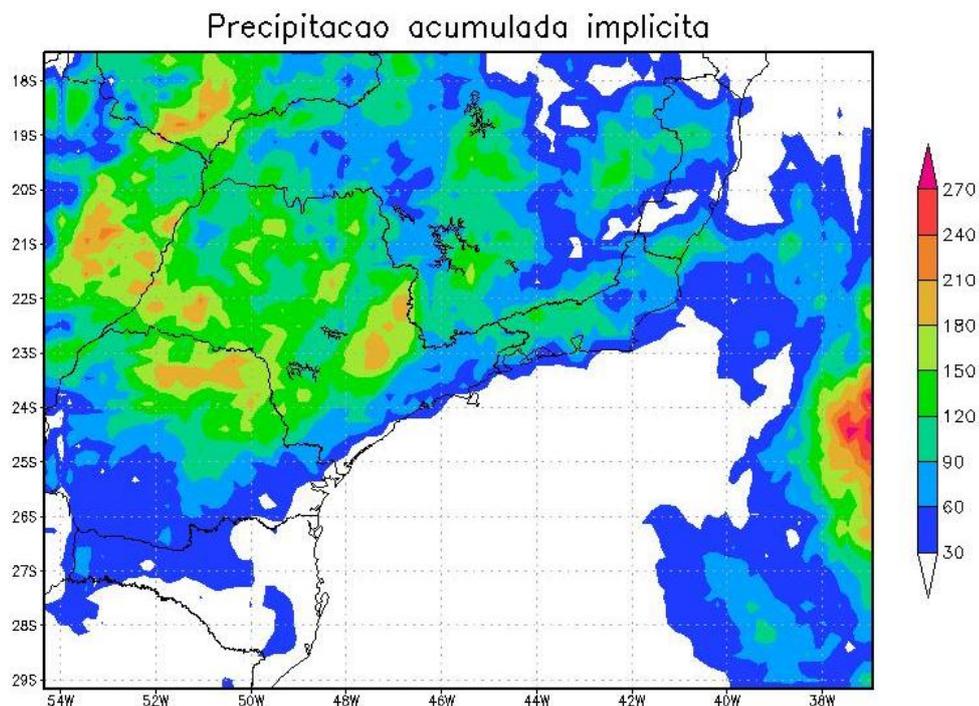


Figura. 4.1.6: Precipitação acumulada implícita. Caso chuvas intensas de Angra dos Reis.

É possível perceber que precipitação convectiva aproxima-se mais da quantidade observada, ou seja, houve um aumento da precipitação acumulada total e isto se confirma quando se compara o gráfico da figura 4.1.4.

#### 4.1.3 Simulação do Caso Angra dos Reis pelo WRF por 144 horas

Tomando o mesmo caso, mas agora considerando um horizonte de 144 horas, o resultado da precipitação acumulada se modifica consideravelmente, como pode ser verificado na figura 4.1.7.

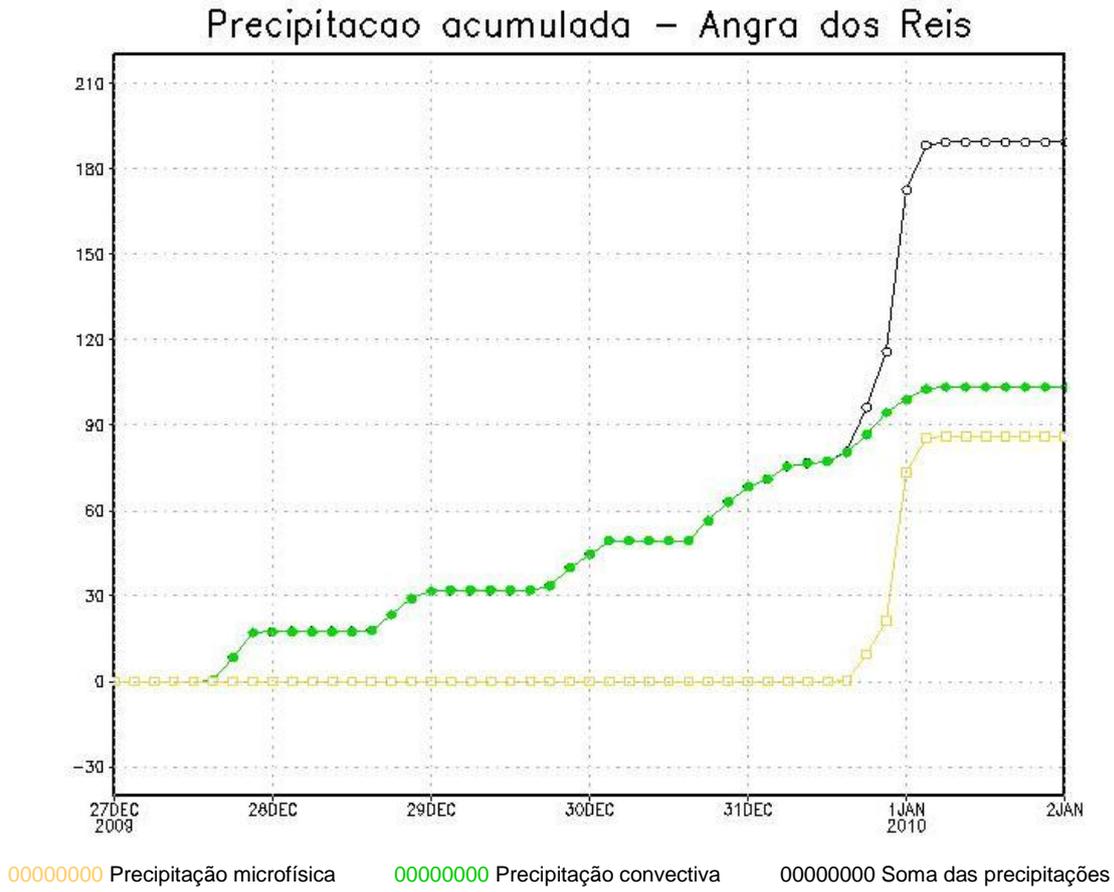


Figura 4.1.7: Precipitação Acumulada de 144 h (6 dias) do caso de chuvas intensas em Angra dos Reis.

Este resultado sugere que é necessário antecipar o início da integração do modelo para obter-se uma resposta mais próxima do observado, principalmente com referencia à precipitação. Na realidade a simulação da chuva em modelos regionais sofre duas dificuldades: a primeira se refere a uma demora do modelo em produzir a chuva adequada (spinup). A outra dificuldade é devida à umidade do solo que não é assimilada rotineiramente no Brasil. Assim, só quando o modelo é integrado por várias horas com chuva, o solo simulado pelo modelo fica encharcado, e a resposta em termos de chuva intensa fica mais realística.

Novamente a precipitação do modelo foi separada em convectiva e de microfísica, obtendo-se o resultado indicado na figura 4.1.8, que mostra a precipitação convectiva acumulada durante as últimas 72 horas em um horizonte de 144 horas.

O resultado do modelo surpreende, não mostrando qualquer quantidade de precipitação acumulada em Angra dos Reis. Então, foi feita a simulação da precipitação de microfísica e os valores de precipitação na região foram plotados no gráfico da figura 4.1.9.

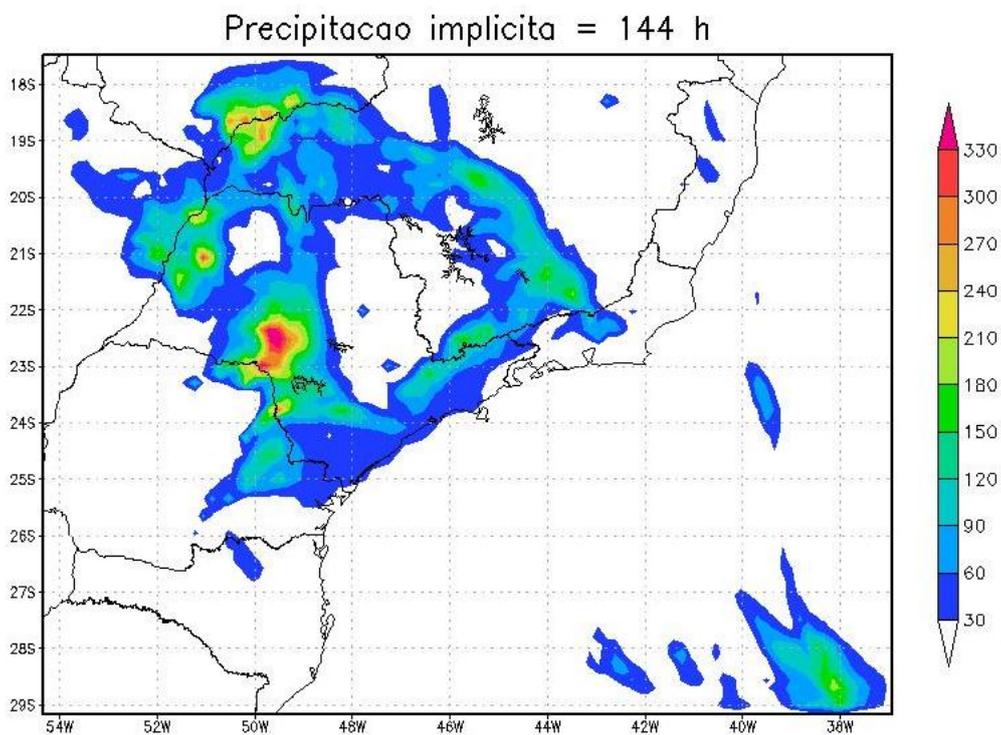


Figura 4.1.8: Precipitação convectiva (implícita) acumulada de 144h (6 dias) do caso de chuvas intensas em Angra dos Reis.

### Precipitação acumulada explícita = 144h

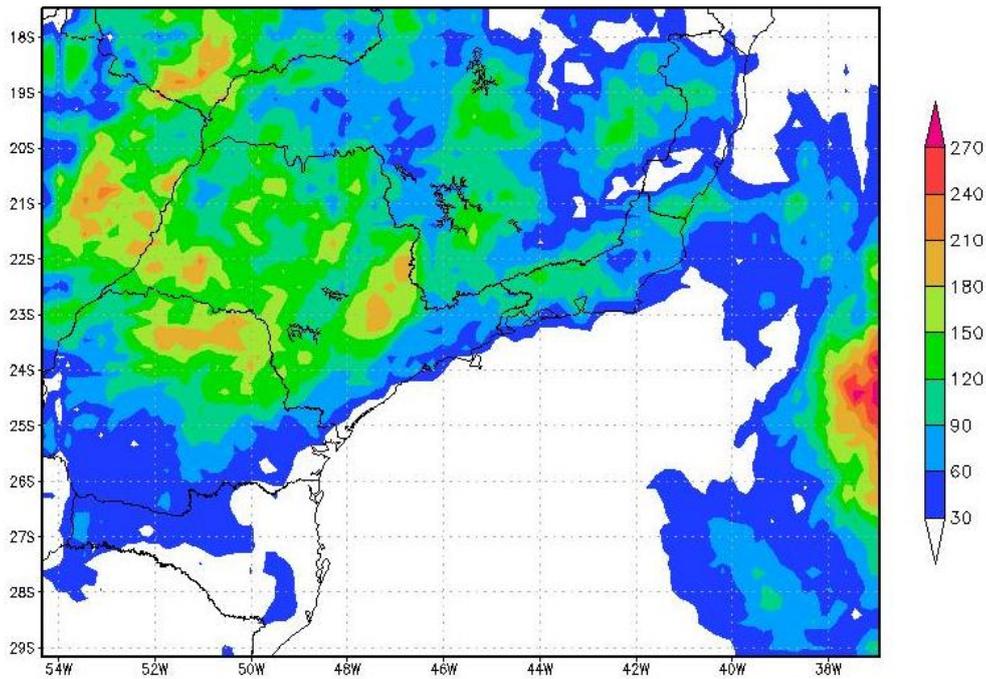


Figura 4.1.9: Precipitação microfísica acumulada de 144h (6 dias) do caso de chuvas intensas em Angra dos Reis.

Desta maneira, a simulação do modelo WRF da precipitação de microfísica acumulada mostra valores extremos no oceano e no Estado de São Paulo, e mais uma vez em Angra dos Reis, ele considera valores distantes dos observados. Entretanto, o modelo calcula um valor relevante de precipitação de microfísica acumulada na região de Angra dos Reis, e este valor já seria suficiente para ser dado um aviso de alerta de chuvas intensas na região.

## 4.2 Estudo do Caso Morro do Bumba

### 4.2.1. Descrição do Caso Morro do Bumba

O caso Morro do Bumba foi escolhido pelo mesmo motivo do caso de Angra dos Reis. Este segundo episódio estudado refere-se a chuvas intensas que se abateram principalmente sobre as cidades do Rio de Janeiro, Niterói e São Gonçalo no início de abril de 2010. Estas fortes chuvas que caíram sobre a cidade do Rio de Janeiro foram provocando alagamentos em diversos pontos

da cidade desde a noite do dia 05 de abril 2010. Segundo a GEORIO, o volume de chuva acumulado entre 17 horas e 30 minutos e 18 horas e 30 minutos chegou a 40 mm no Sumaré e a 37 mm no bairro do Méier, entre outros. Este temporal deixou um saldo de 180 mortes, a maioria soterrada por deslizamentos de terra (Fonte: oglobo.globo.com), na realidade, este deslizamento não foi só devido às chuvas intensas mas também devido a ter sido permitido a construção de casas num aterro sanitário.

A tragédia ocorrida em Niterói, teve acumulados de chuva significativos em várias localidades que ultrapassaram 150mm (Fonte CPTEC/INPE), valor este esperado para o mês de abril todo. A estação convencional do INMET do Rio de Janeiro, cuja latitude e longitude são muito próximas da cidade de Niterói (latitude 22° 53' S e longitude 43° 07' W), onde aconteceu o deslizamento do Morro do Bumba, dá uma idéia aproximada, quando se compara os dados dos meses do ano de 2010, com o mês de abril deste mesmo ano e em seguida com a normal climatológica (1961-1990). Veja as figuras 4.2.1 e 4.2.2 a seguir. Além dos dados das figuras 4.2.1 e 4.2.2, se pode também comparar com os dados das estações da Fundação GEORIO e da estação Climatológica do Laboratório de Geociências da FFP/UERJ, situada em São Gonçalo. Veja as figuras 4.2.3 e 4.2.4. Observa-se, como está destacado, que entorno de apenas uma hora a precipitação acumulada foi de 70 mm em São Gonçalo.

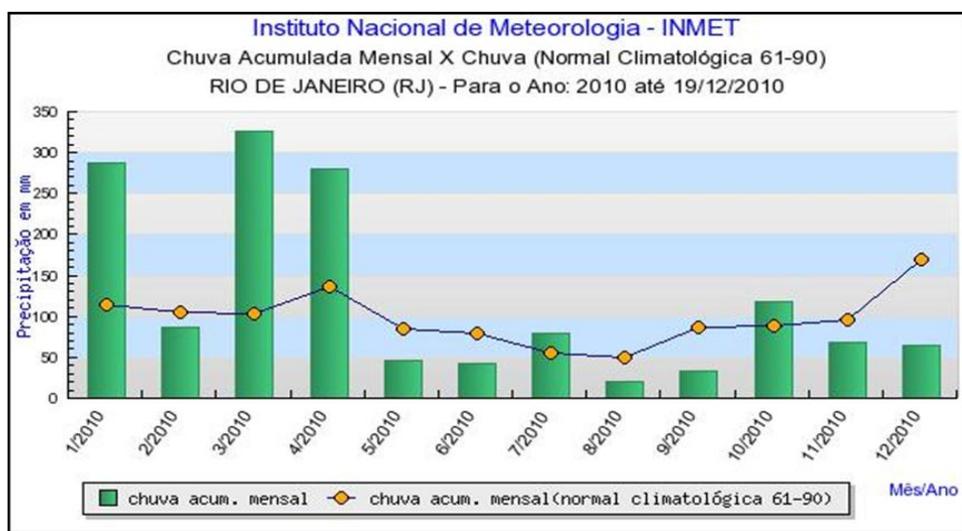


Figura 4.2.1: Chuva Acumulada Mensal x Chuva (Normal Climatológica 61-90).

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia – INMET.

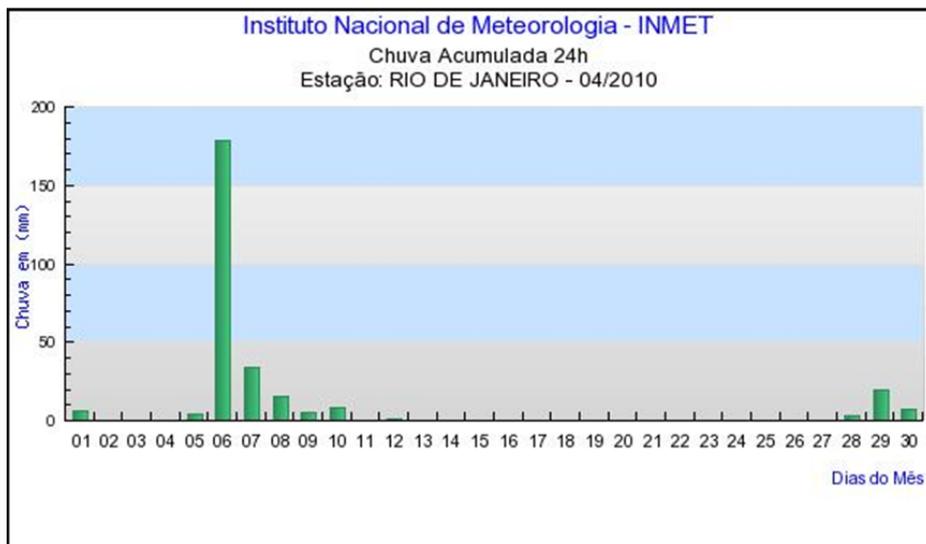


Figura.4.2.2: Chuva acumulada 24h, mês abril de 2010.

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia - INMET



Figura.4.2.3: Índice Pluviométrico das estações da Fundação GEORIO e da estação Climatológica do Laboratório de Geociências da FFP/UERJ, situada em São Gonçalo. Período 05 de abril de 2010.

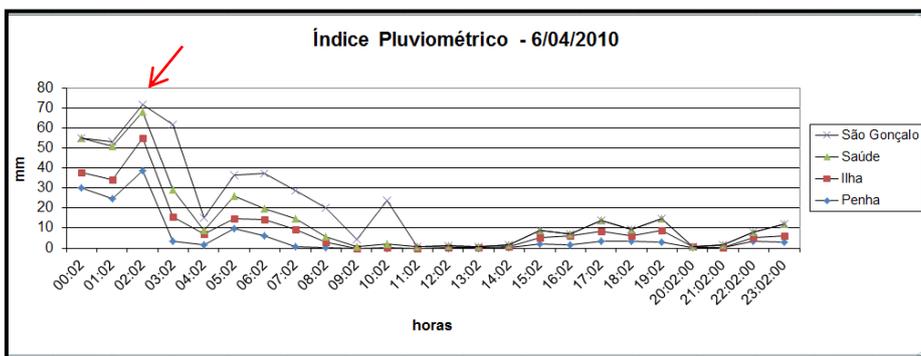


Figura.4.2.4: Índice Pluviométrico das estações da Fundação Geo-Rio e da estação Climatológica do Laboratório de Geociências da FFP/UERJ, situada em São Gonçalo. Período 06 de abril de 2010.

Utilizando a imagem de satélite, do IR do GOES-12, figura 4.2.5, pode-se perceber o Estado do Rio de Janeiro sob a influência do sistema frontal.

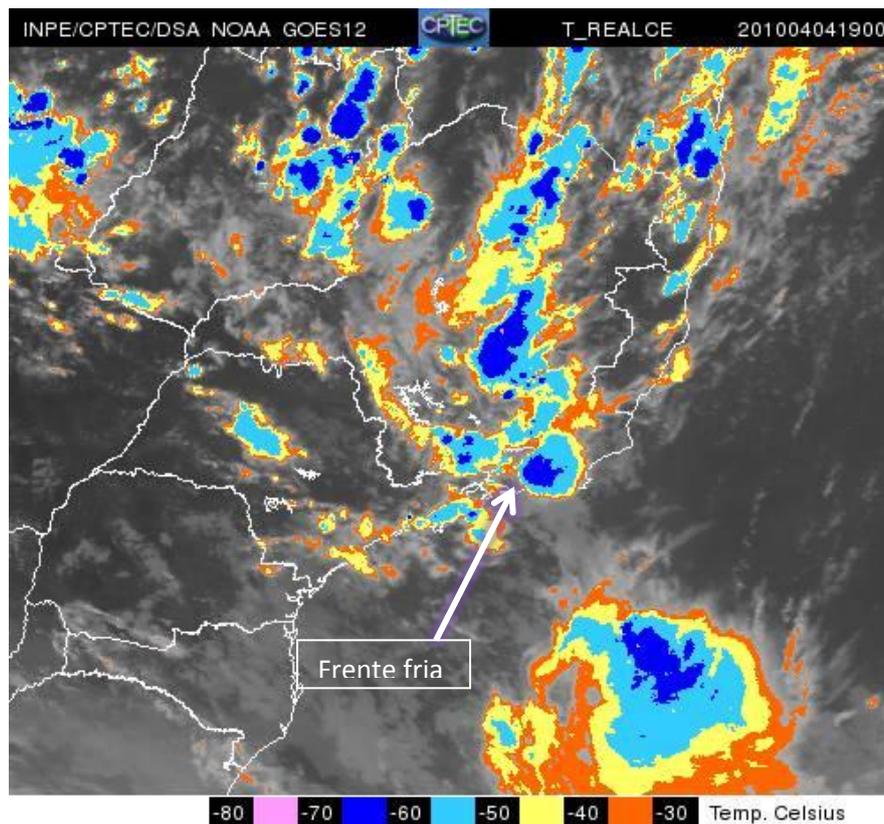


Figura 4.2.5: Imagem infravermelha do GOES-12 – 04 de abril de 2010 às 19:00 UTC. Fonte: INPE/CPTEC/DAS NOAA.

Este sistema frontal também pode ser observado na carta sinótica do dia 5 de abril de 2010 na figura 4.2.6.a. No entanto o que não se pode deixar de perceber é que este sistema ficou praticamente estacionado sobre o estado por muitas horas, como pode-se notar pelo horário da carta sinótica do dia 6 de abril figura 4.2.6.b, e neste período a chuva foi ininterrupta.

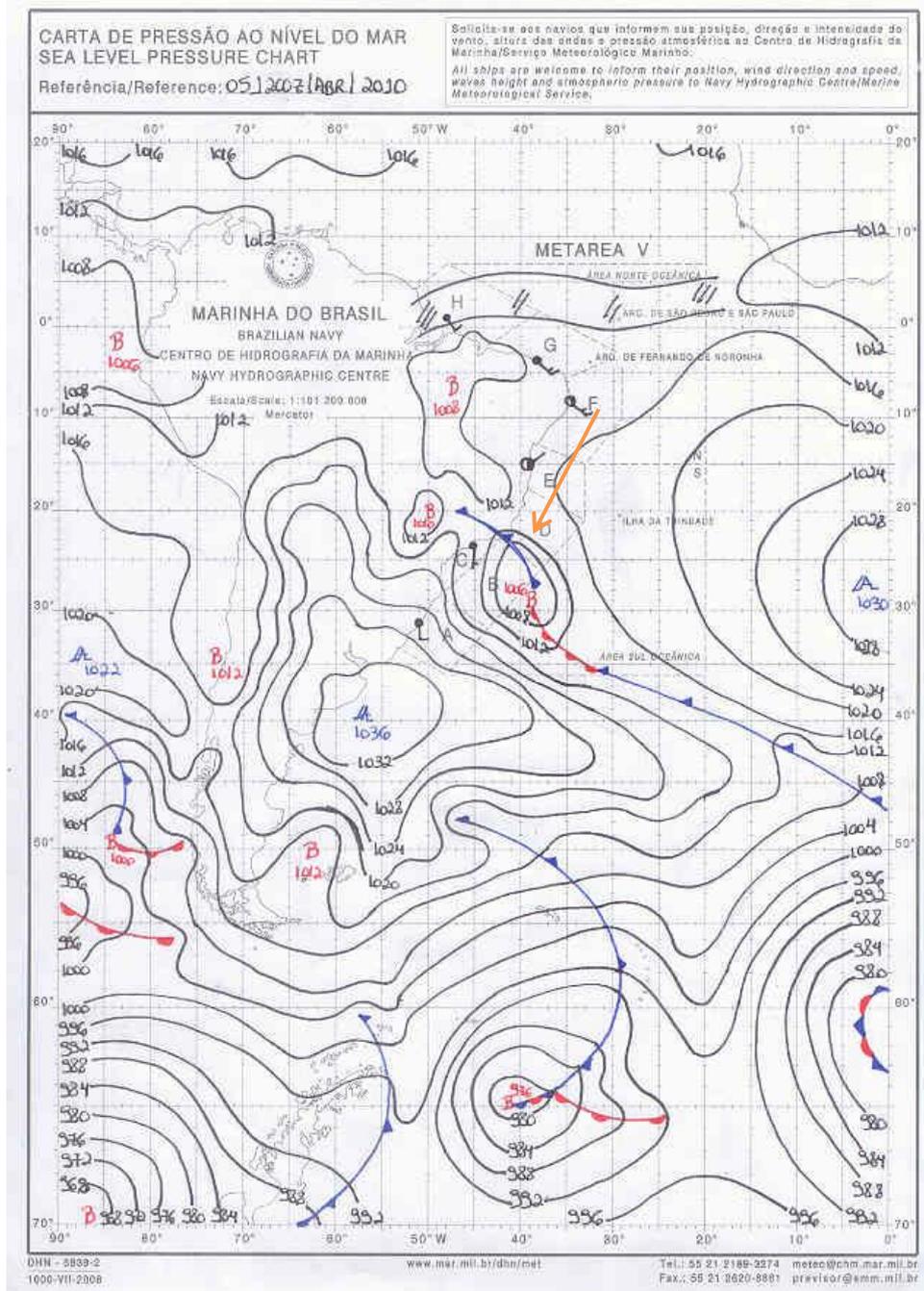


Figura 4.2.6.a: Carta de pressão ao nível do mar em 5 de abril de 2010 às 1200Z.



O evento meteorológico extremo foi provocado pela combinação de dois fatores meteorológicos principais: a aproximação e chegada de uma frente fria de moderada intensidade e a presença de uma massa de ar quente, úmida e instável, com rajadas de vento com valores próximos a 75km/h.(Fonte: CPTEC/INPE).

#### 4.2.2. Simulação do Caso Morro do Bumba com o Modelo WRF

A figura 4.2.7 evidencia um ciclone localizado no oceano com vento de forte intensidade no sentido norte a 850 hPa. Percebe-se a presença de um corredor de umidade alimentado pelo vento de norte. A anomalia de umidade específica tem valor significativo na região do Morro do Bumba.

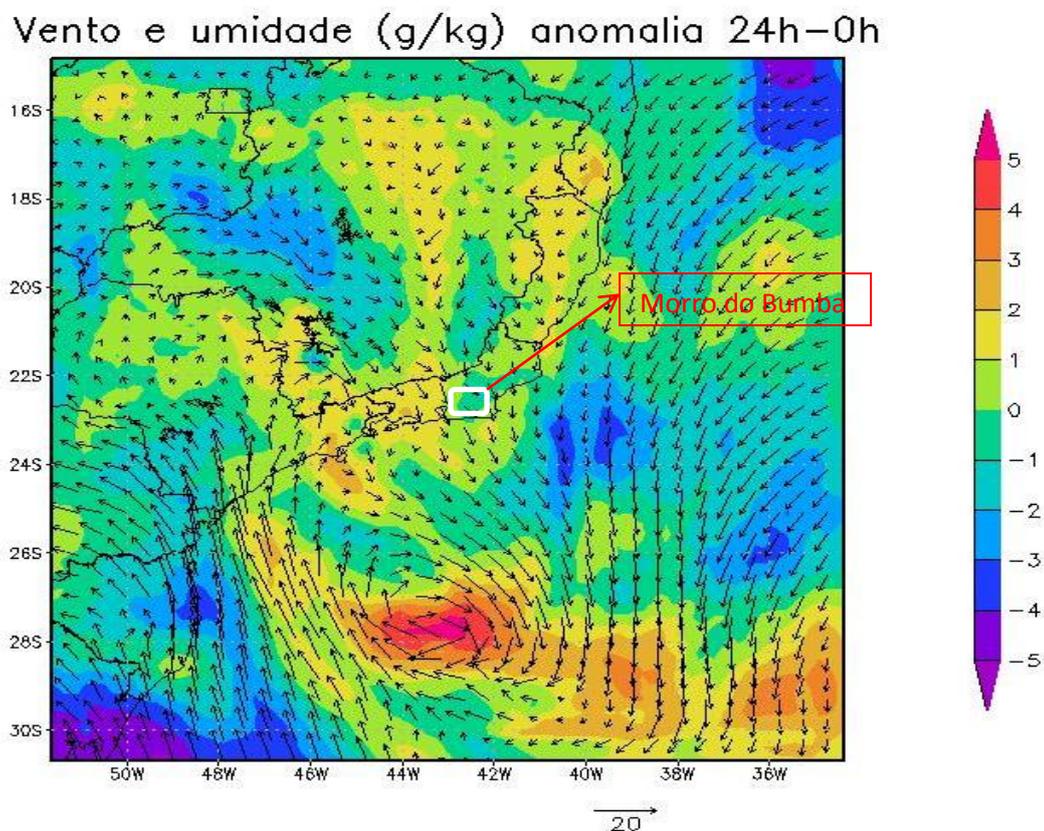


Figura 4.2.7: Anomalia dos campos do vento e da umidade específica (g/kg) no intervalo entre 0 UTC do dia 4 e 0 UTC do dia 5 de abril de 2010.

A figura 4.2.8 de 24h horas após, mostra o avanço do sistema frontal, mas observa-se a mudança do sentido do vento que passa a ser de sul e nota-se agora a umidade com valores bem menores como era esperado.

### Vento e umidade (g/kg) anomalia 48h-24h

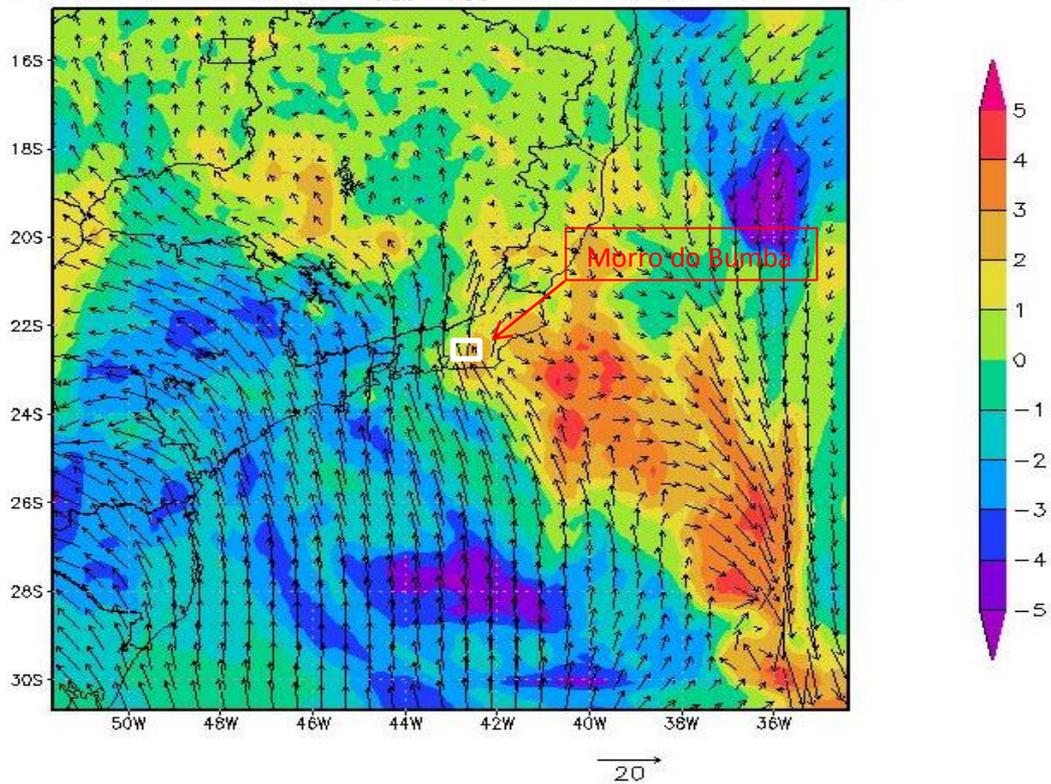


Figura 4.2.8: Anomalia dos campos do vento e da umidade específica (g/kg) no intervalo entre à 0 UTC do dia 5 e 0 UTC do dia 6 de abril de 2010.

A figura 4.2.9 com 48 horas passadas, o sistema frontal que ainda permanece intenso, continuando a se afastar do continente, deixando a costa do Estado do Espírito Santo e com um valor de umidade específica bem menor se comparado ao anterior a passagem do sistema frontal.

### Vento e umidade (g/kg) anomalia 72h-48h

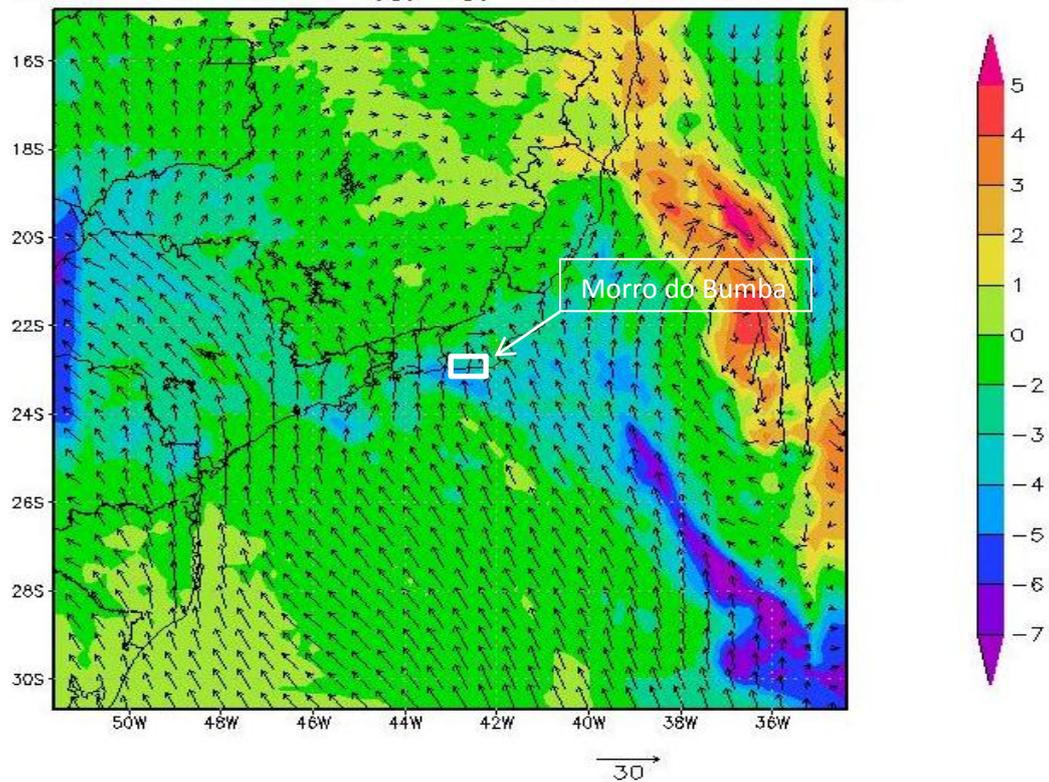


Figura 4.2.9: Anomalia dos campos do vento e da umidade específica (g/kg) no intervalo entre à 0 UTC do dia 6 e 0 UTC do dia 7 de abril de 2010.

A simulação do modelo WRF para o caso do Morro Bumba, como pode ser visto na figura 4.2.10, mostrou-se em 72 horas com valor total de precipitação acumulada subestimado em relação ao valor real, mas valor suficiente para que um previsor desse um alerta, pois na literatura encontramos que os modelos nunca conseguem prever o momento e a quantidade exata de chuva que vai ocorrer.

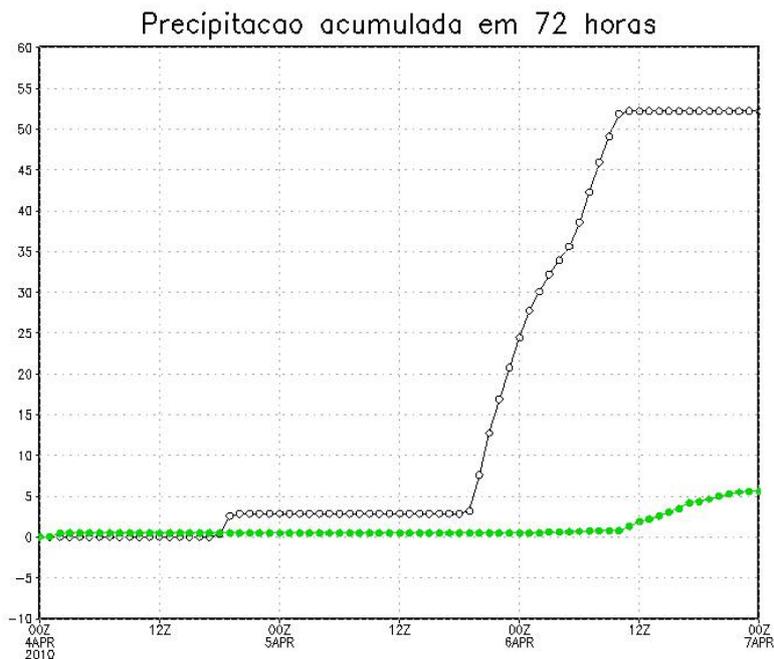


Figura 4.2.10: Precipitação acumulada (simulada) em 72 h (3 dias) do caso de chuvas intensas no Morro do Bumba.

Apesar disso, pode-se extrair da figura que houve uma precipitação acumulada intensa, uma vez que entorno das 6h local o valor da precipitação acumulada era menor que 5 mm e alcançou antes das 9 horas local um pouco mais que 50 mm, daí conclui-se que a duração da chuva é que foi o diferencial para o desfecho ocorrido.

Na natureza existem várias formas que a água pode possuir na atmosfera, incluindo seis espécies de água, a saber: vapor d' água, água de nuvem e cristais de gelo, água de chuva, granizo/graupel e neve (Hallak et al, 2004). A água de chuva foi a escolhida para a simulação do modelo, uma vez que ela é uma espécie precipitante, e precipitação intensa, neste caso em estudo, é o que interessa prever para que a devida prevenção seja feita.

A simulação do modelo WRF mostra no perfil de água de chuva (razão de mistura) um valor maior entre 45°W e 44°W, como pode ser notado na figura 4.2.8 às 20 UTC.

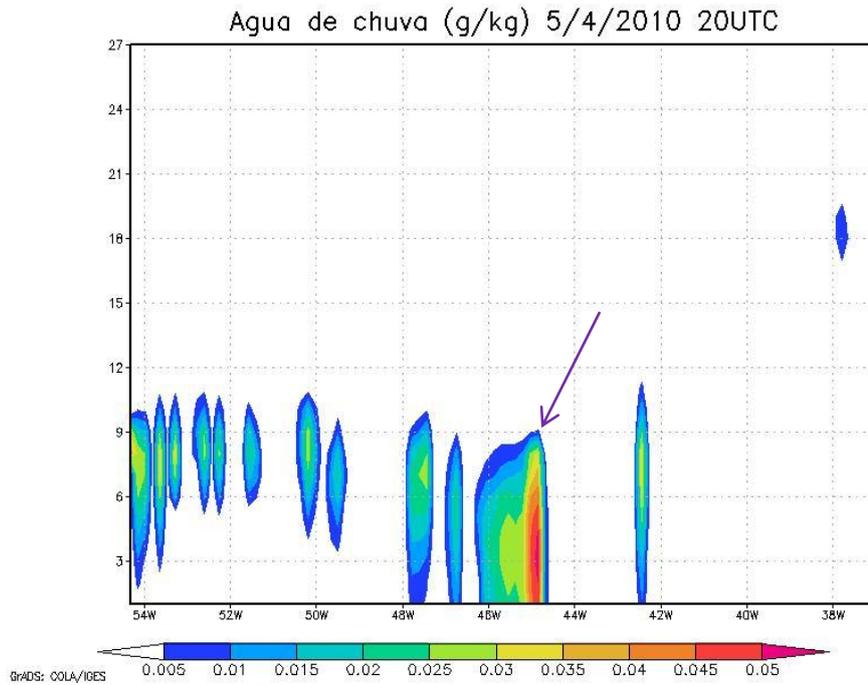


Figura 4.2.11: Perfil vertical da razão de mistura da água de chuva (g/kg) às 20UTC – Caso Morro do Bumba.

No entanto, 3 horas depois, ainda usando o perfil de água de chuva (razão de mistura), o modelo mostra um valor entre 0.05 e 0.055 (g/kg) numa área ligeiramente maior (figura 4.2.12). Porém, o que mais chama a atenção é o tempo de duração da chuva num mesmo local.

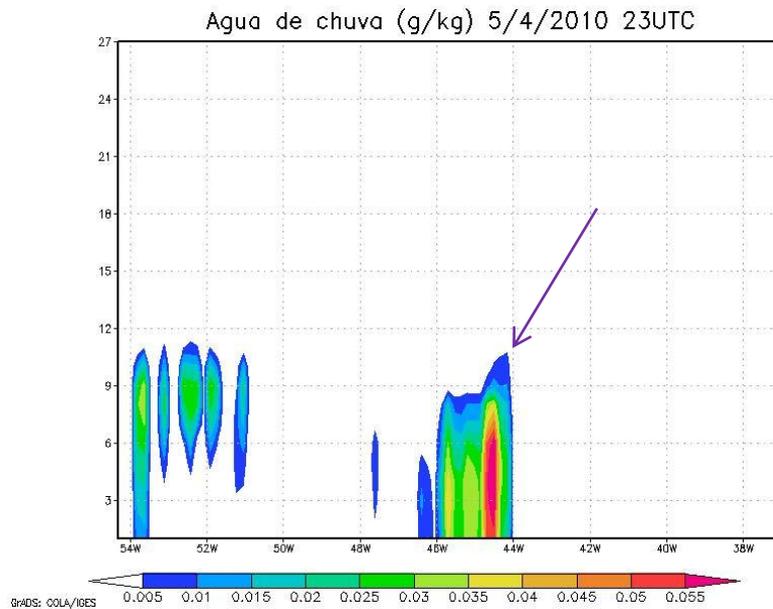


Figura4.2.12: Razão de mistura da água de chuva (g/kg) -Caso Morro do Bumba.

Analisando outros campos de variáveis, como por exemplo, o campo de umidade, figura 4.2.13, nota-se que o modelo distribui a umidade específica de maneira a concentrar valores maiores no oceano, o que pode ser confirmado pela imagem de satélite na figura 4.2.5 que representa a região onde se encontrava a frente fria no período de estudo. Além disso, nesta figura podemos perceber um valor bem acentuado de umidade próximo a latitude  $23,7^{\circ}$  S longitude  $44,5^{\circ}$ W, ponto este que está próximo da cidade de Niterói (latitude:  $22^{\circ} 53' S$  e longitude  $43^{\circ} 07' W$ ), onde ocorreu o evento de chuva intensa, podemos perceber na figura 4.2.1.0, que o modelo simula tal situação.

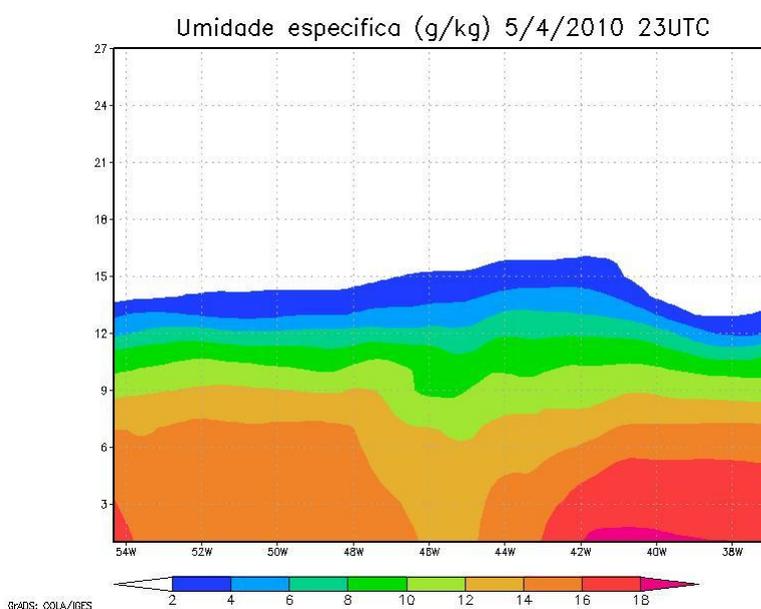


Figura 4.2.13: Umidade específica (g/kg) no dia 5/4/2010 às 23UTC. Caso Morro do Bumba.

Os campos de vento são descritos pelo modelo de modo que representam a frente chegando ao estado do Rio de Janeiro na noite do dia 04 de abril e se afastando do estado no dia 05 de abril, como pode ser extraído da figura 4.2.14 e 4.2.15.

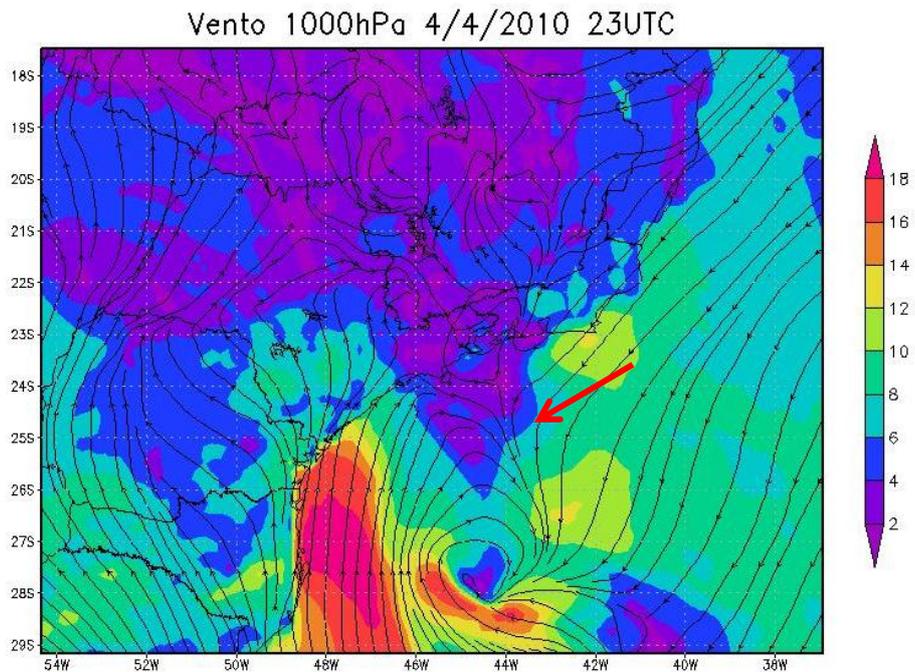


Figura 4.2.14: Vento a 1.000hPa – Caso Morro do Bumba em 04 de abril de 2010 às 23 UTC.

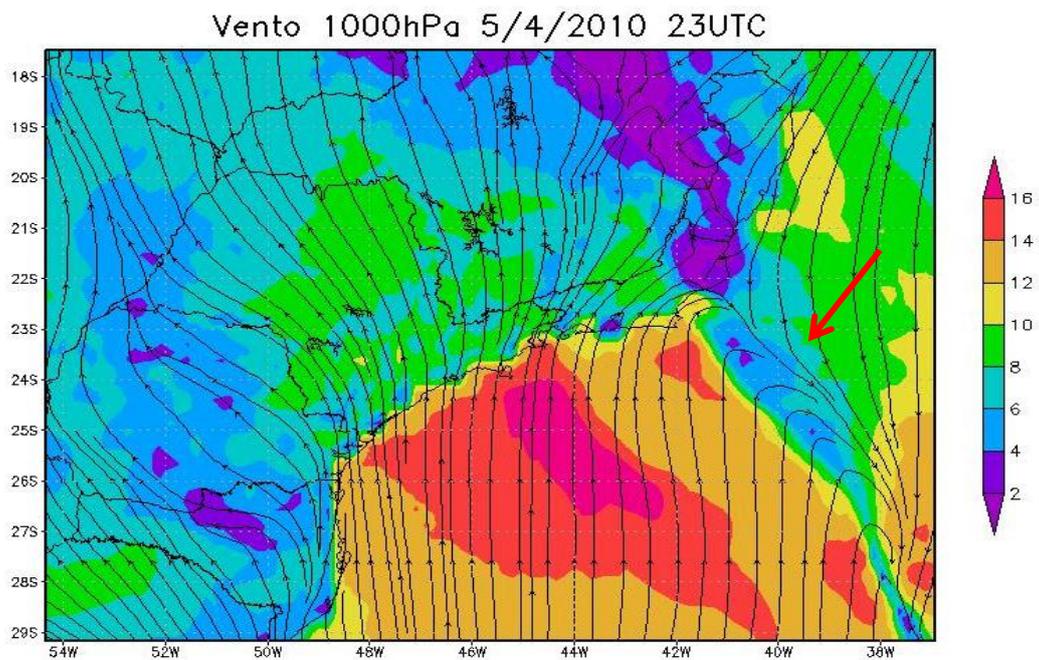


Figura 4.2.15: Vento a 1.000hPa – Caso Morro do Bumba em 05 de abril de 2010 às 23 UTC.

A simulação do modelo WRF, em relação a variável temperatura, que controla o conteúdo de água líquida e o tipo de precipitação que pode ocorrer, dá o valor acima de 34°C, indicando que este aquecimento tem como motivo a aproximação de um sistema frontal, que se movimentou rapidamente, uma vez que no estado do Paraná observa-se valores abaixo de 20°C no dia 04 de abril e no dia 05 a região leste do Estado de São Paulo que estava com valores entorno de 32°C, assume valores próximos a 22°C. Esta queda na temperatura demonstra que o sistema frontal se aproximando do Estado do Rio de Janeiro muito rápido. Vide figura 4.2.14 e 4.2.15. O que se pode confirmar pela imagem de satélite, figura 4.2.5. O modelo simulou as temperaturas antes e durante a passagem do intenso sistema frontal. É de se notar que antes da chegada dele, a temperatura na região metropolitana estava em torno de 34°C no dia 04 de abril de 2010, veja a figura 4.2.16, e no dia 06 de abril (figura 4.2.18) após a passagem do sistema frontal, ela diminui mais de 10°C e atingiu o valor de 23°C

No período em estudo, um cavado em altitude associou-se a um sistema frontal apoiando-o e assim causando chuvas e estragos, principalmente na região da capital do Rio de Janeiro. Esta frente fria com uma massa de ar úmido (marítima) encontrou-se com a massa de ar úmido instável que já se encontrava sobre o Sudeste e causou a chuva observada, com volumes que chegaram a superar 300 mm em algumas localidades da capital fluminense. (INPE/CPTEC), e este estrago todo teve como saldo negativo, infelizmente, a morte de mais de 200 pessoas.

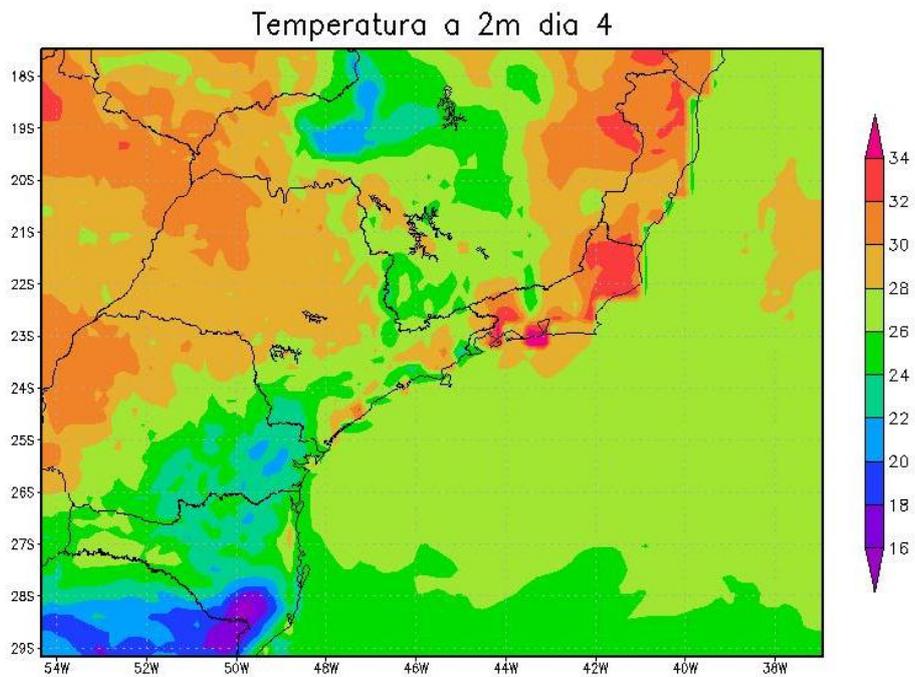


Figura 4.2.16: Temperatura a 2m. Caso Chuvas intensas do Morro do Bumba em 04/04/2010.

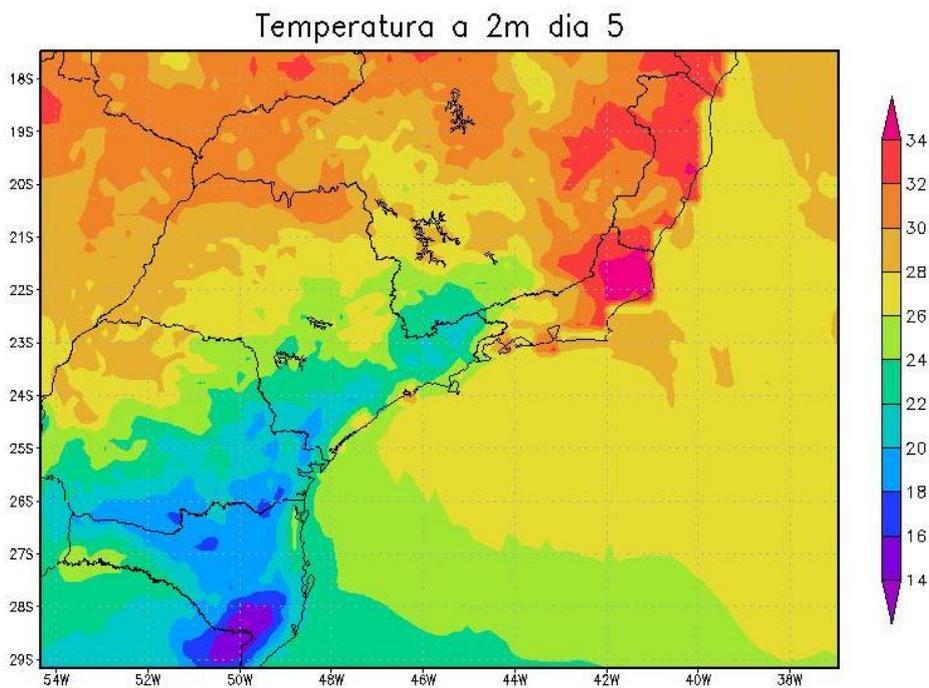


Figura 4.2.17: Temperatura a 2m. Caso das chuvas intensas no Morro do Bumba em 05/04/2010.

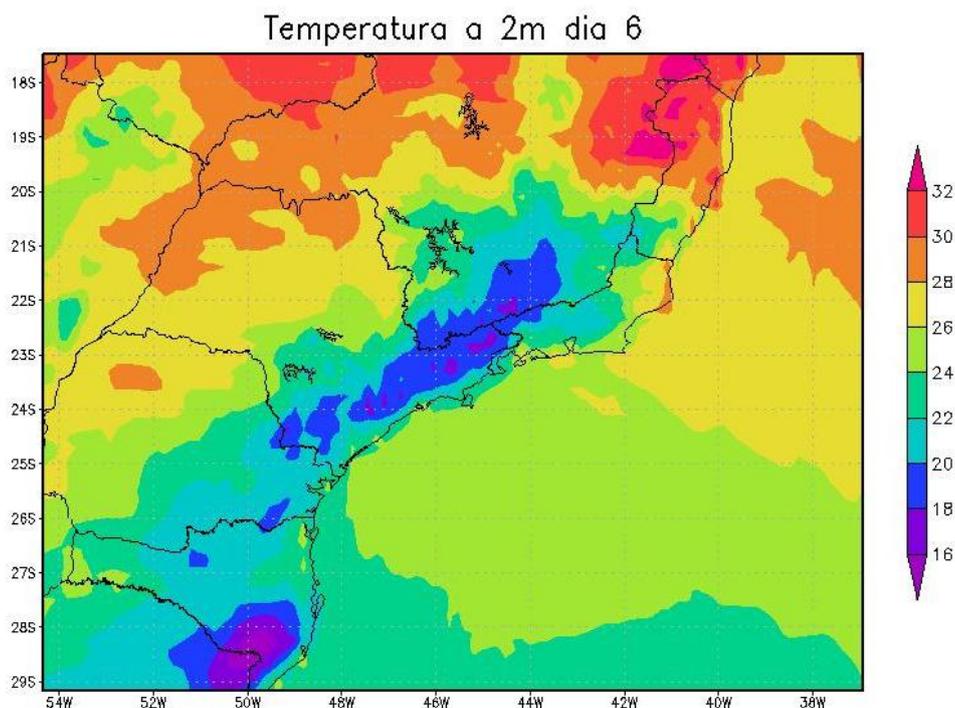


Figura 4.2.18: Temperatura a 2m. Caso Chuvas intensas Morro do Bumba em 06/04/2010.

### 4.3. Estudo do Caso Região Serrana

#### 4.3.1. Descrição do Caso Região Serrana

O caso da Região Serrana foi escolhido não só pelos mesmos motivos dos casos de Angra dos Reis e do Morro do Bumba, mas também por ter sido considerado como pelo menos uma das maiores tragédias naturais observadas no país que provocou a morte de 916 pessoas.

A gravidade da situação foi devido ao grande volume de chuva, e além disso, à saturação do solo, ao transbordamento de rios e córregos. A união de todos estes fatores teve como consequência o deslizamento de encostas e a destruição de parte de cidades como Nova Friburgo, Teresópolis e Petrópolis entre outras, configurando assim um cenário de catástrofe. O número de desaparecidos chegou a 345 e o de desalojados superou 30 mil pessoas.

(Fonte:<http://www.sidneyrezende.com/noticia/125619+tragedia+na+regiao+serrana+345+peessoas+continuam+desaparecidas>). A partir do dia 11 de janeiro houve a formação de um episódio de ZCOU, mas já havia acontecido um anterior a este. Além da persistência, este sistema se reforçou ao longo da semana e o padrão atmosférico ao longo da coluna troposférica adquiriu características da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), configurando tal sistema a partir do dia 14. No decorrer daquela semana a atuação do canal de umidade associado à ZCOU/ZCAS provocou muita instabilidade e acumulados de chuva muito significativos no Sudeste do país. No estado do Rio de Janeiro choveu forte durante várias horas seguidas. O grande volume de chuva, a saturação do solo e a vulnerabilidade da região provocaram transbordamento de rios, córregos e deslizamentos de encostas, causando a morte de centenas de pessoas.(INPE/CPTEC)

Acrescente-se a todas essas motivações o fato de não ter sido previsto com antecipação necessária, e informada de maneira precisa a intensidade e a abrangência espacial da precipitação que ocorreria. Os acumulados de precipitação foram significativos em várias localidades como Nova Friburgo com mais de 180mm (INMET) de chuva acumulada em 24 horas, em Teresópolis com mais de 80mm no mesmo período.

Na semana que antecedeu o evento, foi publicado no site de notícias G1 que devido às chuvas daqueles últimos dias havia ocorrido deslizamento de terra que derrubara uma casa, matando quatro pessoas, em Teresópolis. Como visto na revisão bibliográfica, quando ocorre encharcamento do solo de pelo menos 100 mm de chuva acumulada, há riscos acentuados de ocorrerem deslizamentos, o que certamente deve ter ocorrido neste episódio.

Como pode ser observado respectivamente pelas imagens de satélites figuras 4.3.1 e 4.3.2, havia duas importantes situações ocorrendo: A Zona de Convergência de Umidade (ZCOU) e Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) exercendo sua influência sobre o Estado do Rio de Janeiro. O mesmo se confirma nas cartas sinóticas de superfície da Marinha do Brasil, figura 4.3.3 (a) e (b), onde observa-se um sistema de baixa pressão sobre o estado. Pelas figuras 4.3.6 e 4.3.7 originárias no sítio do INEA pode ser observado o volume de chuva ocorrido e também a longa duração deste. Além deste fato, ventos de

Noroeste, na baixa troposfera traziam umidade do Estado de Minas Gerais, causando toda a precipitação acumulada na região.

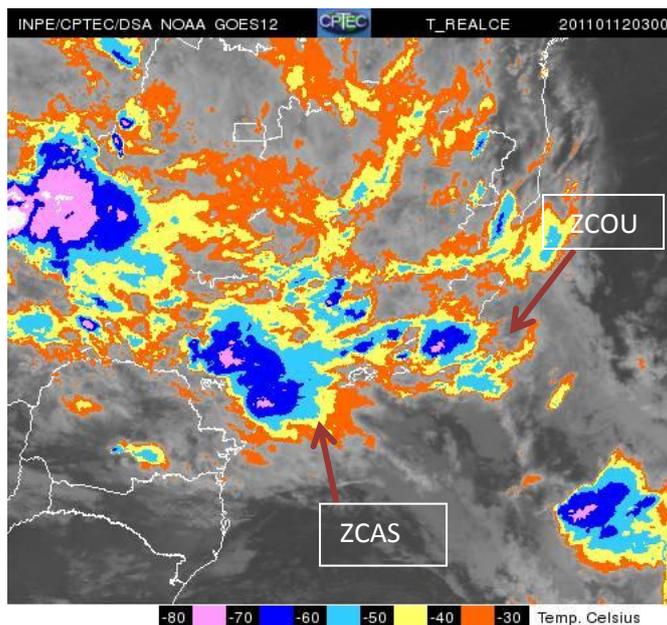


Figura 4.3.1: Imagem infravermelha do GOES-12 – 11 de janeiro de 2011 às 03:00 UTC. Fonte: INPE/CPTEC/DAS NOAA

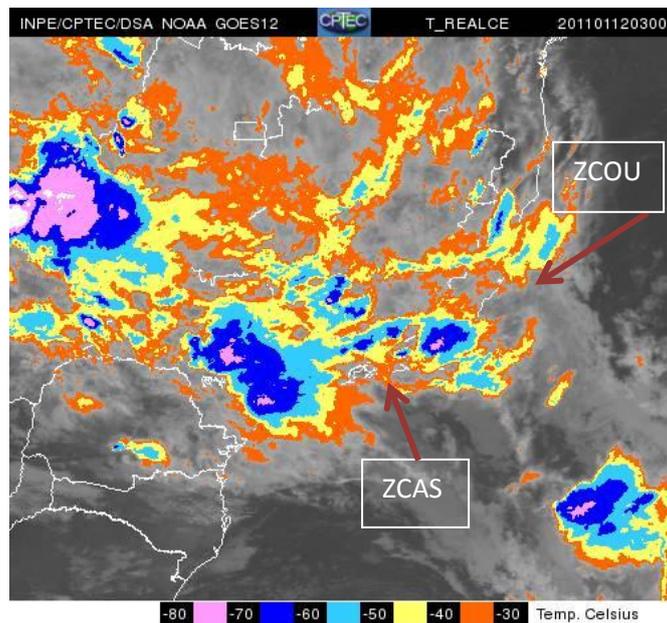
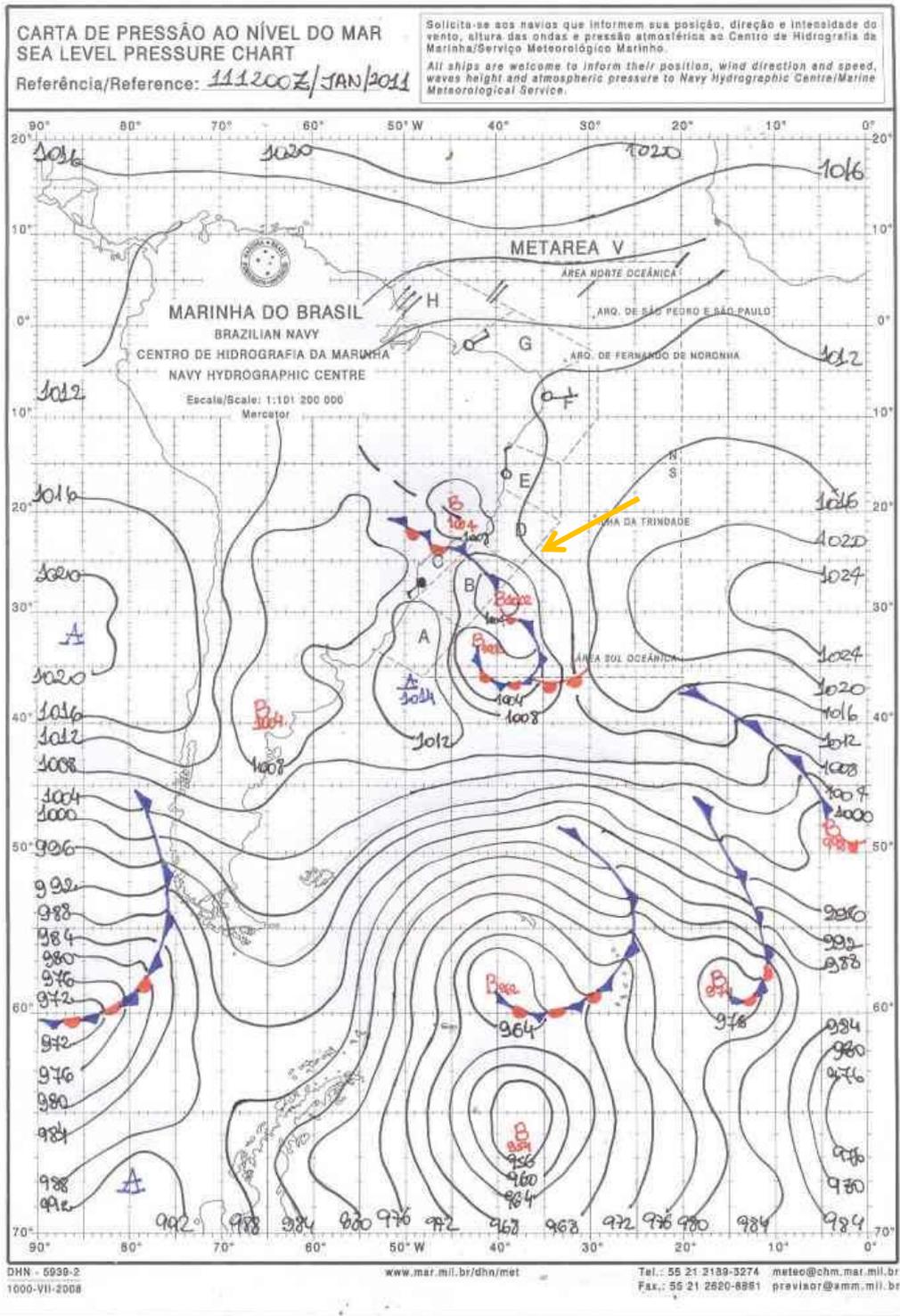


Figura 4.3.2: Imagem infravermelha do GOES-12 – 12 de janeiro de 2011 às 3:00 UTC. Fonte: INPE/CPTEC/DAS NOAA.

(a)



(b)

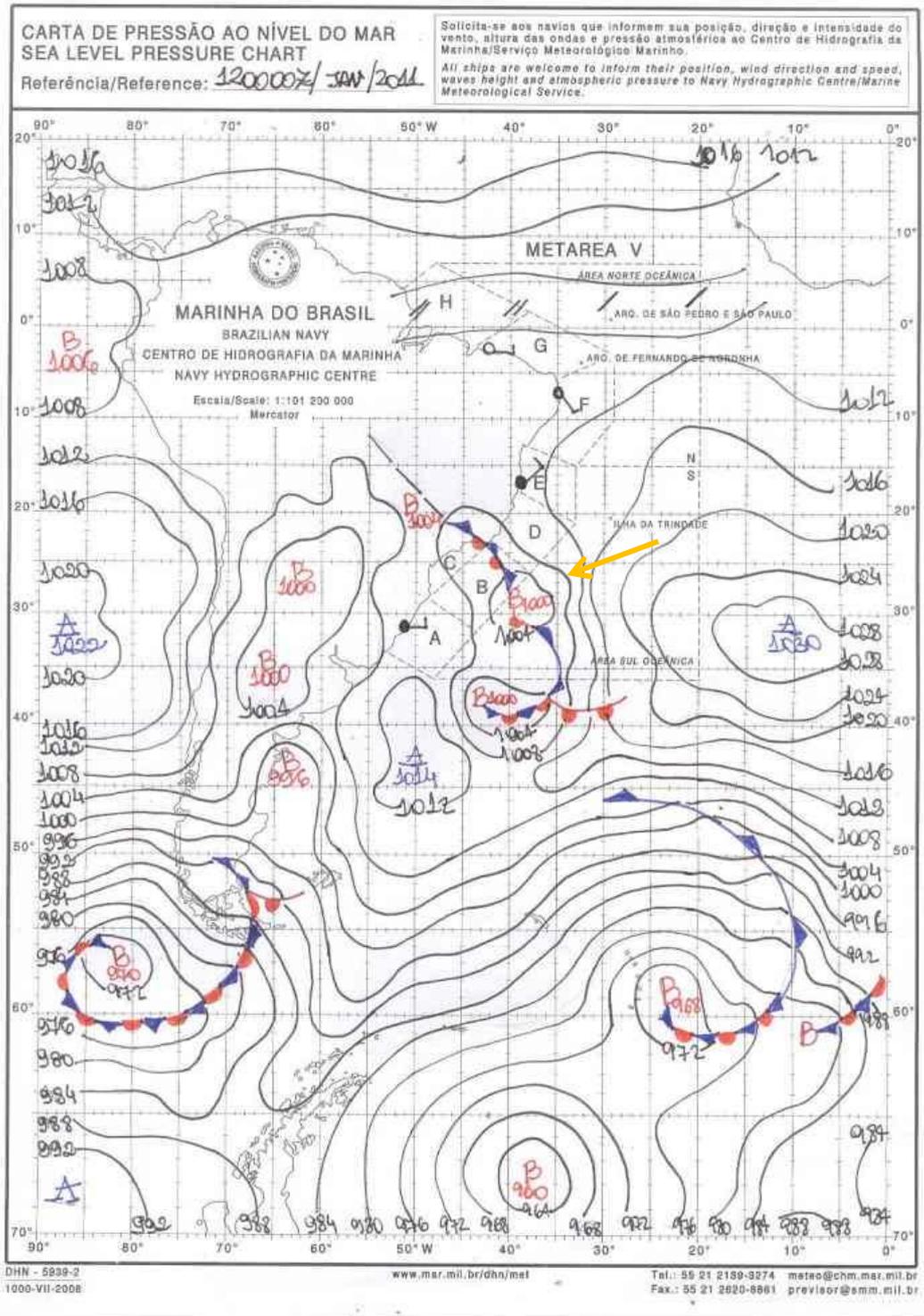


Figura 4.3.3: Cartas de pressão ao nível do mar (a) 11 de janeiro de 2011200Z e (b) 12 de janeiro de 2011 à 00Z.



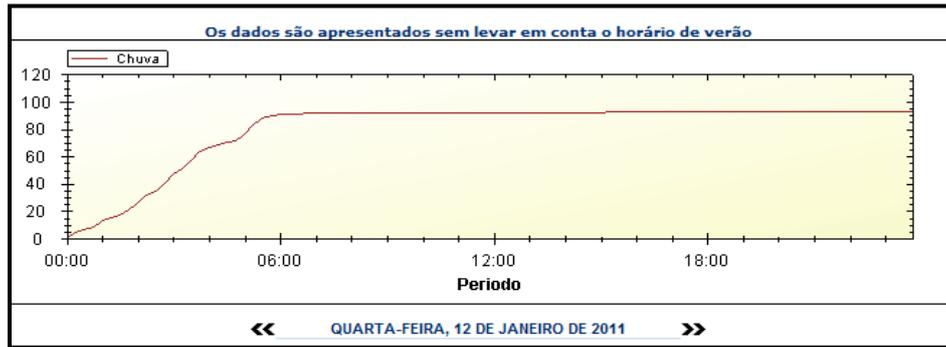


Figura 4.3.6: Chuva observada na estação Nova Friburgo do INEA em 12 de janeiro de 2011.

Fonte: sítio do INEA <http://www.inea.rj.gov.br>

#### 4.3.2. Simulação do Caso Região Serrana com o Modelo WRF por 72 horas

Neste teste, os dados de entrada foram os das análises do NCEP em lugar das previsões. Na figura 4.3.7, a simulação do modelo WRF com relação a variável precipitação acumulada, pode se observar que há um acúmulo expressivo de chuva num período de 72h na Região Serrana com valor máximo em 100mm, onde nota-se claramente que o modelo, quando em simulação capta melhor a precipitação acumulada real.

O campo de precipitação acumulada em 3 dias da figura 4.3.7 obtida através da simulação do modelo WRF, podemos destacar o salto dado devido ao acúmulo de precipitação, pois no dia 11 de janeiro às zero hora o acúmulo de ambas as precipitações (convectiva e microfísica) tem valor 0 mm, e no dia 12 de janeiro no intervalo de doze horas, tal valor atinge 30 mm, demonstrando com isto que o modelo estava captando, ainda que não precisamente, a intensidade do evento. No dia 14 às zero hora verifica-se a precipitação acumulada atingir o valor de 60 mm.

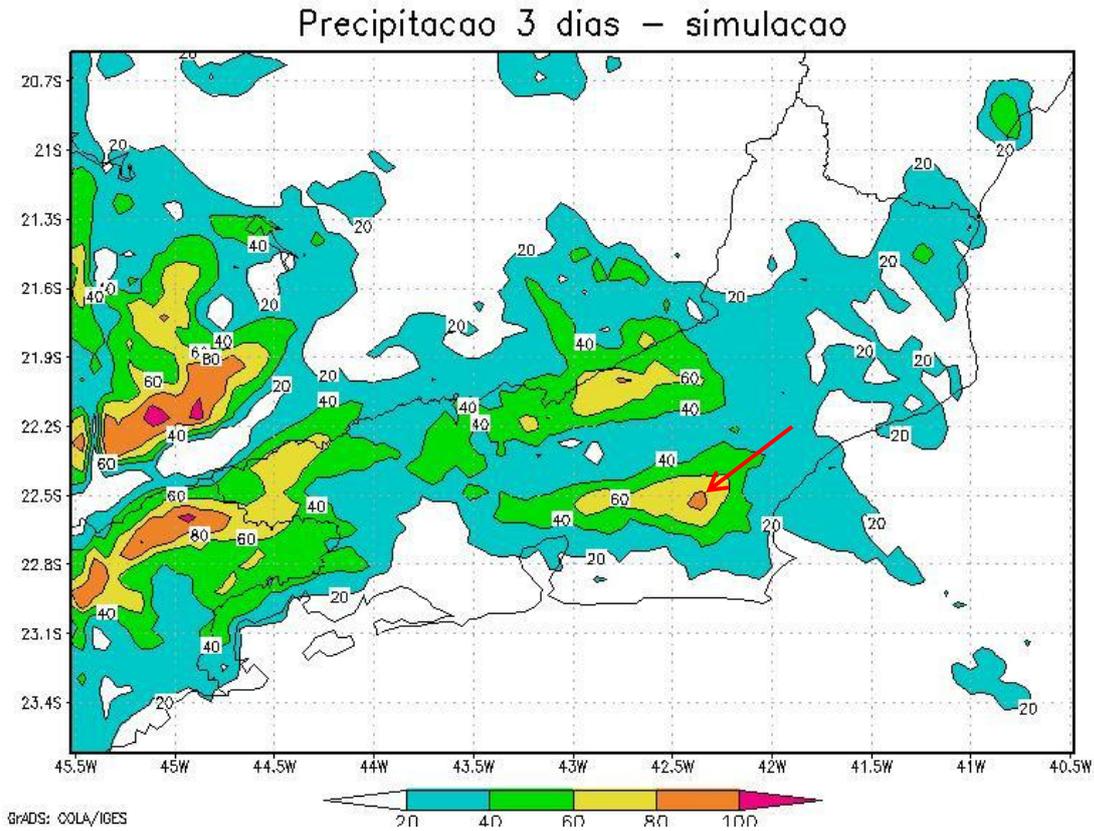


Figura 4.3.7: Simulação de 3 dias de Precipitação. Caso Região Serrana.

Quando se compara os valores dos dados observados, ou seja, os dados da estação de Nova Friburgo do INEA, vide figura 4.3.6, percebe-se que existe uma grande diferença do valor calculado (60 mm em 3 dias) para o observado (100 mm em menos de um dia).

A figura 4.3.8 mostra as séries da precipitação acumulada convectiva e de microfísica. A precipitação acumulada convectiva alcança valores superiores a 60 mm em 72 horas, enquanto que a precipitação por microfísica não apresentou valores relevantes.

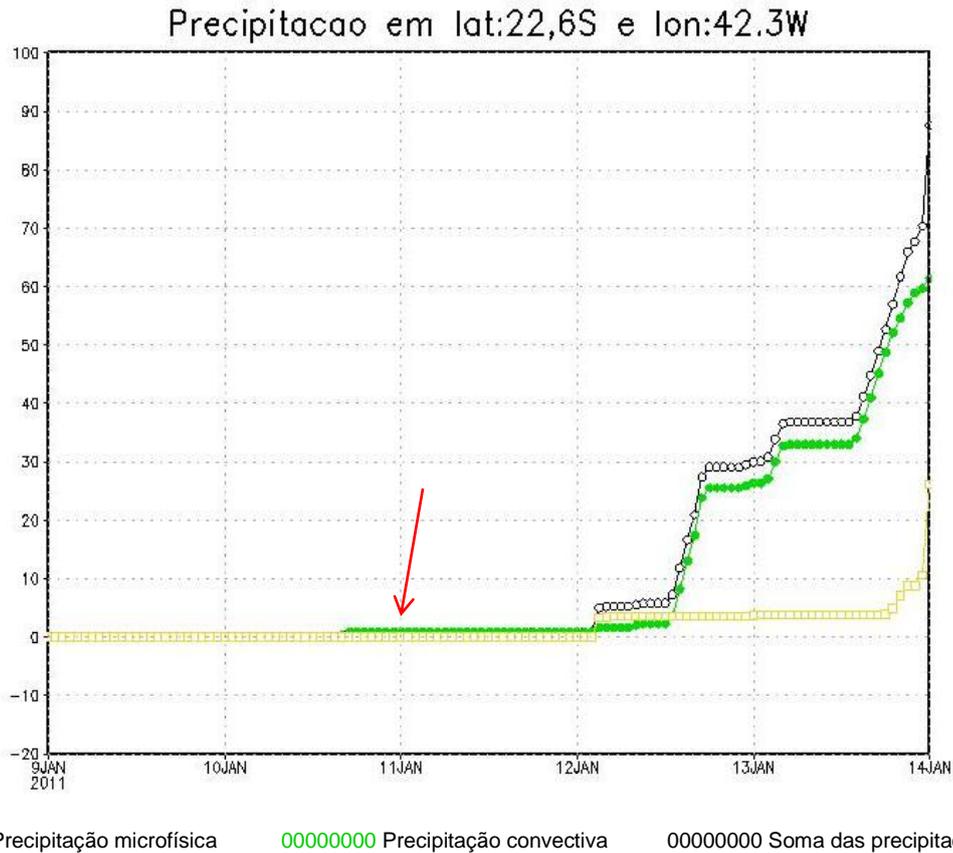


Figura 4.3.8: Precipitação acumulada (simulada) em 72 horas (3 dias) do caso Região Serrana (Nova Friburgo).

Da figura 4.3.9, que é a localização da cidade de Petrópolis, uma das cidades mais atingidas pela catástrofe de 11 de janeiro de 2011, usando a grade de 6 km, pode-se ressaltar a precipitação explícita que no dia 12 de janeiro em torno da 0 hora tem o valor 0 mm e duas horas depois atinge o valor de aproximadamente 8mm. Além disso, a precipitação implícita ou convectiva, embora num intervalo de tempo maior, alcança aproximadamente 17mm em torno das 12 horas no dia em questão. A soma das duas precipitações (explícita e implícita) atinge o valor de 25mm acumulados no final do dia 12. No final do período analisado, no dia 14, embora o modelo subestime o valor de precipitação acumulado real ocorrido, ainda assim, ele consegue mostrar que o evento merecia atenção.

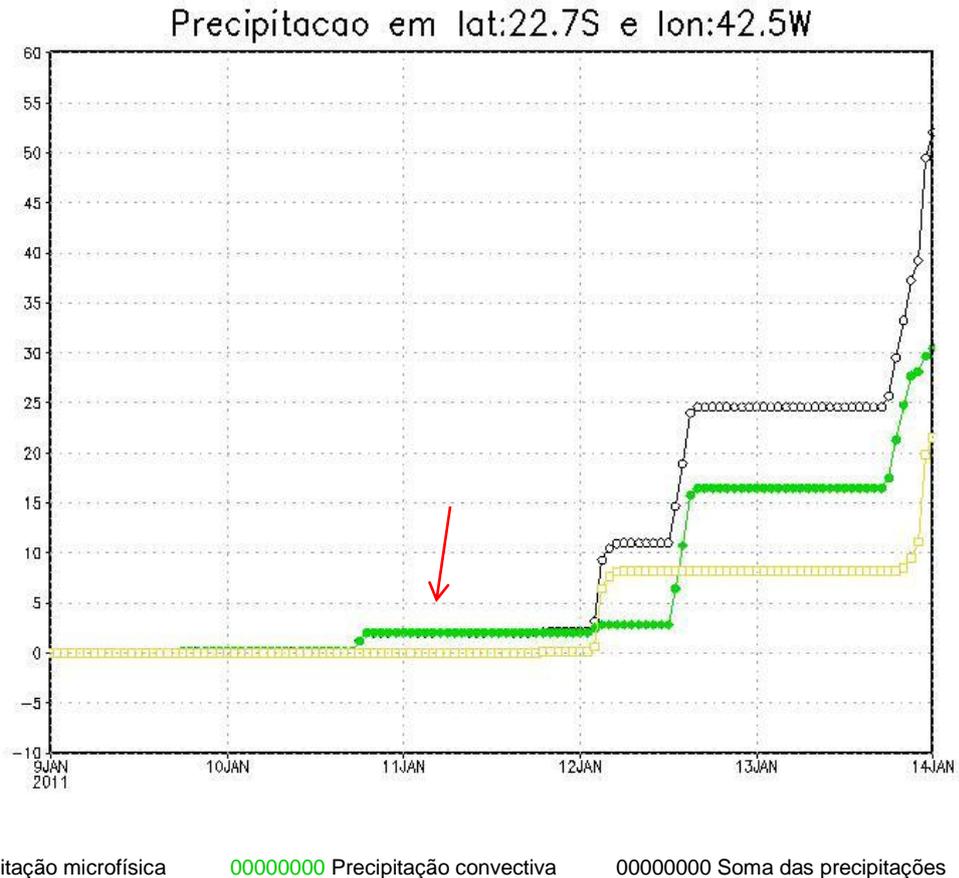


Figura 4.3.9: Precipitação acumulada (simulada) em 72 h (3 dias) do caso Região Serrana (Petrópolis).

Com a intenção de verificar-se qual dos dois tipos de precipitações o modelo WRF captou melhor esse fenômeno, separou-se a precipitação implícita da explícita. Da figura 4.3.10 deve-se destacar o valor máximo de 60 mm de precipitação acumulada convectiva em 72 horas na região serrana, enquanto que na figura 4.3.11 a precipitação acumulada explícita é zero na região em questão, e isto evidencia que o modelo funcionou bem quando se trata de precipitação implícita. Portanto, mais uma vez a resposta do modelo ainda está muito longe dos valores reais de precipitação ocorridos.

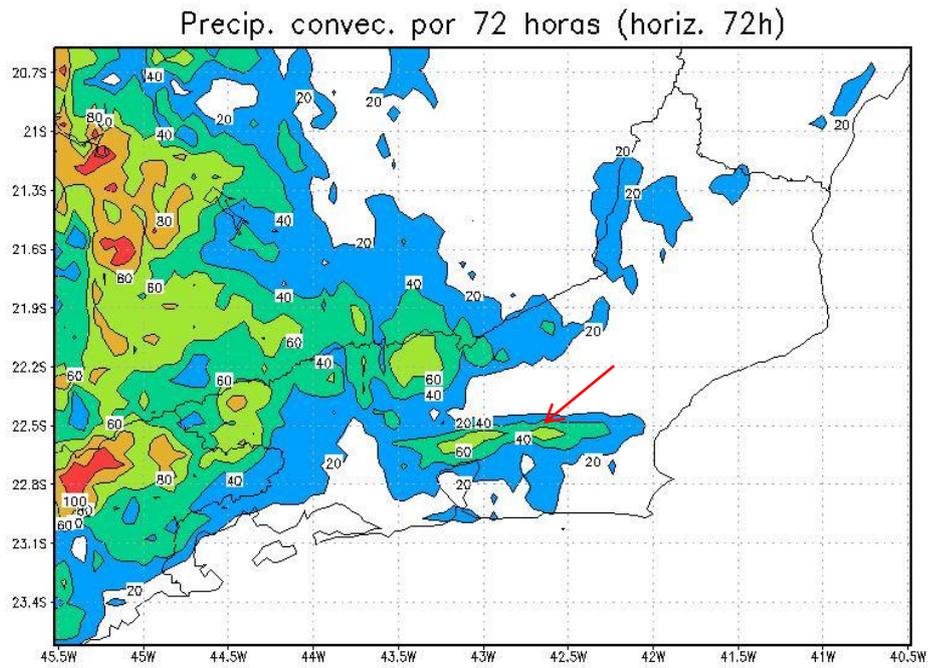


Figura 4.3.10: Precipitação convectiva acumulada num período de 72 horas, num horizonte de 72 horas.

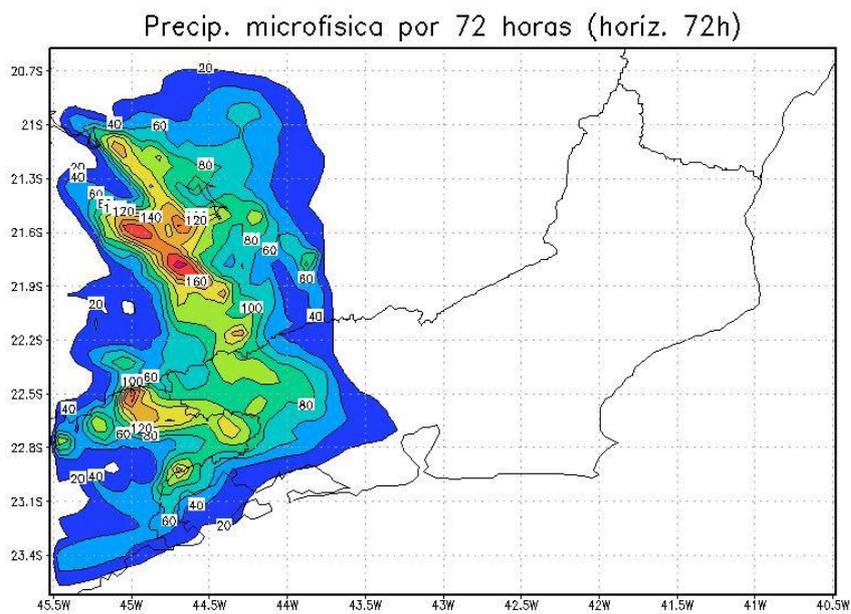


Figura 4.3.11: Precipitação de microfísica acumulada num período de 72 horas, num horizonte de 72 horas.

### 4.3.3. Caso Região Serrana com o Modelo WRF por 96 horas

A figura 4.3.12 é o resultado do teste com um horizonte de 96 horas para se observar como o modelo responde com um solo com eventuais chuvas anteriores. Da figura se extrai que não houve melhoria, ao contrário, a precipitação convectiva acumulada expressou o valor máximo de 20 mm. Por outro lado, a precipitação de microfísica teve um melhora próximo da região em questão, o valor de 20 mm, como se pode verificar na figura 4.3.13.

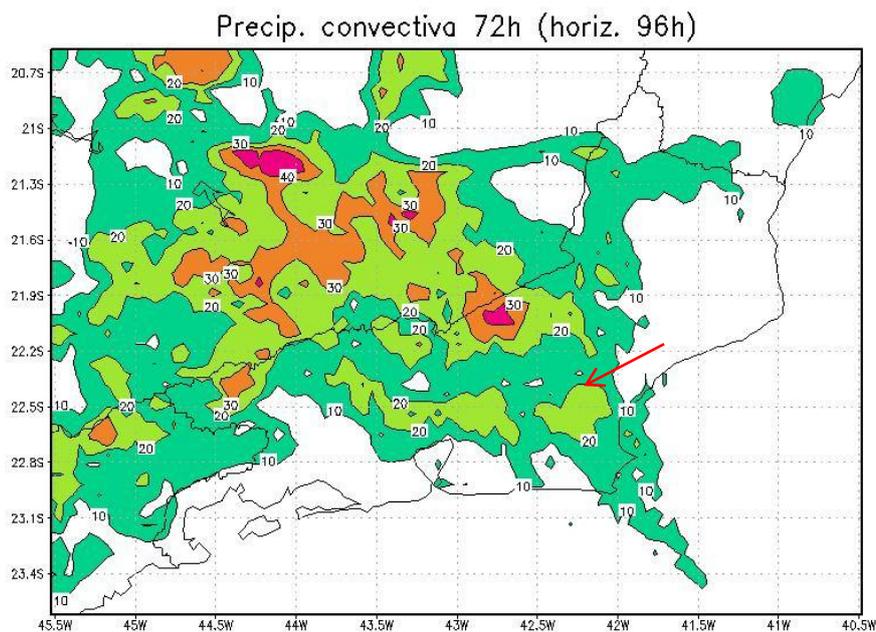


Figura 4.3.12: Precipitação convectiva acumulada por um período de 72 horas, num horizonte de 96 horas.

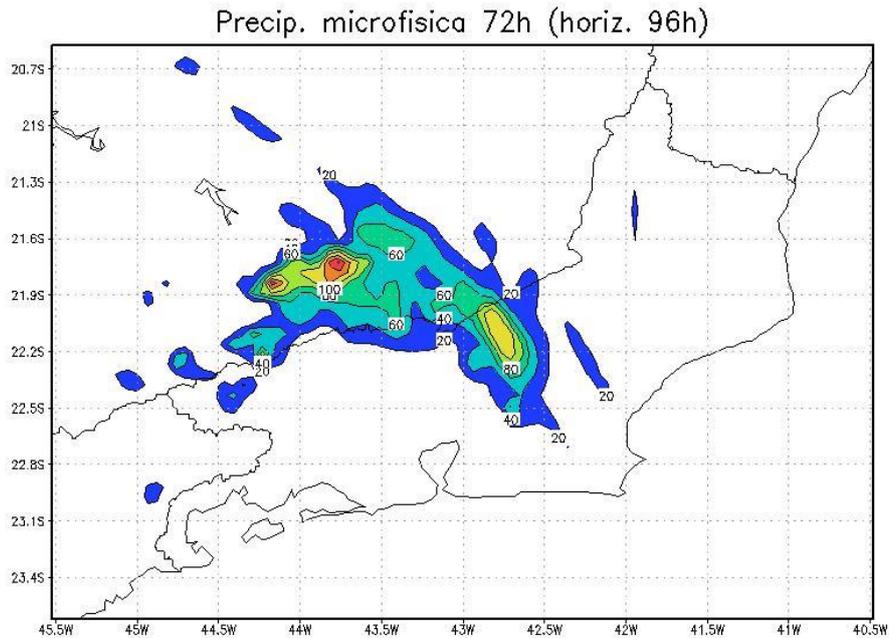


Figura 4.3.13: Precipitação acumulada da microfísica, por um período de 72 horas, num horizonte de 96 horas.

#### 4.3.4. Caso Região Serrana com o Modelo WRF por 120 horas

As figuras 4.3.14 e 4.3.15 são o resultado do teste com um horizonte de 120 horas.

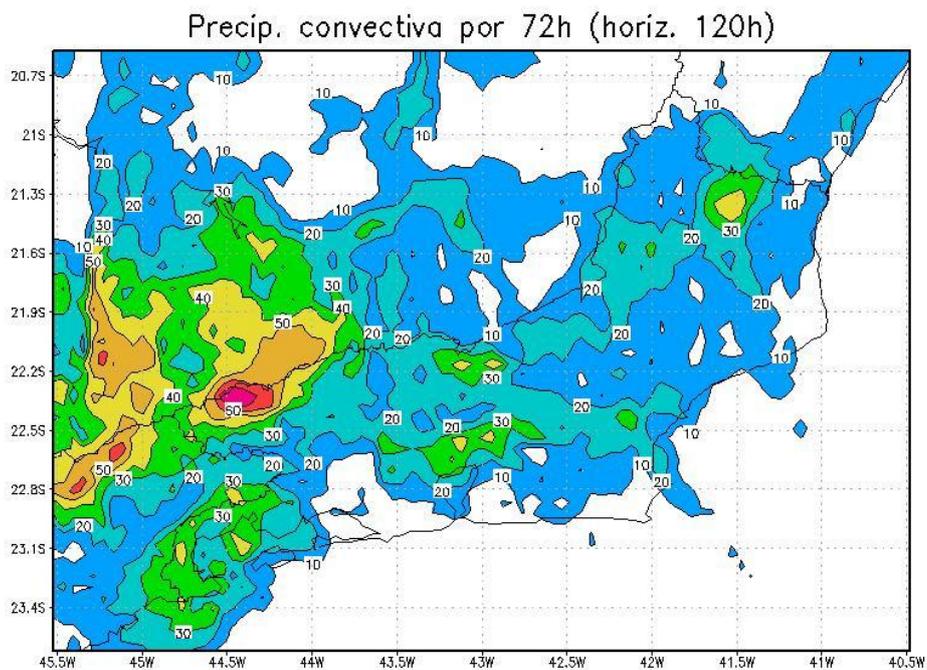


Fig. 4.3.14: Precipitação convectiva acumulada por um período de 72 horas, num horizonte de 120 horas.

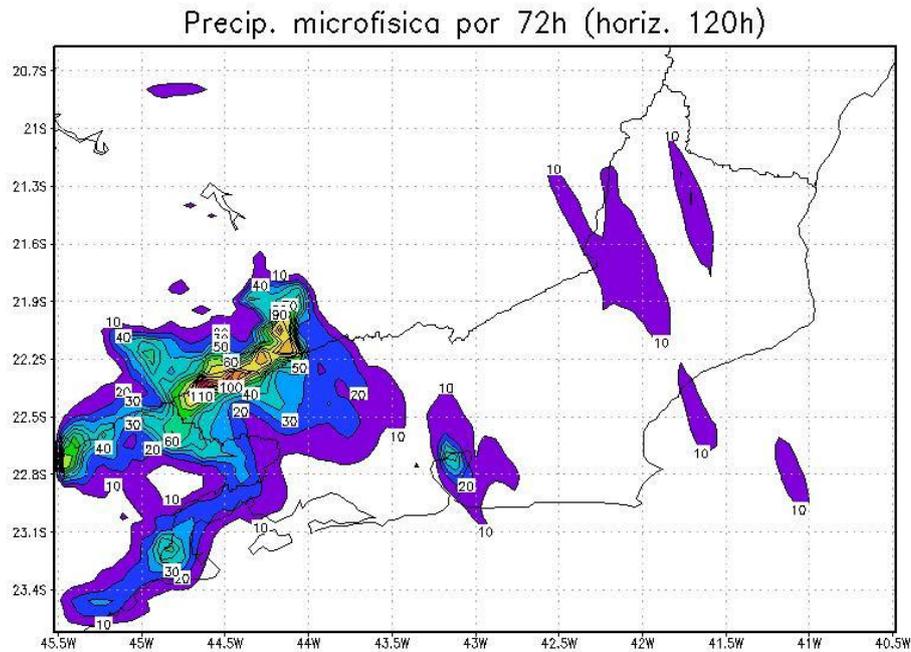


Figura 4.3.15: Precipitação acumulada da microfísica, em 72 horas, num horizonte de 120 horas.

Nestas figuras nota-se que também não houve melhoria, ao contrário, a precipitação convectiva acumulada expressou o valor máximo de 40 mm. Além disso, a precipitação de microfísica também piorou próximo da região em questão, o valor de 10 mm (figura 4.3.14).

#### 4.3.5. Caso Região Serrana com o Modelo WRF por 144 horas

A figura 4.3.16 é o resultado do teste com um horizonte de 144 horas, mais uma vez para se observar como o modelo responde com um solo com eventuais chuvas anteriores. Da figura se extrai que não houve sensível melhoria, ao contrário, a precipitação convectiva acumulada expressou o valor máximo de 30 mm. A precipitação de microfísica também não teve um melhora próximo da região em questão, pois não expressou valor significativo, como se pode verificar na figura 4.3.17.

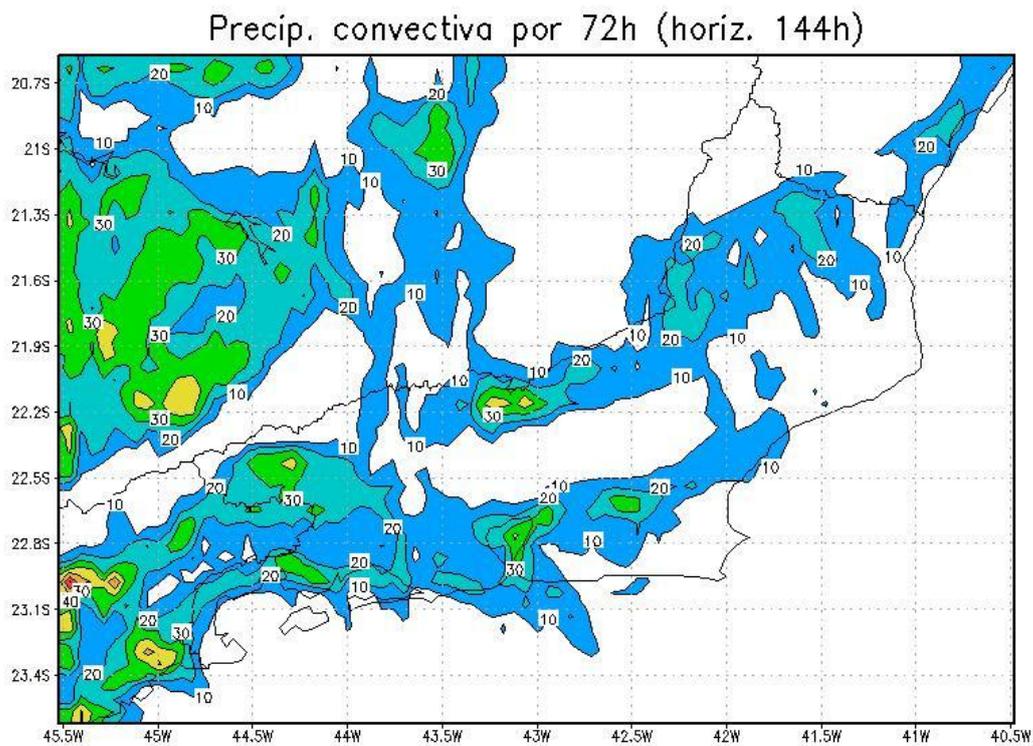
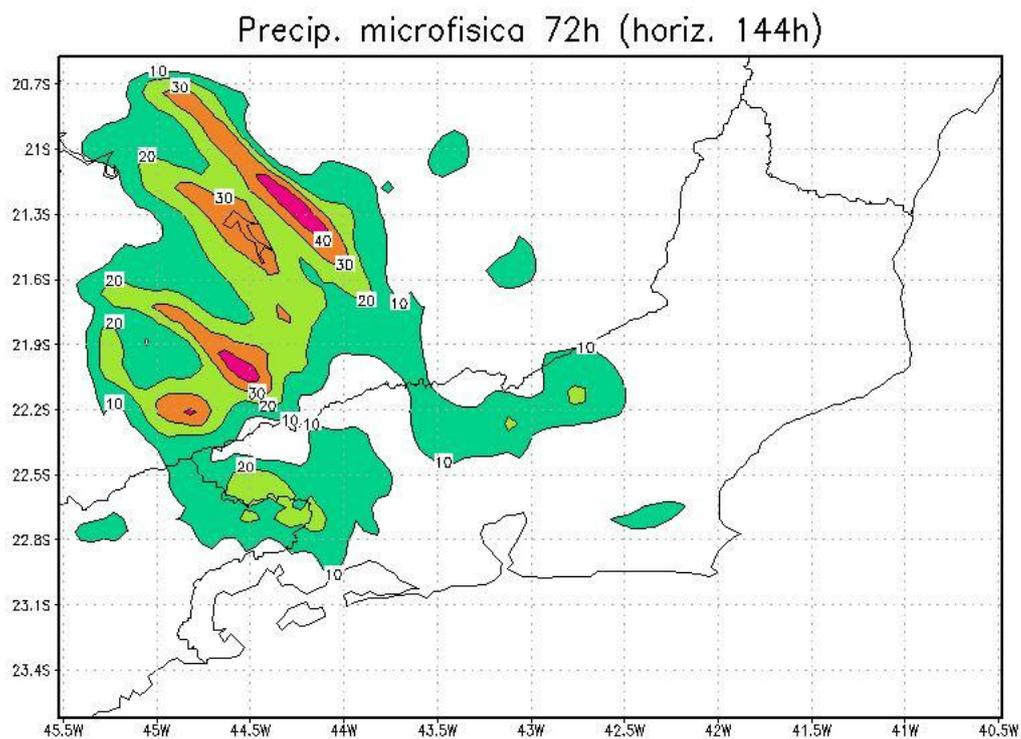


Figura 4.3.16: Precipitação convectiva acumulada por um período de 72 horas, num horizonte de 144 horas.



4.3.17: Precipitação convectiva acumulada por um período de 72 horas, num horizonte de 120 horas.

#### 4.3.6. Previsão com a Microfísica do Esquema de Parametrização de Goddard

A figura 4.3.18 representa a soma da precipitação acumulada convectiva com a precipitação acumulada de microfísica. Nesta figura foi aplicado o esquema parametrização de microfísica de Goddard, classificado como esquema 7 no manual do modelo WRF. Destaca-se o valor superior a 70 mm de precipitação acumulada em 72 horas na região serrana.

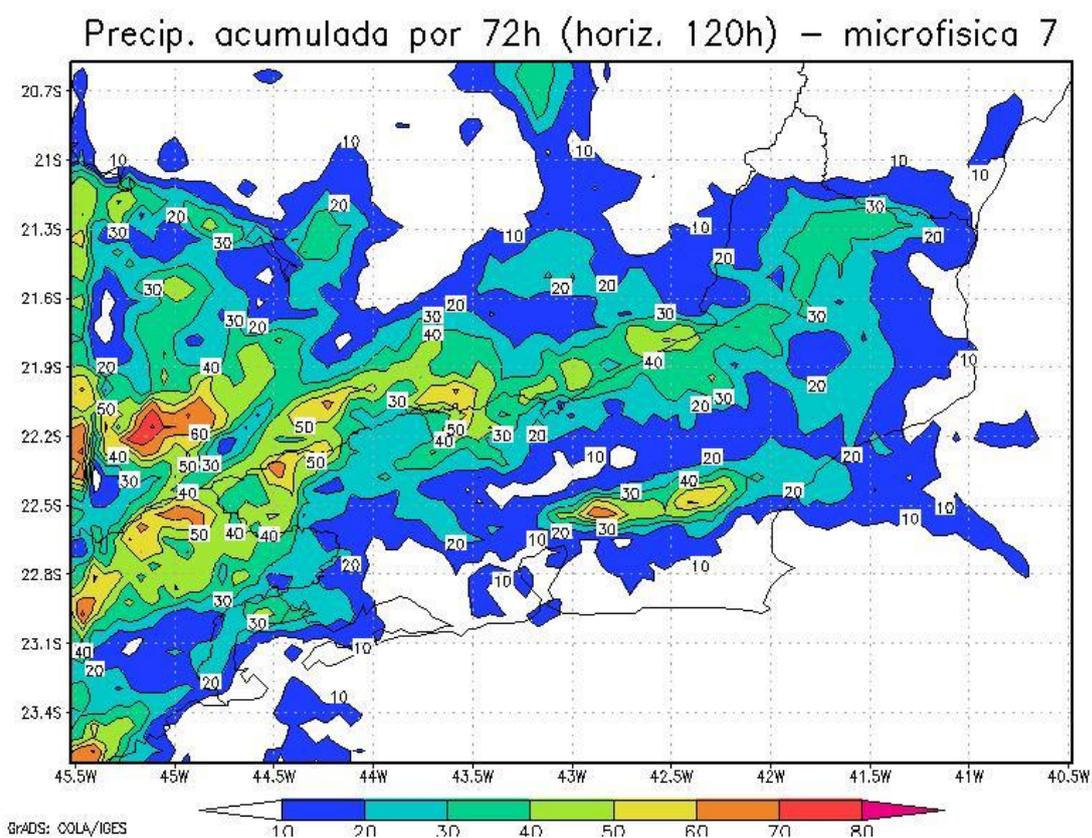


Figura 4.3.18: Precipitação acumulada por microfísica por um período de 72 horas, num horizonte de 120 horas.

Pode-se notar que houve uma resposta melhor quanto a quantidade de precipitação acumulada na Região Serrana ao se comparar esta figura com a soma das figuras 4.3.10 e 4.3.11 precipitação acumulada convectiva e de microfísica respectivamente. Isto se deve provavelmente a mudança de

esquema de parametrização de microfísica. Talvez, este esquema seja mais recomendado para o Estado do Estado do Rio de Janeiro.

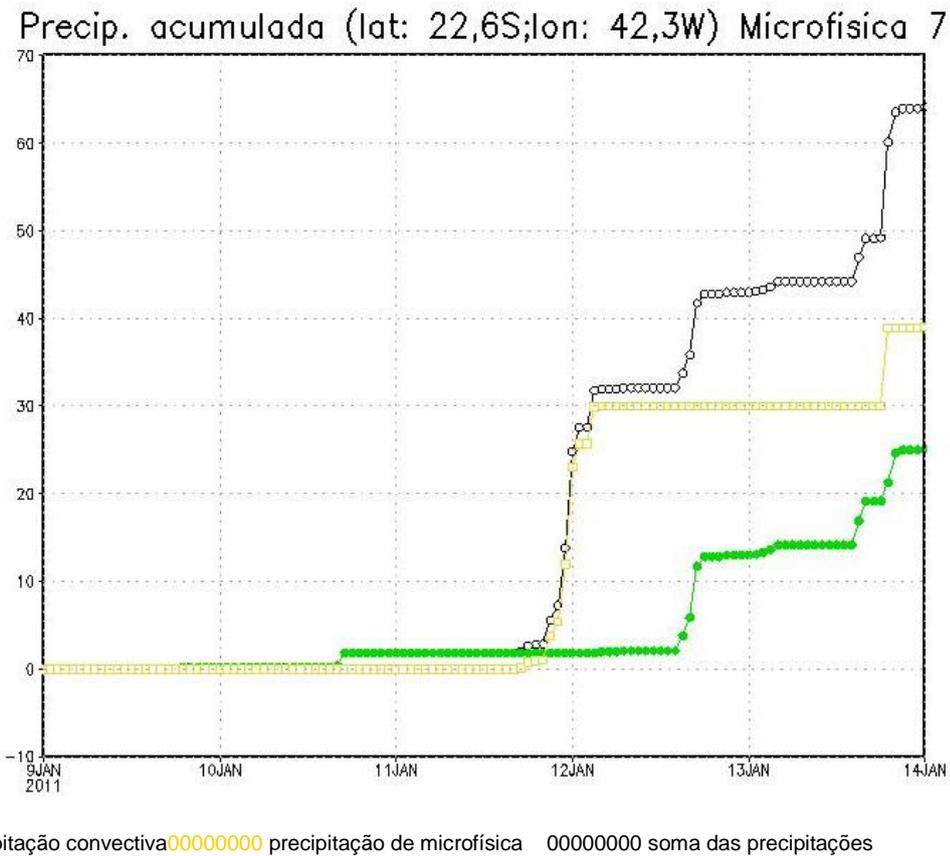


Figura 4.3.19: Precipitação acumulada num período de 72 horas, num horizonte de 72 horas, usando o esquema de microfísica de Goddard.

Na figura 4.3.19 deve-se destacar que a precipitação acumulada por microfísica tem um valor acumulado superior a 25,0 mm no período de interesse enquanto que a precipitação acumulada convectiva não se altera no período em questão. Portanto, este resultado é muito favorável para o modelo WRF.

## 5. Conclusões e Recomendações

O principal objetivo deste estudo é avaliar os resultados que o modelo de previsão atmosférica de alta resolução WRF oferece como ferramenta para a previsão do tempo para o Estado do Rio de Janeiro, e para a Região Metropolitana, mas para alcançar este objetivo, foi feita simulação de eventos de chuvas intensas no Estado do Rio de Janeiro usando o Modelo de previsão numérica WRF. Foram escolhidas grades aninhadas. No primeiro momento, quando foi estudado os Casos Angra dos Reis e Morro do Bumba, foram utilizadas duas grades, a maior com 54 km e a menor 18 km de espaçamento e posicionadas em 43°W e 23°S. No segundo momento, em que foi estudado o Caso Morro do Bumba, foi feito um teste com três grades com espaçamento (18 km, 6 km e 2 km). Neste segundo momento também foi estudado o Caso Região Serrana, foram escolhidas duas grades com espaçamento (18 km e 6 km) e posicionadas no mesmo ponto.

No primeiro momento, a simulação de precipitação acumulada do Caso Angra dos Reis foi testada para um período de 72 horas com horizontes de 72 horas e 144 horas, e estes testes foram comparados com os dados observados de estações meteorológicas da rede pluviométrica do CBMERJ. Além da simulação da precipitação, também foi feita figuras de outras variáveis como, por exemplo, vento, umidade e temperatura.

Ainda no primeiro momento foi realizado testes para o Caso Morro do Bumba. Primeiramente foi feita a simulação de precipitação acumulada para um período de 72 horas com um horizonte de 72 horas. Esta simulação pôde ser comparada com os dados observados de estações do INMET e estações da Fundação GEORIO e da estação Climatológica do Laboratório de Geociências da FFP/UERJ, situada em São Gonçalo. Também para este caso foram feitas figuras para variáveis tais como vento, umidade específica, temperatura entre outras.

No estudo do Caso da Região Serrana, ocorrido no segundo momento, os dados simulados, de precipitação acumulada, pelo modelo foi testado para um período de 72 horas com horizontes de 72, 96, 120 e 144 horas. Estas simulações foram comparadas com dados observados da estação de Nova

Friburgo do INEA, Instituto Estadual do Ambiente, em forma de gráfico, disponíveis no sítio do INEA (Instituto Estadual do Ambiente).

Realizou-se testes em cada caso, com períodos de 72 horas com horizontes de 72, 96, 120 e 144 horas para se observar se estava ocorrendo spinup, e todos os resultados melhores foram os de maior horizonte. Isto nos leva a acreditar que esteja ocorrendo de fato a necessidade de maior tempo para que o modelo WRF dê uma resposta mais próxima dos dados observados reais.

Nos três casos estudados, Caso Angra dos Reis, Caso Morro do Bumba e Caso Região Serrana, a previsão do modelo quanto à aproximação do sistema frontal e/ou afastamento do mesmo para o Estado do Rio de Janeiro foi muito eficiente e satisfatória. Porém, quando foi relevante prever a intensidade da precipitação o modelo WRF subestimou os valores em todos os três casos estudados neste trabalho.

A subestimação da precipitação acumulada foi a motivação para a mudança de esquema de parametrização de microfísica.

Foram testados dois esquemas de parametrização de microfísica (3 e 7), sendo no primeiro momento a parametrização de microfísica 3 e no segundo momento a parametrização de microfísica 7, conforme classificação do manual do WRF.

No segundo momento, no caso Região Serrana, foi possível melhorar o resultado de precipitação acumulada de microfísica e o valor deste resultado se aproximou um pouco do valor real observado, mas levou o tempo de rodada do modelo foi maior, entorno de 37 por cento a mais, talvez operacionalmente não seja eficiente, porque pode onerar o custo da operação ou torna-la inviável.

Apesar do modelo não ter sido suficientemente eficiente na previsão de eventos de chuva intensa, com o tempo, as atualizações conduzirão a este termo.

Sugere-se que sejam feitos outros testes, como por exemplo:

- Outras combinações de esquema de parametrização de microfísica e cúmulos.
- Teste com parametrização de modelos de solo e superfície.
- Teste com 4 grades aninhadas.

- Testes com pacotes de assimilação de dados.
- testes com modelos estatísticos.

## 6. Referencias Bibliográficas

ALBERTO B. SERRA E LEANDRO RATISBONNA. 1957:**O Clima do Rio de Janeiro**, 2ª Edição.

ANTHES, R. A., KUO, Y. H., BENJAMIN, S. E., LI, Y. F. 1982: The evolution of the mesoscale environment of modelling results. . **Mon. Wea. Rev.**, V. 110, p 1187-1213.

ARAKAWA, A.; LAMB, V. R.1977:**Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model**. [S.l.]: Academic Press.

WRF, 2008, **A Description of the Advanced Research WRF v. 3.1**, June 2008.

Barker, D. M., W. Huang, Y-R.Guo, A. Bourgeois, and X. N. Xiao, 2004: A Three-Dimensional Variational Data Assimilation System from MM5: Implementation and Initial Results. **Mon. Wea. Rev.**, V. 132, 897-914.

CHANG, S. W. The orographic effects induced by an island mountain range on propagating tropical cyclones. *Monthly Weather Review*, v.110, p. 1255-1270, 1982.

CHEN, S.-H.; SUN, W.-Y. 2002: A One-dimensional Time Dependent cloud Model.J. **Meteor.Soc. Japan**, V. 80, p. 99-118.

DERECZYNSKI, C. P et al. 2009: Climatologia da Precipitação no Município do Rio de Janeiro, **Ver. Bras. De Meteor**, V. 24, p. 24-38.

DUDHIA, J., 1989: Numerical Study of Convection Observed During the Winter Monsoon Experiment using a Mesoscale Two-dimensional Model, **J. Atmos. Sci.**, V. 46, 3077–3107.

Ferreira, A. P. G. F. 2007. Estágio em Meteorologia e Oceanografia Física. Sensibilidade às parametrizações físicas do WRF nas previsões à Superfície em Portugal Continental. **Departamento de Física, Universidade de Aveiro**, 125p.

FURNAS, 2007: **Relatório de Furnas Modelo WRF v.2.0**. Agosto de 2007.

GANGULY, A. R. , BRAS, R. L. 2000: Distributed quantitative precipitation forecasting using information from radar and numerical weather prediction models. **Journal of Hydrometeorology**.P 1168, 1180.

GRELL, G. A.; DEVENYI, D.2002: A Generalized Approach to Parameterizing Convection Combining Ensemble and Data Assimilation Techniques .**GeophysRes. Lett.**, V. 29(14), p. 1693.

GRELL, G. A.; DUDHIA, J.; STAUFFER, D. R. 1994: A description of the fifth generation Penn State/ **NCAR mesoscale model (MM5)**.|S. I. |.

HOLTON, J. R.2004:**An Introduction to Dynamic Meteorology**, 4<sup>th</sup> edition. .

INPE/CPTEC: **Estudos da Previsibilidade de Eventos Meteorológicos Extremos na Serra do Mar**. Relatório Final. Período: 01/09/2005 a 30/08/2009 – Processo n°: 04/09469-0.

JACOBSON, M. Z. Fundamentals of Atmospheric Modeling. IS.I.I: Cambridge Univ. Press, 1999.

JANJIC, Z. I. 2000; Comments on "Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models". **J. Atmos. Sci.**, V. 57, p. 3686.

KAIN, J. S.; FRITSCH, J. M. 1993; Convective Parametrization for Mesoscale models: The Kain-Fritsch Scheme. the Representation of Cumulus Convection in Numerical Models, meteor. monogr. **Amer. Meteor. Soc.**, V. 46, p. 246.

KESSLER, E. 1969: On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulation. **Amer. Meteor. Soc.**, V. 32, p. 84.

KAIN, J. S.; FRITSCH, J. M. 1993: Convective parametrization for mesoscale models: Thekain-fritsch scheme. the representation of cumulus convection in numerical models, meteor. monogr. **Amer. Meteor. Soc.**, V. 46, p. 246.

KUO, Y., REED, R. 1988: Numerical simulation of explosively deepening cyclone in the eastern pacific. . **Mon. Wea. Rev.**, V.116, p. 2081 – 2105.

LEE, D., HONG, S. 1989: Numerical experiments of the heavy rainfall event that occurred over korea during 1-3 september. **J.of Korean Meteor. Soc.**, V. 25, p. 233 – 260.

LIEBMANN, B; KILADIS, G. N.; MARENGO, J. A.; AMBRIZZI, T.; GLICK, J. D. Submonthly convective variability over South America and the South Atlantic convergence zone. **J. Climate**, 12, p. 1977-1991, 1999.

LUMB, P., 1975, Slope Failures in Hong Kong. **Quarterly Journal of Engineering Geology**, v. 8, pp. 3165.

MENEZES, W. F.; DE LIMA, D. R. O.; COELHO, D.G. 1994; Eventos de chuvas intensas sobre a bacia do rio paraíba do sul: aspectos observacionais e numéricos do caso de dezembro de 1994.

MOLINARI, J., DUDEK, M. 1991: Parameterization of Convective Precipitation in Mesoscale Numerical Models: A Critical Review. . **Mon. Wea. Rev.**, V. 120, p 326 – 344.

MOURÃO, C.; 2010; Estudo Numérico da Produção de Chuvas Intensas na Região da Serra Do Mar Paulista. CPTEC/INPE.

NEBEKER, F. Calculating the Weather: Meteorology in the 20th Century. IS.I.I: Academic Press, 1995.

OLIVEIRA, A.C., 2006: **Implementação do Modelo Atmosférico WRF acoplado com o Modelo Hidrológico Top Model para a Bacia de União Vitória**. Dissertação ( Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, 87p.

PALLOTA, M.; 2010; Caracterização de Episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e Zona de Convergência de Umidade (ZCOU) em Janeiro e Fevereiro de 2010.

ORLANSKI, I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. **Bulletin de American Meteorology Society**, v. 56, 1975.

SATYAMURTI, P, NOBRE, C.; SILVA DIAS, P.L. South America Meteorology of the Southern Hemisphere, D. J. Karoly and D. G. Vicent, Eds., **Amer. Meteor. Soc.**, p. 119-139, 1998.

SILVA, M. P. R.; 2006: Modelagem numérica dos processos de remoção úmida de poluentes atmosféricos: estudo de caso para a região amazônica (Rondônia).

SOARES, E. P.; 2006; Caracterização da Precipitação na Região de Angra dos Reis e a sua Relação com a Ocorrência de Deslizamentos de Encostas.

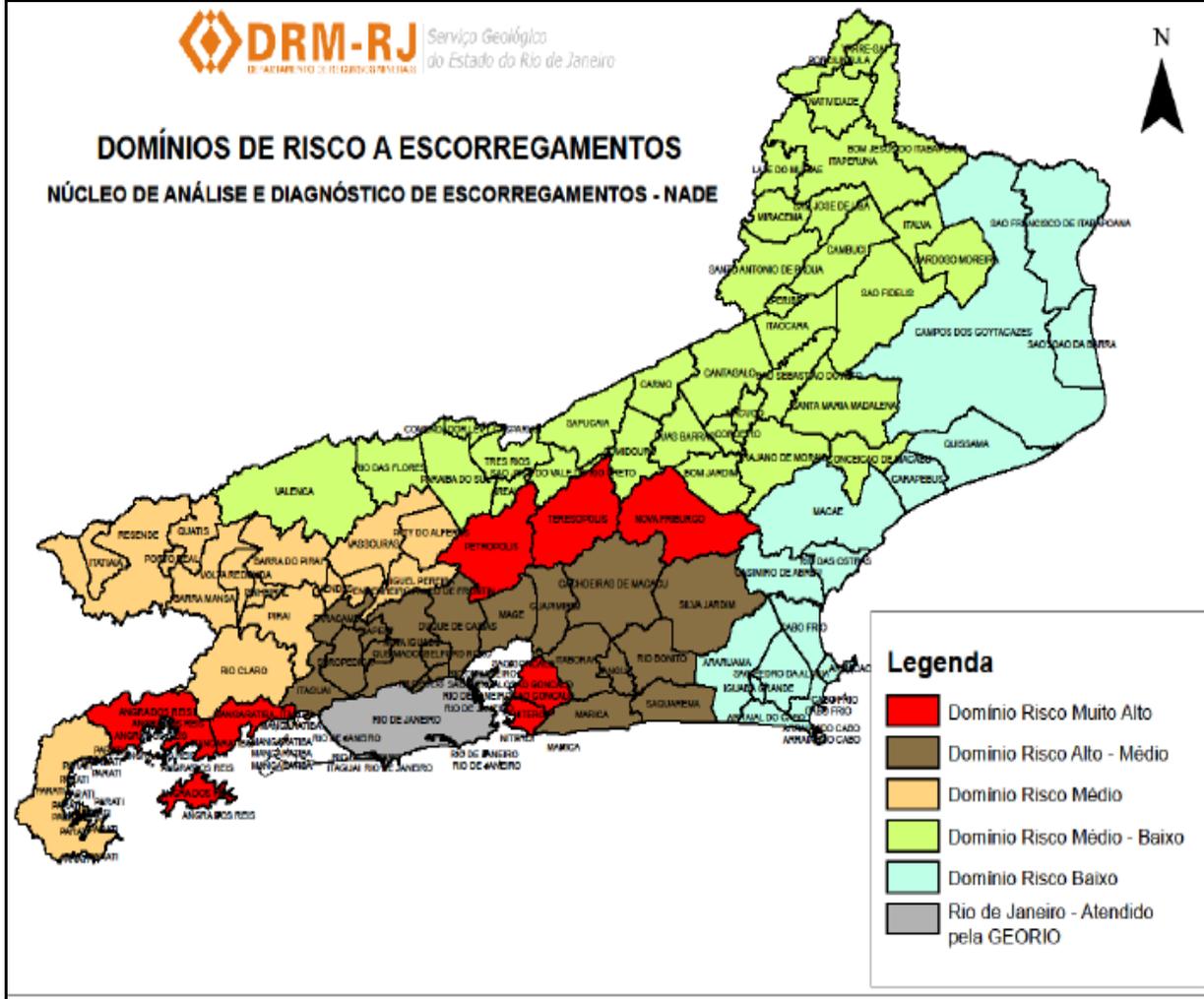
TATIZANA, C., OGURA, A.T., CERRI, L.E.S. e ROCHA, M.C.M., 1987a, Análise de Correlação entre Chuvas e Deslizamentos – Serra do Mar – Município de Cubatão. In: **Anais do 5º Congresso Brasileiro de Geologia e Engenharia**, v. 2 , pp. 225-236, São Paulo , Out. .

TATIZANA, C., OGURA, A.T., CERRI, L.E.S. e ROCHA, M.C.M., 1987b, Modelamento Numérico da Análise de Correlação entre Chuvas e Deslizamentos aplicados à Encosta da Serra do Mar. In: **Anais do 5º Congresso Brasileiro de Geologia e Engenharia**, v. 2 , pp. 237-248 São Paulo, Out. .

THOMPSON, G.; RASMUSSEN, R. M.; MANNING, K. 2004: Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme.partI: Description and Sensitivity Analysis. **Mon. Wea. Rev.**, V. 132, p. 519-542.

ZHANG, D. L., FRITSCH, J. M. 1982: A case study of the sensitivity of numerical simulation of mesoscale convective systems to varying initial conditions.. **Mon. Wea. Rev.**, V.114, p.2418 - 2431

**DOMÍNIOS DE RISCO A ESCORREGAMENTOS**  
**NÚCLEO DE ANÁLISE E DIAGNÓSTICO DE ESCORREGAMENTOS - NADE**



# Apêndice A

## A. O Modelo WRF

O WRF (Weather Research and Forecast) é um sistema de modelagem numérica da atmosfera orientado para a pesquisa dos fenômenos atmosféricos de microescala e de mesoescala e para a previsão do tempo em mesoescala. Este sistema está sendo desenvolvido como esforço de colaboração entre os centros de investigação e agências governamentais americanos Mesoscale and Microscale Meteorology (MMM), uma divisão do National Center for Atmospheric Research (NCAR), os National Centers for Environmental Prediction (NCEP) e o Forecast System Laboratory (FSL) da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), a Air Force Weather Agency (AFWA) e o Naval Research Laboratory (NRL), tutelados pelo US Department of Defense, o Center of Analysis and Prediction of Storms (CAPS), sediado na Universidade de Oklahoma, e a Federal Aviation Administration (FAA). O WRF conta ainda em seu desenvolvimento com a participação de cientistas de várias Universidades. O WRF foi concebido para ser uma ferramenta de topo na arte de simulação atmosférica, flexível, portátil, e eficiente em variadas plataformas de computação.

O modelo atende tanto situações atmosféricas idealizadas como situações reais, em escalas horizontais que podem ir desde alguns metros até milhares de quilômetros. O WRF tem aplicações como, por exemplo, em simulações idealizadas (convecção, ondas baroclínicas, ondas de gravidade, etc), pesquisa de parametrização, pesquisa de assimilação de dados, pesquisa em previsão do tempo, acoplamento entre modelos de diferentes aplicações (tempo-ondas, tempo-poluição, etc.) e em ensino.

A vertente de previsão operacional do tempo, no mesmo diapasão de modelos de mesoescala mais antigos como o MM5, tem crescido muito pelo impacto que tem nas atividades humanas. As simulações operacionais com o WRF sobre o continente dos EUA e na Europa, iniciadas em abril de 2004, nos mostram que este modelo tem enormes potencialidades práticas.

Nas últimas décadas tem ocorrido no campo da previsão meteorológica de mesoescala uma verdadeira revolução. Diversos grupos realizam simulações em tempo real, com diferentes modelos nos mais variados lugares do mundo. Uma explicação para isto pode ser, por exemplo, a crescente acessibilidade em tempo real dos dados das grades de análise e reanálise de previsão saídos do NCEP.

O âmago de qualquer modelo numérico de simulação hidrodinâmica consiste na formulação das equações dinâmicas apropriadas juntamente com as técnicas empregadas na resolução das mesmas. O Sistema de modelagem WRF possui dois cerne dinâmicos distintos: ARW (Advanced Research WRF) e NMM (Nonhydrostatic Meso-scale Model). Ambos são formulações avançadas de modelos anteriores. O NMM é um modelo não hidrostático desenvolvido pelo NCEP a partir do modelo operacional hidrostático ETA; o ARW utiliza o esquema do modelo de nuvens de Klemp-Whilhelmson (Skamarock, 2005).

Para maiores informações sobre o modelo WRF, suas versões, opções e fóruns de discussão recomenda-se o sítio do manual do usuário do modelo (<http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users>) e a página principal do projeto WRF (<http://www.wrf-model.org>).

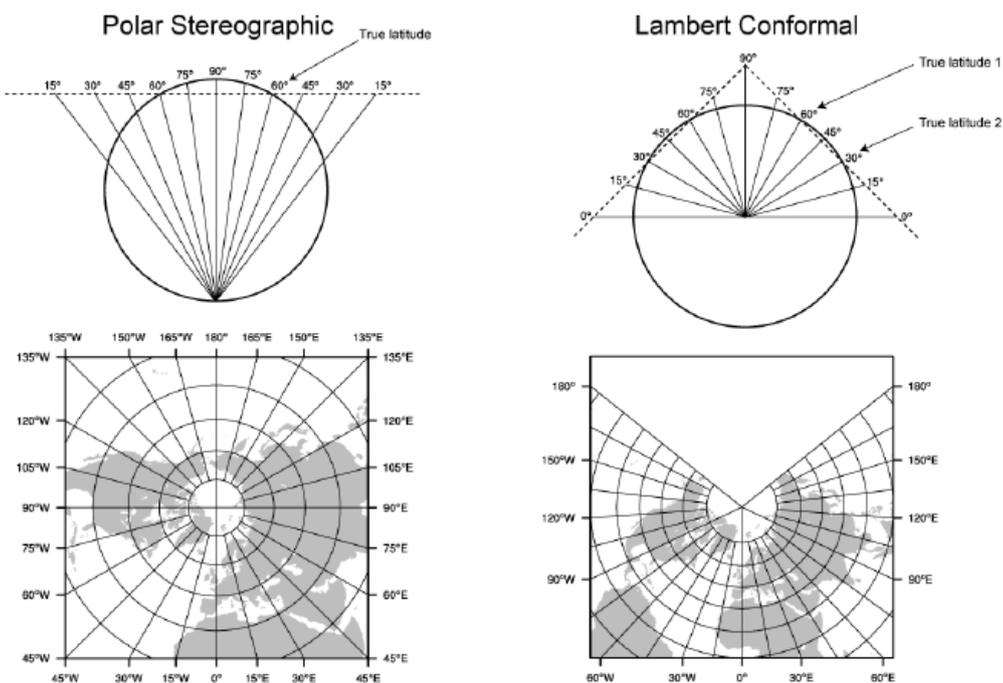
## **A.1 Estrutura das Grades do Modelo**

O domínio de simulação significa que seja delimitado espaço físico representando-o por uma malha tridimensional na área de cálculo. No WRF, cada nível vertical é definido por um valor discreto da coordenada sigma ( $\sigma = (P - P_{top}) / (P_{sup} - P_{sup})$ ), definida em relação à componente hidrostática de pressão, proporcional à massa da coluna de ar que se estende do nível dado até a fronteira superior do modelo, dividida pela massa em toda a coluna. Junto ao solo, as superfícies seguem o declive do terreno. Cada superfície de mesmo sigma é recortada numa rede retangular horizontal, definida no plano de uma projeção cartográfica. O WRF utiliza quatro projeções (Lambert, Mercator, polar

estereográfica e latitude/longitude regular ou equidistância cilíndrica). Vide quadro A.1 e figura A.1.

Quadro A.1: Resumo das projeções cartográficas do modelo WRF

Projeção do Mapa/valor do map_proj	Parâmetros da projeção
Conforme de Lambert / 'lambert'	truelat1 truelat2(opcional) stand_lon
Mercator / 'mercator'	truelat1
Estereográfica Polar / 'polar'	truelat1 stand_lon
Latitude-longitude Regular ou Equidistante cilíndrica / 'lat - lon'	pole_lat pole_lon stand_lon



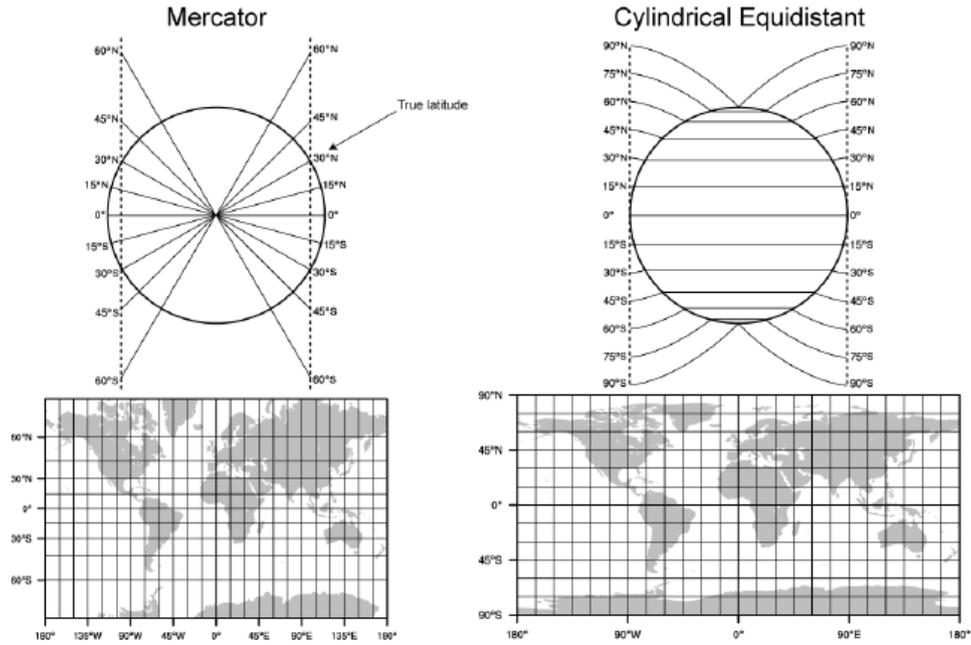


Figura A.1: Projeções Cartográficas do modelo WRF.

O espaçamento da grade e o número de nós definem as dimensões. A posição da grade no globo terrestre pode ser definida pelas coordenadas latitude e longitude correspondente ao centro geométrico ou a qualquer outro ponto escolhido. A orientação precisa do domínio define-se pelo meridiano que deve ficar alinhado com o eixo y e em uma dada posição x da rede.

## A.2 Coordenadas Verticais

O sistema de coordenadas verticais utilizado pelo WRF é denominado  $\eta$ . Entretanto, não é o mesmo sistema  $\eta$  que utiliza o nível médio do mar como base, e sim uma modificação do sistema  $\eta$ . As equações do WRF são formuladas empregando a coordenada vertical  $\sigma$ , representada na Figura A.2 é definida como:

$$\eta = \frac{(p_h - p_{ht})}{\mu}$$

onde  $\mu = p_{hs} - p_{ht}$ ,  $p_h$  é a componente hidrostática da pressão,  $p_{ht}$  é o valor no topo e  $p_{hs}$  corresponde ao valor da pressão na superfície.

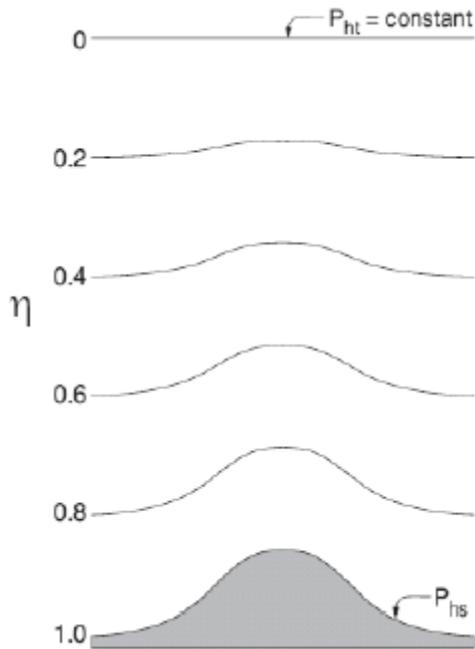


Figura A.2: Sistema  $\eta$  de coordenadas verticais.

### A.3 Equações Governantes

Todos os cálculos executados pelo WRF a fim de simular as condições da atmosfera são baseados em um conjunto de equações que descrevem o comportamento da atmosfera. Os sistemas de equações diferenciais parciais por elas compostas não podem ser resolvidos analiticamente, a menos que várias aproximações sejam feitas. Entretanto, com essas aproximações a capacidade de representar fenômenos reais é praticamente nula. As equações são definidas na forma diferencial como:

Equações que representam a conservação da quantidade de movimento

$$\partial_t U + (\nabla \cdot \mathbf{V}u) - \partial_x(p\phi_\eta) + \partial_x(p\phi_x) = F_U \quad (\text{A.3.1})$$

$$\partial_t V + (\nabla \cdot \mathbf{V}v) - \partial_y(p\phi_\eta) + \partial_y(p\phi_y) = F_V \quad (\text{A.3.2})$$

$$\partial_t W + (\nabla \cdot \mathbf{V}W) - g(\partial_\eta p - \mu) = F_W \quad (\text{A.3.3})$$

Equação que representa a conservação de energia termodinâmica

$$\partial_t \Theta + (\nabla \cdot \mathbf{V}\theta) = F_\Theta \quad (\text{A.3.4})$$

Equação que representa a conservação de massa

$$\partial_t \mu + (\nabla \cdot \mathbf{V}) = 0 \quad (\text{A.3.5})$$

Equação que representa a Equação Geopotencial

$$\partial_t \phi + \mu^{-1} [(\mathbf{V} \cdot \phi) - gW] = 0 \quad (\text{A.3.6})$$

$$\partial_\eta \phi = -\alpha \mu \quad (\text{A.3.7})$$

Equação que representa o estado termodinâmico

$$p = p_0 \left( \frac{R_d \theta}{p_0 \alpha} \right)^\gamma \quad (\text{A.3.8})$$

Onde  $\mathbf{v} = (u, v, w)$ ,  $\theta$  é a temperatura potencial,  $\phi = gz$  é o geopotencial,  $p$  é a pressão,  $\alpha = \frac{1}{\rho}$  é o inverso da densidade,  $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ ,  $R_d$  é a constante do gás para o ar seco,  $p_0$  é a pressão á superfície de referência,  $\mathbf{V} = \mu \mathbf{v} = (U, V, W)$ ,  $\Omega = \mu \dot{\eta}$  e  $\Theta = \mu \theta$ ,  $F_U$ ,  $F_V$ ,  $F_W$  e  $F_\Theta$  representam os termos forçantes devido à física do modelo, mistura turbulenta, projeções esféricas e a rotação da Terra. Entretanto, na forma apresentada acima, as equações são aplicáveis apenas para situações idealizadas. O sistema realmente utilizado no WRF possui termos que levam em conta o efeito da força de Coriolis, umidade do ar e a

projeção cartográfica que está sendo utilizada. Além disso, as equações diferenciais parciais possuem variáveis de perturbação, pois isso diminui os erros de truncamento e arredondamento no cálculo do gradiente de pressão horizontal e vertical, respectivamente. Essas novas variáveis (denotadas por  $a'$ ) representam desvios em termos que estão hidrostaticamente balanceados (denotados por  $\bar{a}$ ). Basicamente a nova representação para uma variável qualquer é  $a = \bar{a} + a'$ . A forma final das equações é:

$$\begin{aligned} \partial_t U + m[\partial_x(Uu) + \partial_y(Vu)] + \partial_\eta(\Omega u) + (\mu_d \alpha \partial_x p' + \mu_d \alpha' \partial_x \bar{p}) \\ + \left(\frac{\alpha}{\alpha_d}\right)(\mu_d \partial_x \phi' + \partial_\eta p' \partial_x \phi - \mu_d' \partial_x \phi) = F_U \end{aligned} \quad (\text{A.3.9})$$

$$\begin{aligned} \partial_t V + m[\partial_x(Uv) + \partial_y(Vv)] + \partial_\eta(\Omega v) + (\mu_d \alpha \partial_y p' + \mu_d \alpha' \partial_y \bar{p}) \\ + \left(\frac{\alpha}{\alpha_d}\right)(\mu_d \partial_y \phi' + \partial_\eta p' \partial_y \phi - \mu_d' \partial_y \phi) = F_V \end{aligned} \quad (\text{A.3.10})$$

$$\begin{aligned} \partial_t W + m[\partial_x(U_w) + \partial_y(V_w)] + \partial_\eta(\Omega_w) \\ - m^{-1} g \left(\frac{\alpha}{\alpha_d}\right) [\partial_\eta p' - \bar{\mu}_d (q_v + q_c + q_r)] + m^{-1} \mu_d' g = F_W \end{aligned} \quad (\text{A.3.11})$$

$$\partial_t \Theta + m^2 [\partial_x(U\theta) + \partial_y(V\theta)] + m \partial_\eta(\Omega\theta) = F_\Theta \quad (\text{A.3.12})$$

$$\partial_t \mu_d' + m^2 [\partial_x U + \partial_y V] + m \partial_\eta \Omega = 0 \quad (\text{A.3.13})$$

$$\partial_t \phi' + \mu_d^{-1} [m^2 (U\phi_x + V\phi_y) + m \Omega \phi_\eta - gW] = 0 \quad (\text{A.3.14})$$

$$\partial_{\eta} \phi' = -\bar{\mu}_d \alpha'_d - \alpha_d \mu'_d \quad (\text{A.3.15})$$

$$\partial_t Q_m + m^2 [\partial_x (Uq_m) + \partial_y (Vq_m)] + m \partial_{\eta} (\Omega q_m) = F_{Q_m} \quad (\text{A.3.16})$$

onde  $U = \frac{\mu_d u}{m}$ ,  $V = \frac{\mu_d v}{m}$ ,  $W = \frac{\mu_d w}{m}$ ,  $\Omega = \frac{\mu_d \dot{\eta}}{m}$ . A equação de estado não pode ser escrita em forma de perturbação devido ao expoente, ficando com a mesma forma apresentada na equação (A.3.8).

#### A.4 Discretização Temporal e Espacial

A solução das equações do modelo é da forma de ondas, entretanto na solução existem tanto ondas lentas que representam os fenômenos meteorológicos de interesse quanto rápidas ondas sonoras. As ondas sonoras são de pouco ou nenhum interesse para a meteorologia, entretanto precisam ser resolvidas para manter a estabilidade da solução. Como tem alta frequência, elas exigem  $\Delta t$  menores do que as ondas meteorológicas. Entretanto, caso todos os cálculos do modelo fossem feitos utilizando esse  $\Delta t$  pequeno, o custo computacional/temporal seria muito alto, inviabilizando a previsão. Assim, várias técnicas foram desenvolvidas para resolver as ondas acústicas separadamente das demais ondas, as quais podem então utilizar um  $\Delta t$  apropriado.

O WRF utiliza uma dessas técnicas, um esquema de integração por passos de tempo. Enquanto ondas lentas são resolvidas utilizando Runge-Kutta de 3ª ordem (RK3), o modo horizontal de propagação das ondas acústicas é resolvido com um esquema de integração forward-backward e, o modo vertical, com um esquema implícito utilizando o  $\Delta t$  para ondas rápidas. A solução das ondas sonoras é aplicada como uma correção no RK3.

O esquema de Runge-Kutta de 3ª ordem integra um sistema de equações diferenciais usando um preditor-corretor. As variáveis são definidas como  $\Phi = (U, V, W, \Theta, \phi', \mu', Q_m)$  e as equações do modelo,  $\Phi_t = R(\Phi)$ . São necessários três passos para avançar a solução de  $\Phi(t)$  a  $\Phi(t + \Delta t)$ :

$$\Phi^* = \Phi^t + \frac{\Delta t}{3} R(\Phi^t) \quad (\text{A.3.17})$$

$$\Phi^{**} = \Phi^t + \frac{\Delta t}{2} R(\Phi^*) \quad (\text{A.3.18})$$

$$\Phi^{t+\Delta t} = \Phi^t + \Delta t R(\Phi^{**}) \quad (\text{A.3.19})$$

onde  $\Delta t$  é o passo de tempo utilizado para ondas lentas. Aplicado as equações (A.3.9) a (A.3.16),  $\Phi^t$  representam os termos derivados no tempo e  $R(\Phi)$  os termos restantes. Apesar de ser denominado Runge-Kutta de 3ª ordem, ele tem precisão de 3ª ordem apenas para equações lineares, para equações não-lineares é de 2ª ordem.

Para resolver as ondas sonoras, as equações governantes são integradas utilizando um passo de tempo menor ( $\Delta \tau$ ) dentro do passo de tempo do RK3 ( $\Delta t$ ). Representando em termos de programação, existe um laço de repetição acústico que é executado  $\left(\frac{\Delta t}{\Delta \tau}\right)$  vezes dentro do laço de repetição do RK3. As equações são novamente escritas na forma de perturbação, mas dessa vez a perturbação é a influência da solução das ondas sonoras na solução geral. Parte-se de:

$$\mathbf{V}'' = \mathbf{V} - \mathbf{V}^{t*} \quad , \quad \Omega'' = \Omega - \Omega^{t*} \quad , \quad \Theta'' = \Theta - \Theta^{t*} \quad ,$$

$$\phi'' = \phi' - \phi^{t*} \quad , \quad \alpha_d'' = \alpha_d' - \alpha_d^{t*} \quad , \quad \mu_d'' = \mu_d' - \mu_d^{t*}$$

onde  $t^*$  denota os desvios no preditor calculado pelo RK3 ( $\Phi^t, \Phi^*$  ou nas equações (A.3.17) a (A.3.19)).

O WRF utiliza uma grade do tipo C (ARAKAWA & LAMB, 1977) na discretização espacial de variáveis (Figura A.4.1). A vantagem em utilizar uma grade alternada é evitar o desacoplamento entre os termos da equação diferencial parcial, que ocorre quando variáveis interdependentes são resolvidas no mesmo ponto de grade. Quando esse desacoplamento aparece, grande imprecisão é introduzida no cálculo pelo módulo computacional gerado, tornando-se necessário aplicar uma difusão computacional nas ondas mais curtas. Além disso, grades alternadas do tipo C ainda têm a vantagem de necessitar do cálculo de médias na equação discretizada apenas para o termo de Coriolis. Isso é uma grande vantagem, pois o WRF é primariamente um modelo de mesoescala. Como a influência da força de Coriolis em fenômenos representados nessa escala é pouco relevante, a grade do tipo C torna-se a mais recomendável.

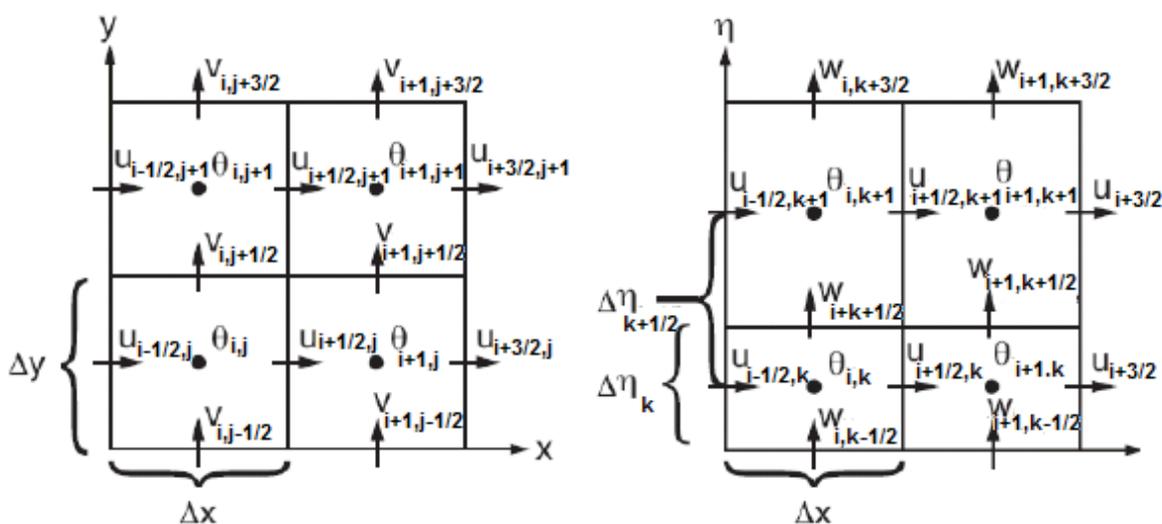


Figura.A.4.1 Grade alternada horizontal e vertical do tipo C.

## A.5 Aninhamento de Grades

Quando se deseja analisar mais detalhadamente uma região de interesse que está inserida na grade original utilizada, é possível fazer um aninhamento de grades. A vantagem em utilizar grades aninhadas é ter dados de uma área com uma alta resolução espacial, sem que toda a grade tenha

que ser rodada com um  $\Delta x$  menor. A Figura 3.4 mostra exemplos de aninhamentos de grade possíveis no WRF.

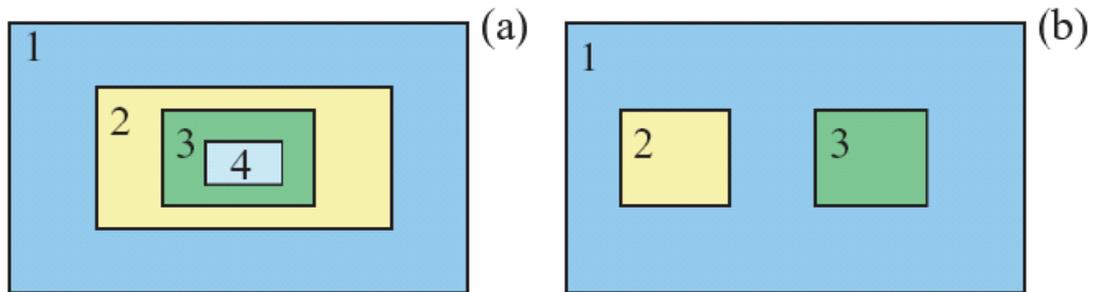


Figura A.5.1: Exemplos de aninhamento de grades permitidos no WRF.

Em ambos os casos apresentados, as condições de contorno (CC) da grade menor (FG, fine grid) são interpoladas a partir da previsão fornecida pela grade maior (CG, coarse grid), ou seja, na Figura A.5.1a:  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$ ; na Figura A.5.1b,  $1 \rightarrow 2$  e  $1 \rightarrow 3$ . Os dados calculados nas grades podem fluir em apenas um sentido (1-way) ou em ambos (2-way): no modo unidirecional, os valores da CG são simplesmente utilizados como condição de contorno na FG, no modo bidirecional, ocorre o mesmo processo, entretanto, os pontos da CG que estão dentro da FG, têm seus valores alterados para aqueles obtidos pela FG.

A Figura A.5.2 mostra exemplos da disposição das variáveis em grades aninhadas. A alternância dessas variáveis na grade define como a FG é colocada sobre a CG e influencia os resultados quando o modo 2-way está ativo. Se a razão entre o  $\Delta x_{CG}$  e  $\Delta x_{FG}$  for ímpar (lado esquerdo da Figura 3.5), os pontos que contêm determinada variável na CG e FG coincidem. Caso contrário, o ponto da CG fica equidistante dos quatro pontos da FG, e simplesmente recebe o valor do canto inferior esquerdo.

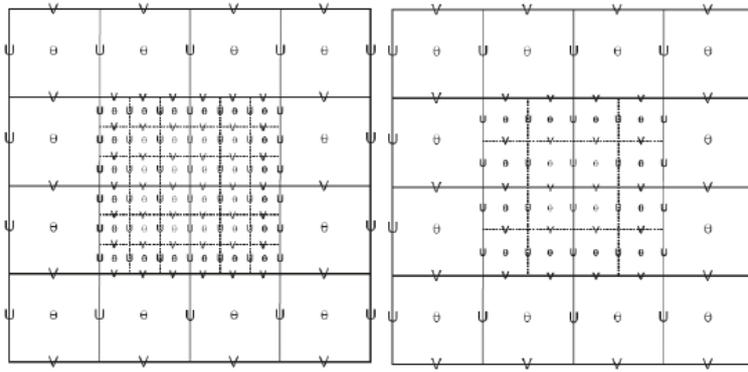


Figura A.5.2: Grades aninhadas do tipo C.

## A.6 Inicialização e condições de fronteira

Nas aplicações com dados reais, seja na previsão do tempo, seja na simulação do tempo passado, o WRF, para uma área limitada, precisa das condições de fronteira laterais que representem, relativamente, o estado real da atmosfera vizinha ao longo do tempo de integração das equações dinâmicas. Essas condições são fornecidas por um modelo de previsão numérica do tempo em escala global. Os modelos globais de previsão são capazes de fornecer previsões para vários dias num prazo suficientemente curto para possibilitar o avanço das previsões dos modelos regionais (de área limitada). Uma vez que o interesse de um modelo de mesoescala começa onde o outro modelo de maior escala se mostra incapaz de resolver o tempo com o detalhamento necessário e desejado, é normal que o modelo regional tenha uma rede menos espaçada em comparação ao modelo que o apoia.

Os modelos regionais em comparação com os globais têm ao menos duas vantagens:

A.6.1 Equações dinâmicas aperfeiçoadas: escala espacial e temporal inferior e incorporação dos tempos de aceleração não hidrostáticos, e também, economia de cálculo implicada pelo número reduzido de nós, inclusão de todos os tempos de curvatura e de Coriolis;

A.6.2 Uma melhor representação da superfície terrestre, conseguida através de uma melhor resolução da topografia e de outros parâmetros meteorológicos com albedo, tipo de solo, cobertura vegetal etc. Descrição detalhada da

interação oceano-atmosfera e a formulação de equações dinâmicas não-hidrostáticas.

Os modelos regionais tiveram sucesso devido a serem modelos de grade fina, ou seja, a distância entre os pontos da grade vai desde alguns quilômetros a algumas dezenas deles.

Os parâmetros que caracterizam a região (representados por médias climatológicas referentes ao mês em que se inclui o período de integração, menos o relevo) são incluídos no processo de definição do domínio horizontal, no pré-processamento que antecede a integração das equações dinâmicas – WRF Pre-Processing System, WPS. O estado inicial é obtido pela interpolação espacial dos dados de análise do modelo global, no WPS é feita uma interpolação horizontal, isto em relação às variáveis meteorológicas, como por exemplo, a razão de mistura, a temperatura etc. em cada nível isobárico e em relação às variáveis na superfície e nos níveis do subsolo. Depois, na fase de inicialização, no cerne do WRF-ARW, é realizada uma interpolação vertical adequada à grade de cálculo do modelo. Este processo fica melhor detalhado e esquematizado através da figura A.6.

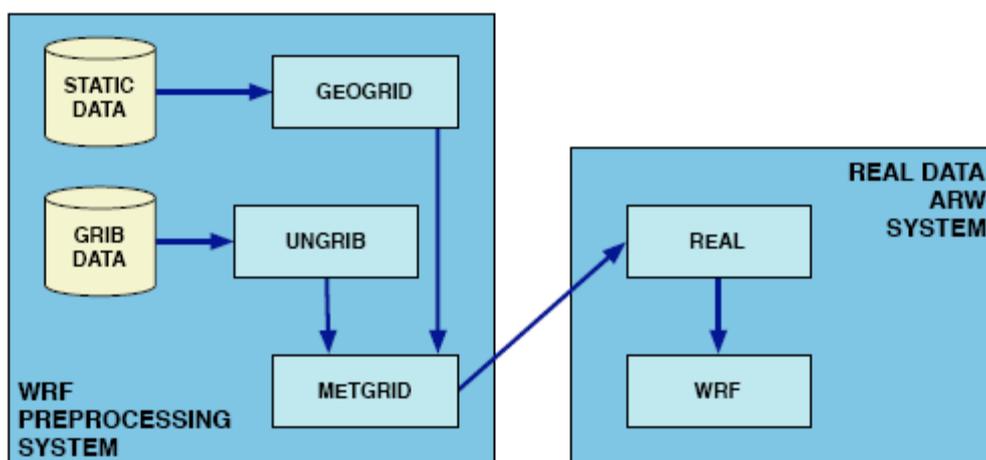


Figura A.6: Esquema mostrando o fluxograma dos dados e programas componentes da fase WPS, e como o WPS inicializa os dados para a fase ARW.



## Apêndice B

### Parametrizações Físicas do Modelo WRF

#### B.1 Esquemas de Microfísica

Os processos de precipitação, vapor da água e nuvens são resolvidos pelo modelo WRF explicitamente, na forma de esquemas de parametrizações. Nesses esquemas são construídas, no lugar dos complexos modelos teóricos, fórmulas alternativas simplificadas para resolver os termos associados aos fluxos turbulentos de momento, calor e umidade que aparecem devido à integração das equações. Os principais esquemas de microfísica disponíveis no modelo WRF estão listados a seguir, após a Tabela B.1.

A Tabela B.1 mostra as opções de microfísica disponível de variáveis de umidade e se estão ou não incluídos os processos de fase-gelo e de fase-mista. Os processos de fase-mista são aqueles que resultam da interação entre o gelo e as partículas de água, tais como “riming” que pode produzir “graupel” ou granizo. Como regra geral, para o uso de grades com resolução maior do que 10 km, onde os movimentos verticais devem ser resolvidos, devem ser usados os esquemas contendo fase-mista.

Tabela B.1. Opções de microfísica do modelo WRF

Esquema	Número De Variáveis	Processo Fase-gelo	Processo Fase-mista
<i>Kessler</i>	3	N	S
<i>Purdue Lin</i>	6	S	S
<i>WSM3</i>	3	S	N
<i>WSM5</i>	5	S	N
<i>WSM6</i>	6	S	S
<i>Eta GCP</i>	2	S	S
<i>Thompson</i>	7	S	S
<i>Goddard</i>	6	S	S

### **B.1.2 Esquema de Kessler**

O esquema de Kessler (Kessler, 1969) é um modelo simples de nuvem quente que inclui vapor d'água, água de nuvem e chuva. Este esquema inclui os seguintes processos de microfísica: a produção, queda e evaporação da chuva; a agregação (“accretion”) e auto-conservação da água de nuvem; e a produção de água de nuvem a partir da condensação.

### **B.1.2 Esquema de PardueLin**

Neste esquema estão incluídos seis tipos de hidrometeoros: vapor d'água, água de nuvem, chuva, gelo de nuvem, neve e “graupel”. Este esquema é baseado em Lin et al. (1983) e Rutledge&Hobbs (1984) com ajustes para a inclusão da saturação segundo Tão e al. (1989). Este é um esquema relativamente sofisticado no WRF e é mais adequado para uso em pesquisa.

### **B.1.3 Esquema de momento único (“single-moment”) de três classes do WRF (WSM3)**

Este esquema (Hong et al. 2004) inclui sedimentação de gelo e outras novas parametrizações da fase-gelo revisadas a partir do esquema NCEP3 que compunha a primeira versão do WRF. A principal diferença dos outros esquemas é o uso de uma relação diagnóstica para a concentração do gelo que é baseada no conteúdo de massa do gelo em lugar da temperatura. Este esquema inclui três categorias de hidrometeoros: vapor, água nuvem/gelo, e chuva/neve. Este esquema é o chamado gelo-simples onde o gelo da nuvem e água da nuvem são contados na mesma categoria. Eles são diferenciados pela temperatura, já que gelo de nuvem só pode existir quando a temperatura for menor ou igual ao ponto de congelamento, em caso contrário a água de nuvem poderá existir. A mesma condição é aplicada à chuva e a neve. Embora a fase-

gelo esteja incluída, este esquema é considerado suficientemente eficiente para uso nos modelos operacionais.

#### **B.1.4 Esquema WSM5**

Este esquema é similar ao WSM3 no que se refere a ser um esquema simples de gelo. Entretanto, o vapor, a chuva, a neve, o gelo de nuvem, e a água de nuvem são tratados de como cinco categorias diferentes. Assim, é possível a existência de água super-resfriada “supercooled” e um gradual derretimento da neve que cai abaixo do ponto de congelamento. Os detalhes deste esquema também podem ser encontrados em Hong et al. (2004).

#### **B.1.5 Esquema WSM6**

Este esquema é uma extensão do anterior e inclui o “graupel” e seus processos associados. Os processos de congelamento/derretimento (“freezing/melting”) são calculados durante os intervalos dos passos de tempo do termo de descida (“fall-termsub-steps”) para aumentar a precisão do perfil de aquecimento vertical destes processos. Neste esquema a ordem do processo é otimizada para diminuir a sensibilidade do esquema ao passo de tempo usado na integração do modelo. Como nos esquemas WSM3 e WSM5, os ajustes de saturação seguem Dudhia (1989) e Hong et al. (1998) quando trata separadamente os processos de saturação de gelo e água.

#### **B.1.6 Esquema Eta**

Este esquema é também conhecido como EGCP01 ou esquema Eta Ferrier. Este esquema prediz mudanças no vapor d’água e na condensação nas formas de água de nuvem, chuva, gelo de nuvem e precipitação de gelo (“neve/graupel/ neve sob derretimento”). Os campos de hidrometeoros individuais são depois combinados na condensação total, sendo o vapor d’água e a

condensação total advectados no modelo. A formulação deste esquema juntamente com as modificações no tratamento rápido dos processos de microfísica, permite que um passo de tempo grande seja usado com resultados estáveis. O tamanho médio da precipitação na forma de gelo é assumido como sendo uma função da temperatura seguindo os resultados observacionais de Ryan (1996). Neste esquema os processos de fase-misto são considerados em temperaturas maiores do que  $-30^{\circ}\text{C}$ , enquanto que a saturação do gelo é sempre assumida para condições de nuvem em temperaturas menores do que aquele limiar. Uma descrição mais detalhada deste esquema pode ser encontrada na página do COMET (<http://meted.ucar.edu/nwp/pcu2/etapcp1.htm>)

#### **B.1.7 Esquema de Thompson et al.**

Este esquema de parametrização de microfísica (Thompson et al., 2004) inclui melhorias no esquema desenvolvido por Reisner et al. (1998) e foi usado e testado extensivamente e comparado tanto em casos idealizados de pesquisa quanto em casos reais documentados de observações realizados nos invernos das latitudes medias. O esquema inclui seis classes de espécies úmidas e foi desenvolvido para melhorar a previsão de eventos de congelamento em aeronaves.

#### **B.1.8 Esquema de Modelo Ensemble Cumulos de Goddard**

Os modelos Ensemble Cumulus de Goddard (GCE) (Tao & Simpson, 1993) de esquemas de microfísica de volume de um momento são baseados principalmente em (Lin et al., 1983) com os processos adicionais de (Rutledge and Hobbs, 1984). Embora, os esquemas de microfísica de Goddard tenham várias modificações.

Primeiro, há a opção de escolher ou graupel ou granizo como a terceira categoria de gelo (McCumber et al., 1991). Graupel tem uma densidade relativamente baixa e um alto valor de interceptação (ou pequenas partículas). Em contraste, o granizo tem uma densidade relativa alta e um baixo valor de

interceptar (ou seja, mais numerosas partículas grandes). Essas diferenças podem afetar não apenas a descrição da população de hidrometeoros e formação da região estratiforme-bigorna, mas também a relação de importância dos processos microfísicos-dinâmicos-radiativos.

Em segundo lugar, novas técnicas de saturação (Tao et al., 1989, 2003) foram adicionados. Estas técnicas de saturação são, basicamente, destinadas a garantir que a saturação do super (sub-saturação) não possa existir em um ponto de grade que é claro (nublado).

Em terceiro lugar, todos os processos microfísicos que não envolvem a evaporação, fusão ou sublimação (Isto é, taxas de transferência de um tipo de hidrometeoros para outro) são calculados com base em um estado termodinâmico. Isso garante que todos estes processos sejam tratados de forma igual.

Em quarto lugar, a soma de todos os processos associados com uma espécie não poderá exceder a sua massa. Isso garante que o balanço hídrico seja equilibrado nos cálculos microfísicos.

A microfísica de Goddard tem uma terceira opção, que é equivalente a um período de Regime dos gelos (2ICE), tendo apenas nuvens de gelo e neve. Esta opção pode ser necessária para simulações de resolução grosseira (ou seja, >5km tamanho da grade). O sistema de duas classes de gelo pode ser aplicado para o inverno e convecção frontal.

### **B.1.9 Esquema de 2- Momentos de Morrison et al.**

O esquema de Morrison et al. (2008) é baseado no esquema de microfísica de dois momentos volume de Morrison et al. (2005) e Morrison and Pinto (2006). Seis categorias de água estão incluídas: vapor, gotículas de nuvem, nuvem de gelo, chuva, neve e graupel/granizo. O código tem um interruptor especificado pelo usuário para incluir quer graupel ou granizo. O prognóstico das variáveis inclui número de concentrações erazão de mistura de gelo de nuvem, chuva, neve e granizo/graupel, e a razão de mistura da gota de nuvem e do vapor d' água (10 variáveis no total). A previsão de dois momentos (ou seja, o número concentração e razão de mistura) permite um tratamento mais robusto das

distribuições dos tamanhos das partículas, que são uma chave para o cálculo das taxas de processos microfísicos de nuvens e/ evolução da precipitação. Vários processos de fase mista líquido, gelo estão incluídos. As distribuições do tamanho das partículas são tratadas com funções gama, com a interceptação associada e parâmetros derivados da inclinação de previsão de razão de mistura e número de concentração. O esquema tem sido extensivamente testado e comparado com ambos os estudos de caso real idealizado e cobrindo uma ampla variedade de condições.

### B.1.10 Esquemas de Parametrização Cumulus

Estes esquemas são responsáveis pelos efeitos sub-grade que ocorrem nas nuvens convectivas rasas e/ou profundas. Estes esquemas tentam representar os fluxos verticais devidos aos movimentos ascendentes e descendentes, não resolvidos na escala das grades do modelo, e compensar os movimentos do lado de fora das nuvens. Estes esquemas operam somente em colunas individuais onde o esquema é disparado e fornecem os perfis verticais de aquecimento e umidade. A Tabela B.1.2 mostra as características básicas das opções de parametrização de cúmulos disponíveis no WRF.

Tabela B.1.2: Opções de parametrização de cúmulos no modelo WRF.

<b>Esquema</b>	<b>Desentranhamento(não -arrastamento)</b>	<b>Tipo de esquema</b>	<b>Fechamento</b>
Kain-Fritsch	S	Fluxo de massa	Remoção da CAPE
Betts-Miller-Janjic	N	Ajustamento	Ajustamento da sondagem
Grell-Devenyi	S	Fluxo de massa	Vários

A parametrização de cúmulos teoricamente só é válida para grades com baixa resolução (por exemplo, com mais de 10 km de espaçamento), quando é necessário liberar calor latente em uma escala realística de tempo na coluna

convectiva. Algumas vezes esses esquemas têm sido úteis também para ajudar a disparar a convecção em aplicações com grades de 5-10 km de espaçamento. Em geral, eles não devem ser usados quando o modelo pode resolver os vórtices turbulentos (grades com espaçamento menores ou iguais a 5 km).

### **B.1.11 Esquema Kain-Fritsh-Eta**

O esquema usado Kain-Fritsh-Eta (KF-Eta) é uma versão modificada, baseada nos testes aplicados com o modelo Eta, inicialmente propostos em Kain & Fritsch (1990) e Kain & Fritsch (1993). Como no esquema original KF, este esquema utiliza um modelo simples de nuvem com movimentos úmidos ascendentes e descendentes, incluindo os efeitos de entranhamento e desentranhamento e uma microfísica relativamente simples. O esquema KF-Eta difere do esquema KF original nos seguintes aspectos:

- Impõe-se uma taxa mínima de entranhamento para suprimir uma convecção dispersiva em ambientes instáveis e relativamente secos;
- Permite-se uma convecção rasa (não-precipitante) para qualquer movimento ascendente que não atinja a profundidade mínima da nuvem no caso de nuvens precipitantes; este valor mínimo de profundidade varia como uma função da temperatura da base da nuvem;
- Permite-se que a taxa de entranhamento varie como uma função da convergência em níveis baixos;
- Mudanças nos movimentos descendentes (“downdraft”);
- A camada fonte é a camada profunda entre 150 – 200 mb acima da base da nuvem;
- O fluxo de massa é especificado como uma fração do fluxo de massa ascendente na base da nuvem. Esta fração é uma função da umidade relativa da camada fonte em vez de ser função do cisalhamento do vento ou outros parâmetros, isto é, a antiga relação de eficiência de precipitação não é usada e
- O desentranhamento pode ocorrer na camada fonte e abaixo dela.

### **B.1.12 Esquema Betts-Miller-Janjic**

O esquema Betts-Miller-Janjic (Janjic, 1994,2000) é derivado do esquema Betts-Miller de ajustamento convectivo descrito em Betts (1986) e Betts& Miller (1986). No esquema Betts-Miller-Janjic (BMJ) os perfis de convecção profunda e o tempo de relaxação são variáveis e dependem da eficiência da nuvem, um parâmetro adimensional que caracteriza o regime da convecção (Janjic, 1994). A eficiência da nuvem depende da mudança de entropia, da precipitação e da temperatura média da nuvem. O perfil de umidade da convecção rasa é derivado da condição de que a mudanças na entropia sejam pequenas e não-negativas (Janjic, 1994). O esquema BMJ foi otimizado nos últimos anos pelo uso nas aplicações operacionais do NCEP, fazendo com que além das diferenças conceituais descritas, muitos detalhes e/ou valores de certos parâmetros difiram daqueles recomendados em Betts (1986) e Betts& Miller (1986). Mais recentemente estão sendo feitas tentativas para refinar este esquema para uso em resoluções horizontais maiores, principalmente através de modificações no mecanismo de disparo da convecção.

### **B.1.13 Esquema de Grell-Devenyi**

Grell e Devenyi (2002) introduziram um esquema de cúmulos que usa a técnica de conjunto (“ensemble cumulus”) no qual a efetividade dos cúmulos tem esquemas múltiplos e variam em cada caixa de grade do modelo, sendo o resultado final a média encontrada que é então passada para o modelo. Em princípio a média pode ser ponderada para otimizar o esquema mas no esquema têm sido usados valores iguais para os pesos. Os esquemas são do tipo fluxo de massa, mas com diferentes parâmetros para as correntes ascendentes e descendentes de arrastamento e de não arrastamento. Essas diferenças no controle estático são combinadas com diferenças no controle dinâmico, que é o método de determinar o fluxo de massa na nuvem. Os controles de fechamento dinâmico podem ser baseados na energia potencial convectiva disponível (CAPE ou função trabalho da nuvem), na velocidade vertical nos níveis baixos ou na convergência de umidade. Aqueles baseados

na CAPE ou equilibram a taxa de variação da CAPE ou relaxam a CAPE segundo valores climatológicos, ou ainda removem a CAPE na escala de tempo da convecção. O fechamento segundo a convergência de umidade balanceia a chuva da nuvem com a advecção vertical de umidade integrada. Outro controle é aquele feito sobre o mecanismo de disparo. O uso das diversas formas de controle permite a criação de um conjunto com 144 membros.

## **B.2 Camada Superficial**

Os esquemas da camada limite calculam as velocidades de atrito e os coeficientes de trocas que permitem o cálculo do aquecimento da superfície e dos fluxos de umidade pelos modelos de solo-superfície e do estresse no esquema da camada limite planetária. Sobre superfícies de água os fluxos de superfície e campos diagnósticos de superfície são computados no próprio esquema de camada superficial. Os esquemas não apresentam tendências, apenas a informação dependente da estabilidade proveniente da camada superficial para os esquemas de solo-superfície e de CLP. Atualmente, cada opção de camada superficial é relacionada com determinadas opções de camada limite.

## **B.3 Modelo de Solo-Superfície**

Os modelos de solo-superfície (MSS) usam a informação meteorológica do esquema de camada superficial, a forçante radioativa do esquema de radiação e a forçante de precipitação dos esquemas de microfísica e convecção, combinadas com uma informação interna de variáveis de estado do solo e propriedades solo-superfície, para disponibilizar fluxos de calor e umidade em pontos sobre o solo e sobre a água ou o gelo. Estes fluxos geram uma condição de fronteira inferior para o transporte vertical realizado nos esquemas de CLP (ou no esquema vertical de difusão, no caso onde o esquema de CLP não funciona, como no modo large-eddy). Os MSS têm vários graus de sofisticação ao lidar com fluxos de temperatura e umidade em múltiplos níveis

de solo e podem também lidar com os efeitos de vegetação, raízes e canopy e previsão de cobertura de neve. O MSS não é tendencioso mas atualiza as variáveis de estado do solo, que incluem a temperatura do solo, perfil de temperatura do solo, perfil de umidade do solo, cobertura de neve e possivelmente propriedades de canopy. Não há interação horizontal entre pontos vizinhos no MSS, possibilitando a execução deste modelo em vários pontos de grade concomitantemente. A Tabela B.3 resume as características básicas dos esquemas de solo-superfície no ARW.

Tabela: B.3. Opções de Solo-Superfície no ARW

Esquema	Processos de Vegetação	Variáveis - Solo ( Camadas)	Esquema Neve
5-camadas	N	Temperatura (5)	Nenhum
Noah	S	Temperatura, água-gelo, água (4)	1-camada, fracional
RUC	S	Temperatura, Gelo, água + gelo (6)	Multi-camadas
Pleim-Xiu	S	Temperatura, razão de mistura (2)	Somente entrada

#### B.4 Camada Limite Planetária (CLP)

A camada limite planetária (CLP) é responsável por fluxos verticais de escala sub-grade devido a transportes turbulentos em toda a coluna atmosférica, não apenas na camada limite. Quando este esquema é ligado, a difusão vertical explícita é desativada com a pressuposição que este esquema irá lidar com o processo. As escolhas mais apropriadas de difusão horizontal são as baseadas em deformação horizontal ou valores constantes de  $K_h$  onde a mistura horizontal e vertical são tratados independentemente. Os fluxos de superfície são disponibilizados pelos esquemas de camada de superfície e solo superfície. Os esquemas de CLP determinam os perfis de fluxo dentro de uma camada limite bem misturada e a camada estável e também gera as tendências de temperatura, umidade (incluindo nuvens) e momento horizontal

em toda a coluna atmosférica. A maior parte dos esquemas de CLP considera mistura seca mas, também, há a possibilidade de incluir efeitos de saturação na estabilidade vertical que determina a mistura. Os esquemas são unidimensionais e assumem que há uma clara separação de escalas entre turbulências sub-grade e turbulências resolvidas. Esta pressuposição se torna menos clara em grades com resoluções menores que poucas centenas de metros, onde a turbulência da camada limite pode começar a ser resolvida, e em casos onde o esquema deve ser substituído por um esquema de turbulência local tridimensional completo, como o esquema de difusão TKE.

### **B.5 Teoria da Similaridade (MM5)**

Este esquema usa as funções de estabilidade de (Paulson, 1970; Dyer and Hicks, 1970; Webb, 1970) para calcular os coeficiente de calor, umidade e momentum. A velocidade convectiva de (Belejaars, 1994) é usada para melhorar os fluxos de calor e umidade, Nenhuma parametrização de rugosidade térmica é incluída na versão corrente deste esquema. A relação de Charnock relaciona comprimento de rugosidade à velocidade de fricção sobre a água. Existem quatro regimes de estabilidade após Zhang e Anther (1982). Este esquema de camada de superfície deve ser executado no conjugado com o MRF ou esquema YSU PBL. Na versão 3, existe uma opção para substituir a relação de Charnock de comprimento de rugosidade com a relação de Donelan que tem menor arrasto em velocidades de vento nos hurricaneforce, e pode ser mais adequado para simulações de furacão. Também para os pontos de água, a formulação de Beljaars para a velocidade convectiva é substituído por apenas um gradiente vertical proporcional ao gradiente térmico para ajudar em situações de vento fraco.

### **B.6 CLP do Medium Range Forecast Model (MRF)**

Este esquema é descrito em Hong and Pan (1996). O esquema emprega um fluxo contra-gradiente de calor e umidade em condições instáveis. Ele usa um coeficiente melhorado de fluxo vertical na CLP e as alturas de CLP são

determinadas de um número de Richardson crítico volumétrico (bulk). Ele lida com a difusão vertical com um esquema local implícito e é baseado no Ri local na atmosfera livre.

### **B.7 Camada Limite Planetária- YonseiUniversity (YSU)**

A CLP YSU é a próxima geração de CLP do MRF, também usando termos contra-gradientes para representar fluxos devidos a gradientes não locais. Isto adiciona ao CLP MRF um tratamento explícito de camada de entranhamento no topo da CLP. O entranhamento é feito proporcional ao fluxo de flutuabilidade em superfície em relação a estudos com modelos de grande turbulência. O topo da CLP é definido usando um número de Richardson crítico igual a zero (diferente do CLP MRF, cujo valor é 0,5), sendo assim semente dependente do perfil de flutuabilidade que, em geral, gera um topo de CLP mais baixo que o calculado usando o esquema MRF.

### **B.8 Esquema de Mellor-Yamada-Janjic (MYJ)**

Esta parametrização de turbulência usada na CLP e na atmosfera livre (Janjic, 1990, 1996, 2002) representa uma implementação não singular do modelo de turbulência Mellor-Yamada Level 2.5 (Mellor and Yamada, 1982) para todos os regimes turbulentos da atmosfera. Nesta implementação, um limite superior é imposto numa escala mestre de comprimento. Este limite superior depende do TKE, assim como a flutuabilidade e o cisalhamento do fluxo em questão. Na região instável, a forma funcional do limite superior é derivado dependendo se a geração de TKE for não-singular no caso de turbulência crescente. Na região estável, o limite superior é derivado dependendo que a razão da variância do desvio da velocidade vertical e o TKE não seja menor que do que aquele correspondente no regime de turbulência zero (vanishing turbulence). A equação diferencial de produção ou dissipação de TKE é resolvida iterativamente. As constantes empíricas também foram revisadas (Janjic, 1996, 2002).

## **B.9 Radiação Atmosférica**

Os sistemas de radiação geram o aquecimento atmosférico devido ao fluxo de divergência radiativa e a radiação de superfície em ondas curtas e longas para o aquecimento do solo. A radiação de onda longa inclui infravermelha ou radiação térmica absorvida e emitida pelos gases e superfícies. O fluxo da radiação de onda longa oriunda do solo é determinado pela emissividade da superfície que, por sua vez, depende do tipo de uso da terra, bem como da temperatura do solo.

A radiação de onda curta inclui comprimentos de onda visíveis e próximas aos que compõem o espectro solar. A única fonte é o sol, mas os processos incluem absorção, reflexão e espalhamento na atmosfera e superfícies. Para a radiação de onda curta, o fluxo ascendente é o reflexo devido ao albedo da superfície. Dentro da atmosfera a radiação responde por nuvens e distribuição de vapor d'água previstos pelo modelo, bem como específicos dióxidos de carbono, ozônio e opcionalmente traços de concentração de gás.

Todos os esquemas de radiação no WRF atualmente são esquemas de coluna (unidimensionais). Portanto, cada coluna é tratada independentemente e os fluxos correspondem àqueles em planos horizontalmente uniformes, que são boas aproximações se a espessura das camadas verticais forem muito menos espessas do que o comprimento da grade horizontal. Esta hipótese se tornaria menos precisa em alta resolução horizontal.

## **B.10 Modelo de Transferência de Radiação Rápida de Onda Longa (RRTM)**

Este RRTM, tirado do MM5, é baseado em Mlawer et al. (1997) e é um sistema de banda espectral usando o método "correlated-k". Ele utiliza tabelas pré-determinadas para representar precisamente os processos de onda longa em relação a vapor de água, ozônio, CO<sub>2</sub> e traços de gases (se houver), bem como contabilizar a profundidade da nuvem ótica.

## **B.11 Onda curta do MM5 (Dudhia)**

Este sistema é baseado em Dudhia (1989) e é retirado do MM5. Ele tem uma integração simples de integração descendente com o fluxo solar, que representam um clear-air espalhamento, absorção de água (Lacisand Hansen, 1974), e albedo e absorção das nuvens. Ele também utiliza as tabelas look-up de Stephens (1978).