

Universidade de São Paulo  
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas  
Departamento de Ciências Atmosféricas

Elisa Glitzenhirn

Relevância do Acoplamento Oceano–Atmosfera na  
Representação do Ciclone Catarina

São Paulo  
2015



Elisa Glitzenhirn

# Relevância do Acoplamento Oceano–Atmosfera na Representação do Ciclone Catarina

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

Área de Concentração: Meteorologia

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Camargo

Versão corrigida. O original encontra-se disponível na unidade

São Paulo

2015

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a minha família Osmar, Rose e Claudia por todo apoio e incentivo, obrigada por sempre acreditarem da minha capacidade;

Agradeço o Dr. Ricardo de Camargo por ter me dado a oportunidade de ser sua orientanda, e ao longo desta trajetória ter se tornado um amigo fundamental, me incentivando, motivando e dando “puxões de orelha” em certos momentos;

Agradeço ao Dr. Luciano Ponzi Pezzi por acreditar neste trabalho e ajudar fornecendo as simulações do WRF e COAWST.

Agradeço aos amigos e colegas Alexandre Tique, Carolina Gramcianinov, Franciane Rodrigues, Marcos Leitão, Mario Gavidia, Natália Crespo e Sergio Mendez, por todo companheirismo e boas risadas, apesar de quase sempre eu estar distante. Vocês fazem parte de um divisor de águas minha vida, sempre lembrarei de vocês com o maior carinho;

Agradeço o meu grande amigo Wagner Galichio, que nos últimos meses tem sido o maior motivador para que eu conseguisse ter chegado aqui, obrigada por me ajudar nos momentos de desespero, e sempre confiar em mim, “vai time! ”;

Agradeço a todos aqueles que participaram da minha formação, professores, funcionários e ao IAG/USP por esta oportunidade;

Agradeço também a todos meus amigos que de alguma forma me ajudaram a chegar até aqui.

Agradeço a Renova Energia, em especial a gerência de Engenharia Eólica por entender meus horários alternativos e principalmente por incentivar a conclusão desta etapa.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

*“ Cada um tem aquilo que merece. ”*

Ricardo Rodrigues.

## SUMÁRIO

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| LISTA DE FIGURAS .....              |    |
| LISTA DE TABELAS .....              |    |
| LISTA DE ABREVIATURAS.....          |    |
| LISTA DE SÍMBOLOS .....             |    |
| RESUMO .....                        |    |
| ABSTRACT .....                      |    |
| 1. INTRODUÇÃO.....                  | 15 |
| 1.1 OBJETIVOS.....                  | 16 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....      | 17 |
| 2.1 CICLONES.....                   | 17 |
| 2.1.1 CICLONE EXTRATROPICAL .....   | 17 |
| 2.1.2 CICLONE TROPICAL .....        | 18 |
| 2.1.3 CICLONE SUBTROPICAL .....     | 20 |
| 2.2 O CICLONE CATARINA .....        | 20 |
| 3. DADOS E METODOLOGIA .....        | 33 |
| 3.1 DADOS .....                     | 33 |
| 3.1.1 MODELOS.....                  | 33 |
| 3.1.1.1 WRF .....                   | 35 |
| 3.1.1.2 ROMS.....                   | 37 |
| 3.1.1.3 COAWST .....                | 38 |
| 3.2 MÉTODOS.....                    | 39 |
| 3.2.1 RASTREAMENTO DE CICLONE ..... | 39 |
| 3.2.2 ESTRUTURA DE CICLONE .....    | 40 |
| 3.2.3 PERFIS VERTICAIS MÉDIOS ..... | 44 |
| 3.2.4 BALANÇO DE CALOR .....        | 44 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....     | 46 |
| 5. CONCLUSÕES .....                 | 84 |
| 6. LIMITAÇÕES E SUGESTÕES.....      | 87 |
| BIBLIOGRAFIA .....                  | 87 |
| ANEXO A .....                       | 91 |
| ANEXO B .....                       | 97 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – (A) Imagem de alta resolução no canal visível (1 km) do sensor MODIS que está a bordo do satélite Terra, para 1355 UTC de 27 de Março de 2004. (B) Velocidade do vento derivada do satélite TRMM para às 1105 UTC de 27 de Março de 2004, junto com a imagem combinada do visível do GOES-12, com magnitudes do vento em nós (kt)..... | 16 |
| Figura 2 – Distribuição global das trajetórias e intensidades dos ciclones tropicais de 1851-2006 .....   | 21 |
| Figura 3 – Trajetória estimada para o Furacão Catarina, com suas respectivas intensidades de vento .....  | 22 |
| Figura 4 – Imagens do satélite GOES-12 no canal infravermelho realçada (A) 03UTC 20/03/04, (B) 03UTC 21/03/04, (C) 03UTC 22/03/04, (D) 03UTC 23/03/04, (E) 03UTC 24/03/04, (F) 03UTC 25/03/04, (G) 03UTC 26/03/04, (H) 03UTC 27/03/04, (I) 03UTC 28/03/04 .....   | 28 |
| Figura 5 – Ventos a 10m estimados pelo QuikSCAT (A) 20/03/04, (B) 21/03/04, (C) 22/03/04, (D) 23/03/04, (E) 24/03/04, (F) 25/03/04, (G) 26/03/04, (H) 27/03/04, (I) 28/03/04 .....  | 29 |
| Figura 6 – Composição do canal infravermelho e imagens do radar do <i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i> (TRMM). (A) 12UTC 24/03 (B) 12UTC 26/03 (C) 06UTC 27/06 (D) 11UTC 27/03/04 .....  | 32 |
| Figura 7 – Posição em projeção Mercator do domínio do modelo WRF e COAWST .....   | 34 |
| Figura 8 – Configurações de campos de dados trocados entre os modelos.....  | 38 |
| Figura 9 – Representação esquemática do modelo COAWST.....  | 39 |
| Figura 10 – Área efetiva de rastreamento dos ciclones delimitada pelo retângulo vermelho ..   | 40 |
| Figura 11 – Diagrama de fase: parâmetros B e $-V_T^L$ para análise do GFS.....  | 43 |
| Figura 12 – Diagrama de fase: parâmetros $-V_T^U$ e $-V_T^L$ para análise do GFS .....  | 44 |
| Figura 13 A – Trajetória do Ciclone Catarina com a simulação do WRF entre às 06 UTC do dia 20 até às 06 UTC do dia 28 de Março de 2004 .....  | 47 |
| Figura 13 B – Trajetória do Ciclone Catarina com a simulação do COAWST entre às 06 UTC do dia 20 até às 06 UTC do dia 28 de Março de 2004 .....   | 47 |
| Figura 13 C – Trajetória do Ciclone Catarina.....   | 48 |
| Figura 14 A – Pressão ao nível do mar (hPa) no centro do ciclone a cada 6 horas ao longo do ciclo de vida do Catarina, entre 06 UTC de 20 de Março e 06 UTC de 28 de Março para as simulações WRF (linha preta) e COAWST (linha cinza) .....  | 49 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 14 B – Pressão ao nível do mar (hPa) no centro do ciclone entre 06 UTC de 20 de Março e 06 UTC de 28 de Março para as simulações WRF (linha preta) e COAWST (linha cinza) e a estimativa feita por McTaggart-Cowan <i>et al.</i> (2006), entre às entre 06 UTC de 23 de Março e 06 UTC de 27 de Março ..... | 49 |
| Figura 15 – Pressão reduzida ao nível do mar em hPa (contorno) e temperatura da superfície do mar em °C (sombreado) entre 06 UTC do dia 20 de Março de 2004 e 06 UTC do dia 28 de Março de 2004. A coluna da esquerda representa os campos simulados pelo WRF, e a da direita, pelo COAWST .....                   | 51 |
| Figura 16 – Composição entre vento em m/s (vetores) e umidade específica em g/kg (sombreado) entre 06 UTC do dia 20 de Março de 2004 e 06 UTC do dia 28 de Março de 2004. A coluna da esquerda representa os campos simulados pelo WRF, e a da direita, pelo COAWST .....  | 54 |
| Figura 17 – Vento a 10m de altura em m/s (barbelas) e precipitação em mm (sombreado) entre 06 UTC do dia 20 de Março de 2004 e 06 UTC do dia 28 de Março de 2004. A coluna da esquerda representa os campos simulados pelo WRF, e a da direita, pelo COAWST.....   | 58 |
| Figura 18 – Fluxo de calor latente em W/m <sup>2</sup> entre 06 UTC de 20 e 06 UTC de 28 de Março de 2004. Em relação ao centro da baixa pressão, cada caixa possui 2° lado. A coluna da esquerda representa os campos simulados pelo WRF, e a da direita, pelo COAWST.....  | 61 |
| Figura 19 – Fluxo de calor latente (W/m <sup>2</sup> ) para a simulação obtida com o WRF. As caixas estão centradas no centro da baixa pressão a cada 24 horas, entre 06 UTC de 20 de Março e 06 UTC de 28 de Março de 2004. Em relação ao centro da baixa pressão, cada caixa possui 2° de lado .....             | 65 |
| Figura 20 – Fluxo de calor latente (W/m <sup>2</sup> ) para a simulação obtida com o COAWST. As caixas estão centradas no centro da baixa pressão a cada de 24 horas, entre 06 UTC de 20 de Março e 06 UTC de 28 de Março de 2004. Em relação ao centro da baixa pressão, cada caixa possui 2° de lado .....       | 66 |
| Figura 21 – Fluxo de calor sensível em W/m <sup>2</sup> entre 06 UTC de 20 de Março e 06 UTC de 28 de Março de 2004. Em relação ao centro da baixa pressão, cada caixa possui 2° de lado. A coluna da esquerda representa os campos simulados pelo WRF, e a da direita, pelo COAWST .....                          | 68 |
| Figura 22 – Fluxo de calor sensível (W/m <sup>2</sup> ) para simulação obtida com o WRF. As caixas estão centradas no centro da baixa pressão a cada 24 horas, entre 06 UTC de 20 de Março e 06 UTC de 28 de Março de 2004. Em relação ao centro da baixa pressão, cada caixa possui 2° de lado .....              | 71 |
| Figura 23 – Fluxo de calor sensível (W/m <sup>2</sup> ) para a simulação obtida com o COAWST. As caixas estão centradas no centro da baixa pressão a cada 24 horas, entre 06 UTC de 20 de Março e 06 UTC de 28 de Março de 2004. Em relação ao centro da baixa pressão, cada caixa possui 2° de lado .....         | 72 |
| Figura 24 – Diagrama de Fase relacionando os parâmetros B e -V <sub>T</sub> <sup>L</sup> para a simulação realizada com o WRF.....   | 74 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 25 – Diagrama de Fase relacionando os parâmetros $-V_T^L$ e $-V_T^U$ para a simulação realizada com o WRF .....  | 74 |
| Figura 26 – Diagrama de Fase relacionando os parâmetros B e $-V_T^L$ para a simulação realizada com o COAWST .....  | 76 |
| Figura 27 – Diagrama de Fase relacionando os parâmetros $-V_T^L$ e $-V_T^U$ para a simulação realizada com o COAWST .....   | 76 |
| Figura 28 – Perfil vertical médio na área em torno do ciclone em superfície: variação local (linha verde) advecção horizontal de temperatura em K/dia (linha azul), $S_w$ : termo relacionado ao movimento vertical em K/dia (linha vermelha) e resíduo da equação da termodinâmica (linha preta) ..... | 80 |
| Figura 29 – Evolução diária do perfil vertical médio para o termo do resíduo na simulação com o WRF .....   | 83 |
| Figura 30 – Evolução diária do perfil vertical médio para o termo do resíduo na simulação com o COAWST .....  | 83 |

## **LISTA DE TABELAS**

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Classificação Saffir-Simpson.....                         | 19 |
| Tabela 2 – Especificações das grades utilizadas pelo modelo WRF..... | 35 |
| Tabela 3 – Especificações das parametrizações físicas .....          | 36 |

## LISTA DE ABREVIATURAS

|                |   |
|----------------|---|
| <b>AER15</b>   | <i>Atmospheric and Environmental Research</i>                           |
| <b>COAWST</b>  | <i>Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport Modeling System</i> |
| <b>CAPS</b>    | <i>Center for Analysis and Prediction of Storms</i>                     |
| <b>CLP</b>     | Camada Limite Planetária  |
| <b>CPS</b>     | <i>Cyclone Phase Space</i>  |
| <b>CPTEC</b>   | Centro de Pesquisa de Tempo e Estudos Climáticos                        |
| <b>DSA</b>     | Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais                              |
| <b>EX</b>      | Extratropical   |
| <b>ERA-40</b>  | <i>European Center for Medium Range Weather Forecasts 40km</i>          |
| <b>FAA</b>     | <i>Federal Aviation Administration</i>                                  |
| <b>GFS</b>     | <i>Global Forecast System</i>   |
| <b>GSFC</b>    | <i>Goddard Space Flight Center</i>                                      |
| <b>GOES-12</b> | <i>Geostationary Operational Environmental Satellite, 12 Generation</i> |
| <b>INPE</b>    | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais                               |
| <b>H1</b>      | Furacão de Categoria 1 na Escala Saffir-Simpson                         |
| <b>H2</b>      | Furacão de Categoria 2 na Escala Saffir-Simpson                         |
| <b>HN</b>      | Hemisfério Norte  |
| <b>HS</b>      | Hemisfério Sul  |
| <b>HY</b>      | Híbrido   |
| <b>LSM</b>     | <i>Land - Surface Model</i>   |
| <b>MCT</b>     | <i>Model Coupling Toolkit</i>   |
| <b>MM5</b>     | <i>Similarity Theory</i>  |
| <b>MMM</b>     | <i>Mesoscale &amp; Microscale Meteorology Laboratory</i>                |

|              |  |
|--------------|--|
| <b>MODIS</b> | <i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>   |
| <b>MRF</b>   | <i>Medium Range Forecast model</i>   |
| <b>NASA</b>  | <i>National Aeronautics and Space Administration</i>   |
| <b>NCH</b>   | <i>National Hurricane Center</i>   |
| <b>NCAR</b>  | <i>National Center Atmospheric Research</i>  |
| <b>NCEP</b>  | <i>National Center for Environmental Prediction</i>  |
| <b>NOAA</b>  | <i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>   |
| <b>NOAH</b>  | <i>National Center for Environmental Prediction (NCEP)/Oregon State University/ Air Force Weather Agency (AFWA)/ Hydrologic Research Lab (HRL)</i> |
| <b>PBL</b>   | <i>Planetary Boundary Layer</i>  |
| <b>PNMM</b>  | <i>Pressão Reduzida ao Nível Médio do Mar</i>  |
| <b>POP</b>   | <i>Parallel Ocean Program</i>  |
| <b>ROMS</b>  | <i>Regional Ocean Modeling System</i>  |
| <b>RRGTM</b> | <i>Rapid Radiative Transfer Model for General Circulation Models</i>   |
| <b>SODA</b>  | <i>Simple Ocean Data Assimilation</i>  |
| <b>SWAN</b>  | <i>Simulating Waves Nearshore</i>  |
| <b>TRMM</b>  | <i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i>   |
| <b>TSM</b>   | <i>Temperatura da superfície do mar</i>  |
| <b>TS</b>    | <i>Tempestade Topical</i>  |
| <b>TT</b>    | <i>Transição Tropical</i>  |
| <b>UTC</b>   | <i>Coordinated Universal Time</i>  |
| <b>WSM-5</b> | <i>WRF Single Moment com cinco diferentes categorias</i>   |
| <b>YSU</b>   | <i>Yonsei University</i>   |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                    |   |
|--------------------|---|
| $\partial$         | Operador derivada local   |
| $^2$               | Quadrado  |
| <b>B</b>           | Parâmetro de simetria térmica ou de espessura do ciclone                    |
| $c_p$              | Calor específico à pressão constante  |
| <b>g</b>           | Gramas  |
| <b>h</b>           | Hora  |
| <b>hPa</b>         | Hectopascal   |
| <b>J</b>           | Taxa de aquecimento diabático   |
| <b>K</b>           | Kelvin  |
| <b>km</b>          | Quilômetros   |
| <b>m</b>           | Metros  |
| <b>mm</b>          | Milímetros  |
| $^{\circ}$         | Grau  |
| $^{\circ}\text{C}$ | Graus Celsius   |
| <b>p</b>           | Pressão   |
| <b>s</b>           | Segundo   |
| <b>T</b>           | Temperatura   |
| $V_T^L$            | Parâmetro do vento térmico em baixos níveis                                 |
| $V_T^U$            | Parâmetro do vento térmico em altos níveis                                  |
| <b>W</b>           | Watts   |
| $Z_{\max}$         | Altura Geopotencial na borda do círculo de raio 500 km centrado no ciclone  |
| $Z_{\min}$         | Altura Geopotencial no centro do círculo de raio 500 km centrado no ciclone |
| $\Delta T$         | Variação da temperatura   |
| $\omega$           | Pseudo-velocidade vertical  |
| $\overline{V_H}$   | Vento horizontal  |

## RESUMO

Do ponto de vista climatológico, o Oceano Atlântico Sul apresenta condições desfavoráveis para a formação de ciclones tropicais. No entanto, a ocorrência do Ciclone Catarina em Março de 2004, classificado como furacão categoria 1, direciona diversos estudos até os dias atuais. Sua intrigante evolução e mudança de trajetória são questões ainda exploradas do ponto de vista da modelagem numérica regional, e este é justamente o foco deste trabalho. Foram analisadas simulações realizadas com o modelo regional acoplado COAWST – *Coupled Ocean-Atmosphere Wave Sediment Transport Modeling System*, acionando apenas seu componente atmosférico, o *Weather Research and Forecasting* (WRF), ou este juntamente como o componente oceânico, o *Regional Ocean Modeling System* (ROMS). Com este procedimento, buscou-se avaliar se a representação numérica do acoplamento em escala regional entre o oceano e a atmosfera é capaz de diferenciar os mecanismos e processos do Ciclone Catarina. As análises comparativas envolveram: os campos meteorológicos de vento, umidade, precipitação, pressão atmosférica, calor latente e calor sensível; determinação de trajetórias do sistema em cada simulação; plotagens no *Cyclone Phase Space* (CPS); e cálculo dos termos do balanço de calor. Em termos das trajetórias, pode-se dizer que as duas simulações (WRF e COAWST) tiveram um razoável desempenho; do ponto de vista da intensidade da baixa pressão, a simulação COAWST teve uma representação mais adequada, e com relação à intensidade dos ventos, ambas foram deficientes em simular adequadamente seu comportamento. É preciso ressaltar que a simulação COAWST apresentou valores inferiores de temperatura da superfície do mar (TSM) em relação à simulação WRF, fato que influenciou diretamente os fluxos de calor sensível e latente. No CPS, as simulações diferiram razoavelmente entre si, uma vez que o sistema não ocupa os mesmos quadrantes dos diagramas em ambas as simulações. Cabe ressaltar que a simulação COAWST sugere que o Catarina tenha se dissipado como sistema de núcleo quente profundo, enquanto que a simulação WRF o tenha representado como núcleo quente moderado. A análise do balanço de calor através da equação da termodinâmica não foi suficiente para esclarecer os mecanismos e processos na evolução do sistema das distintas simulações.

Palavras-chave: Catarina, WRF, COAWST, Modelo Regional Acoplado.

## **ABSTRACT**

From the climatological perspective, the South Atlantic Ocean has unfavorable conditions for the formation of tropical cyclones. However, the flagship event of the Cyclone Catarina in March 2004, classified as a Category 1 hurricane, directs several studies to the present day. His intriguing evolution and change of trajectory are still issues explored from the point of view of regional numerical modeling, and this is precisely the focus of this work. Simulations were analyzed with the coupled regional model COAWST - Coupled Ocean-Atmosphere Wave Sediment Transport Modeling System, turning on only its atmospheric component, the Weather Research and Forecasting (WRF), as well as its association to the oceanic component, the Regional Ocean Modeling System (ROMS). With this procedure, we sought to assess whether the coupled numerical representation at the regional level between the ocean and the atmosphere is able to differentiate the mechanisms and processes that governed the Cyclone Catarina. Comparative analyzes involved: the meteorological fields of wind, humidity, precipitation, atmospheric pressure, latent heat and sensible heat; determination of system trajectories in each simulation; plots in Cyclone Phase Space (CPS); and calculating the terms of heat balance. In terms of the trajectories, it's possible to say that the two simulations (WRF and COAWST) had reasonable performance; from the viewpoint of low pressure intensity, COAWST simulation had a better representation, and in relation to the intensity of winds, both were deficient in adequately simulate their behavior. It should be emphasized that the COAWST simulation showed lower values of sea surface temperature (SST) from the WRF simulation, a fact that directly influenced the sensible and latent heat fluxes. In CPS, the simulations differ among themselves fairly, since the system does not occupy the same quadrant of the diagram in both simulations. It should be noted that the COAWST simulation suggests that Catarina has dissipated as deep warm core system, while the WRF simulation has represented as the moderate warm core. The heat balance analysis by thermodynamic equation was not enough to elucidate the mechanisms and processes that governed the evolution of the system in different simulations.

**Keywords:** Catarina, WRF, COAWST, Coupled Regional Model.



# 1. INTRODUÇÃO

Em Março de 2004, o Atlântico Sul teve a primeira ocorrência de um ciclone com particularidades de um furacão. Esse sistema, que foi denominado de Catarina, teve como origem uma baixa despreendida, cercada por jatos intensos ao norte e ao sul. Entre os dias 19 e 20 de Março, um ciclone extratropical se formou no oceano próximo à costa do Estado de São Paulo, tendo um desenvolvimento típico com deslocamento para leste até o dia 23 de Março. Logo em sequência o sistema evoluiu para um sistema do tipo nuvem vírgula invertida, que é um vórtice formado no interior de uma imensa bolha fria, com núcleo quente pelo afundamento de ar superior e liberação de calor latente. A partir dessa evolução, o sistema começou o trajeto para o sul e oeste, sendo que no dia 25 foi verificado que o núcleo do ciclone possuía a formação visual clássica de um “olho de um furacão” e finalmente entre a noite do dia 27 e a madrugada do dia 28, Catarina chega entre à costa dos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (Bonatti *et al.*, 2004; Silva Dias *et al.*, 2004; McTaggart-Cowan *et al.*, 2006; Gan, 2009).

Apesar de visualmente o Catarina possuir características semelhantes a de um furacão, e também em relação aos danos por ele causados, os aspectos de sua estrutura física e de parâmetros considerados no mínimo necessários durante as três fases (início, desenvolvimento e maturação) dividiram a comunidade meteorológica, de modo que na literatura encontra-se diversas classificações para o ciclone Catarina, tais como: ciclone extratropical, ciclone tropical (furacão), ciclone híbrido e baixa polar (Bonatti *et al.*, 2004; Silva Dias *et al.*, 2004; McTaggart-Cowan *et al.*, 2006; Gan, 2009).

De qualquer forma, embora ainda haja discussões a respeito de sua natureza, não há dúvidas que esse foi um raro sistema. Mesmo após 10 anos de sua passagem pelo litoral sul brasileiro, suas peculiaridades são instigantes. Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar o papel do acoplamento oceano-atmosfera na representação do ciclone Catarina.

Esta análise será realizada através de simulações numéricas com o modelo WRF versão 3.4 e também com o modelo COAWST (WRF+ROMS). O trabalho está organizado como se segue: no capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre ciclones extratropicais, tropicais, subtropicais (híbridos), transição tropical, ciclone Catarina; o capítulo 3 traz uma descrição dos modelos WRF, ROMS, COAWST, além da metodologia e os dados utilizados neste trabalho; o capítulo 4 apresenta e discute os resultados, e o capítulo 5 traz as conclusões e considerações finais.

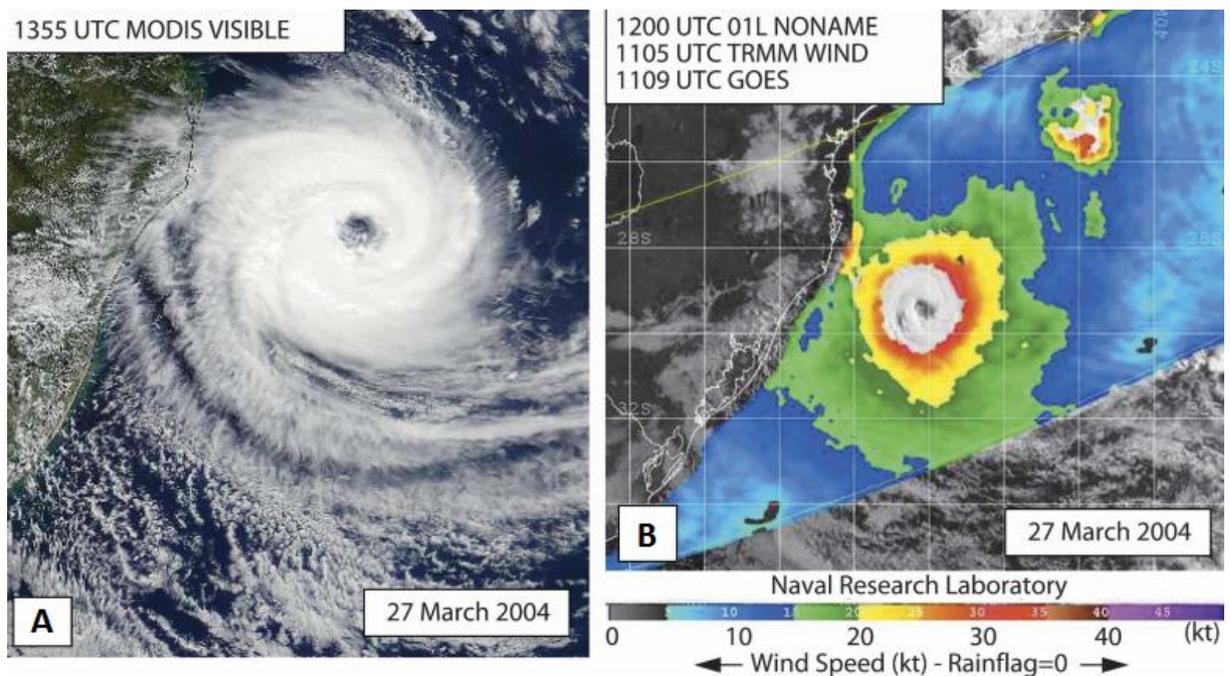


Figura 1 – (A) Imagem de alta resolução no canal visível (1 km) do sensor MODIS que está a bordo do satélite Terra, para 1355 UTC de 27 de Março de 2004. (B) Velocidade do vento derivada do satélite TRMM para às 1105 UTC de 27 de Março de 2004, junto com a imagem combinada do visível do GOES-12, com magnitudes do vento em nós (kt). Fonte: Adaptado de McTaggart-Cowan *et al.* (2006).

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é investigar a influência do acoplamento do modelo oceânico na representação do ciclone Catarina, procurando entender como o acoplamento modifica o ambiente característico e os mecanismos termodinâmicos associados a evolução do ciclone. Como objetivos específicos podem ser elencados:

- Identificar os valores mínimos de pressão do ciclone Catarina em cada uma das simulações, através do esquema numérico de identificação automática de pressão;
- Identificar a influência de cada simulação nos elementos precipitação e vento;
- Avaliar a estrutura do ciclone em cada simulação;
- Avaliar os perfis verticais do ciclone em cada simulação; e
- Utilizar a equação do balanço de calor, no intuito de identificar os principais processos termodinâmicos de cada simulação.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 CICLONES**

Ciclones são fenômenos meteorológicos gerados pela queda da pressão atmosférica na superfície e estão associados a movimentos circulatorios do ar, o que resulta em uma área de atuação que varia de centenas a milhares de quilômetros.

De acordo com seu processo de formação, características físicas e posição geográfica da sua gênese, esses sistemas possuem diferentes nomenclaturas, podendo ser classificados como tropicais, subtropicais (híbridos) ou extratropicais, sendo que estes fenômenos têm grande importância na circulação atmosférica, já que são redistribuidores de energia. Apesar dos ciclones surgirem e se desenvolverem dentro de fortes condições de instabilidade e geralmente se apresentarem com fortes ventos, seus ciclos de vida se desenrolam com o objetivo de estabilizar e homogeneizar a atmosfera.

Até meados da década de 50, a classificação do ciclo de vida dos ciclones considerava somente dois tipos: os tropicais e os extratropicais, que eram então caracterizados através de uma única fase definida e distinta durante o ciclo de vida. (BJERKNES, 1919; BJERKNES e SOLBERG, 1922; CHARNEY, 1947; EADY, 1949; CHARNEY e ELIASSEN, 1964).

Décadas mais tarde essa classificação passou a ser revista em trabalhos que observaram que alguns sistemas não se encaixavam completamente nas descrições dos sistemas, e verificaram a existência de processos de transição, que davam uma forma “híbrida” ao sistema, de modo que em alguns instantes os sistemas apresentavam certa estrutura e após um período, já era possível observar uma estrutura completamente diferente, passando a ser chamados de ciclones subtropicais ou híbridos (BEVEN, 1997 e GUISHARD *et al.*, 2006).

#### **2.1.1 CICLONE EXTROPICAL**

Os primeiros estudos sobre ciclones extratropicais foram realizados por Bjerknes, 1919. De qualquer modo, é importante salientar que a ideia de que se formam como um resultado da interação de duas massas de ar (uma de origem polar e outra de origem tropical) já ser conhecida desde 1863, no trabalho de Fitz-Roy. No modelo conceitual proposto por Bjerknes foi considerado apenas informações meteorológicas de superfície, e foi mostrado esquematicamente que junto à interface entre duas massas de ar (uma fria e outra quente), a atuação de alguma perturbação promovia o deslocamento relativo entre as massas de ar, fazendo com que o ar frio fosse “empurrado” na direção do ar quente e vice-versa. Deste modo, em

função da diferença de densidade, o ar frio força a ascensão do ar quente, o que contribui para o peso da coluna atmosférica diminuir, propiciando uma circulação ciclônica em superfície, que por sua vez tem a capacidade de definir um ramo frontal frio e outro quente. O ramo frio, em geral, gira com maior velocidade em volta da baixa pressão, e pode acabar alcançando o ramo quente, quando ocorre a oclusão.

Anos mais tarde, Bjerknes e Solberg, 1922 formularam a Teoria da Frente Polar. Neste trabalho destaca-se o papel fundamental da força de Coriolis, que é responsável pelo sentido da circulação (horária ou anti-horária) do ciclone dependendo do hemisfério, além do gradiente de pressão que desloca o ciclone e da atuação da fricção que age diminuindo a energia do sistema.

A partir disto, vários estudos começaram a ser feitos até que, anos mais tarde, o trabalho de Sutcliffe (1947) mostrou que o processo de intensificação do ciclone ocorre principalmente através da advecção de temperatura em baixos e médios níveis da troposfera, que amplificam as ondas em altos níveis e conseqüentemente o gradiente vertical de vorticidade ciclônica, originando a primeira equação de descrição de desenvolvimento dos ciclones.

Assim, de modo geral os ciclones extratropicais são caracterizados pela assimetria térmica horizontal, isto é, possuem uma frente fria e outra frente quente e por um núcleo frio em toda a troposfera; além disso, se formam através da instabilidade baroclínica, que ocorre devido à presença de forte cisalhamento vertical do vento horizontal associado aos gradientes horizontais de temperatura nestas regiões. (CHARNEY, 1947).

### **2.1.2 CICLONE TROPICAL**

Os ciclones tropicais são sistemas de baixa pressão de escala sinótica que se formam sobre os oceanos tropicais ou subtropicais e que são alimentados principalmente pela transferência de calor latente entre a interface oceano-atmosfera (CHARNEY; ELIASSEN, 1964). Segundo Gray (1968), as condições necessárias para a formação de um ciclone tropical e suas características são:

- Ocorrem em grande escala (diâmetro da ordem de centenas de quilômetros);
- Ocorrem sobre águas oceânicas quentes ( $TSM > 26^{\circ}C$ );
- Possuem aporte de umidade em 700hPa;
- Possuem instabilidade condicional;
- Possuem vorticidade relativa intensificada na troposfera inferior;
- Possuem fraco gradiente horizontal de temperatura em baixos níveis;
- Possuem convecção organizada;

- Possuem ventos fortes;
- Não estão associados a uma frente fria;
- Possuem simetria e uma região com ausência de nebulosidade, conhecida como “olho”.

No que diz respeito ao seu potencial para geração de vento e a capacidade de destruição associada, os ciclones tropicais são classificados de acordo com a escala Saffir-Simpson:

Tabela 1 – Classificação Saffir-Simpson. Fonte: Adaptada do *National Weather Service/National Hurricane Center* (NOAA/NCH).

| <b>Categoria</b> | <b>Velocidade do vento (km/h)</b> |
|------------------|-----------------------------------|
| 1                | 119 – 153                         |
| 2                | 154 – 177                         |
| 3                | 178 – 208                         |
| 4                | 209 – 251                         |
| 5                | > 252                             |

Tipicamente esses ciclones ocorrem nas regiões tropicais e sua nomenclatura varia de acordo de onde é observado, sendo chamado de Furacão (Oceano Atlântico e Oceano Pacífico Leste), Ciclone Tropical (Oceano Índico e regiões adjacentes da Austrália), e Tufão (Oceano Pacífico Oeste).

Os ciclones tropicais ocorrem na época mais quente do ano, especialmente no final do verão e início do outono, pois um dos principais combustíveis para seu desenvolvimento é a temperatura elevada na superfície do mar (SANFORD *et al.*, 1987).

Os ciclones tropicais caracterizam-se por um núcleo quente verticalmente alinhado (barotrópico) e muito profundo, indo desde a superfície até a tropopausa; o maior aquecimento ocorre nas camadas superiores da troposfera. O processo primordial que garante a sustentação do ciclone tropical ocorre através de fluxos de calor latente intensos da superfície do oceano (EMANUEL, 1986, 2003).

Para ocorrer a ciclogênese tropical, há uma exigência mínima de força de Coriolis para que o distúrbio de baixa pressão seja mantido, juntamente com o balanço de vento gradiente. Sendo assim os ciclones tropicais tipicamente ocorrem a uma distância mínima de 500km do equador. Além disso, possuem pouca variação nos ventos entre as camadas baixas e altas da troposfera (McBRIDE e ZEHR,1981).

### **2.1.2 CICLONE SUBTROPICAL**

Apesar das classificações apresentadas acima sobre os ciclones, observa-se que diversos sistemas não fazem parte dos tipos clássicos tropicais ou extratropicais, por apresentarem comportamentos diferenciados, por possuírem características físicas variando entre esses dois tipos de ciclone e, até mesmo, começando sua evolução com uma certa configuração, mas ao longo de seu desenvolvimento sofrendo transições e se dissipando com outra característica. Trabalhos como de Hart (2003) e Pezza e Simmonds (2008), passaram a classificar esses tipos de ciclones como híbridos.

Os ciclones subtropicais, ou híbridos, apresentam combinações em seus dos ciclos de vida. Sendo assim, possuem núcleos frios em altos níveis e quentes em baixos níveis. Sua formação no Hemisfério Norte (HN) é baroclínica na presença de vortacidade ciclônica sobre temperatura da superfície do mar quente (GUISHARD *et al.*, 2007). Além disso, diferentes mecanismos dinâmicos e termodinâmicos podem estar associados à formação destes ciclones, dependendo da região do globo.

### **2.3 O CICLONE CATARINA**

O ciclone Catarina é considerado por diversos autores como o primeiro “Furacão do Brasil”. Sua formação e características físicas deixaram muitas dúvidas entre os especialistas de todo o mundo. O ciclone ocorreu sobre águas frias em trono de 25°C, fora dos padrões de formação de um furacão clássico (SILVA *et al.*, 2004).

Os modelos numéricos convencionais de previsão de tempo e as análises numéricas não conseguiram detectar o fenômeno, provocando dificuldade para prever sua trajetória, intensidades dos ventos, precipitações e outros fatores meteorológicos (MENEZES e SILVA DIAS, 2004).

De acordo com Pezza e Simmonds (2005), altos valores de temperatura da superfície do mar (TSM), fraco cisalhamento vertical do vento e um forte bloqueio entre médias e altas latitudes levaram à formação do Catarina e permitiram o seu deslocamento para oeste. Além disso, há menção de que o Catarina pode ter ocorrido devido às mudanças climáticas.

Na imagem abaixo (Figura 2) verifica-se que no Atlântico Sul, no período em análise somente é identificado o Ciclone Catarina, e ele é considerado como Ciclone Tropical.

### Tracks and Intensity of Tropical Cyclones, 1851-2006

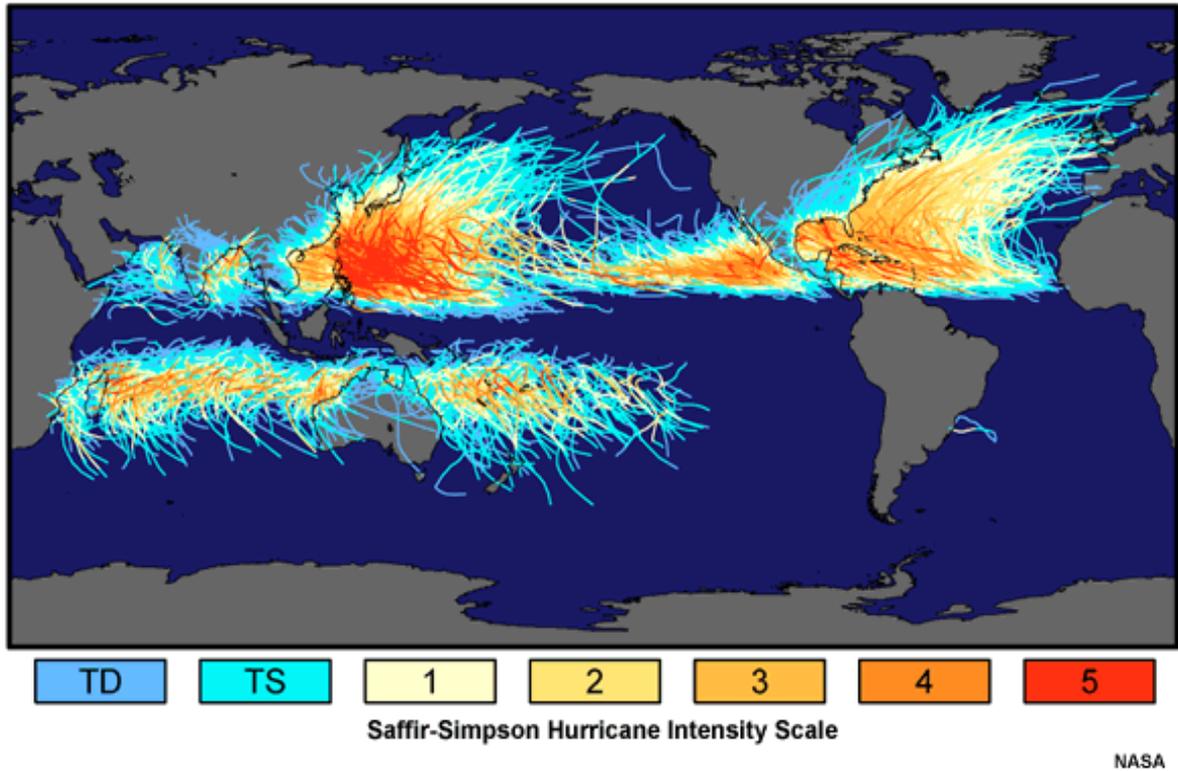


Figura 2 – Distribuição global das trajetórias e intensidades dos ciclones tropicais de 1851 - 2006. Fonte: COMET® MetEdu. Disponível em: [http://www.meted.ucar.edu/tropical/textbook\\_2nd\\_edition/navmenu.php?tab=9&page=1.0.0](http://www.meted.ucar.edu/tropical/textbook_2nd_edition/navmenu.php?tab=9&page=1.0.0)

McTaggart-Cowan *et al.* (2006) publicaram um estudo aprofundado com análises sinóticas e dinâmicas que favoreceram a ocorrência do Catarina. Eles destacam que o deslocamento para oeste do ciclone foi consequência de um bloqueio do tipo dipolo no Oceano Atlântico, em uma região próxima da área de atuação do Catarina. Além disso, estes autores ainda apresentam uma tabela e gráfico com a trajetória, pressão atmosférica ao nível médio do mar e a velocidade do vento do Catarina. Neste trabalho são apresentados valores de pressão, que segundo estimativa chega a 972 hPa no dia 27 de Março a partir das 12 UTC, com ventos de 85 nós, sendo considerado um furacão de categoria 2 às 06 UTC do dia 28. Esses dados são provenientes da análise feita por R. Edson da Universidade de Guam, e podem ser visualizados na Figura 3.

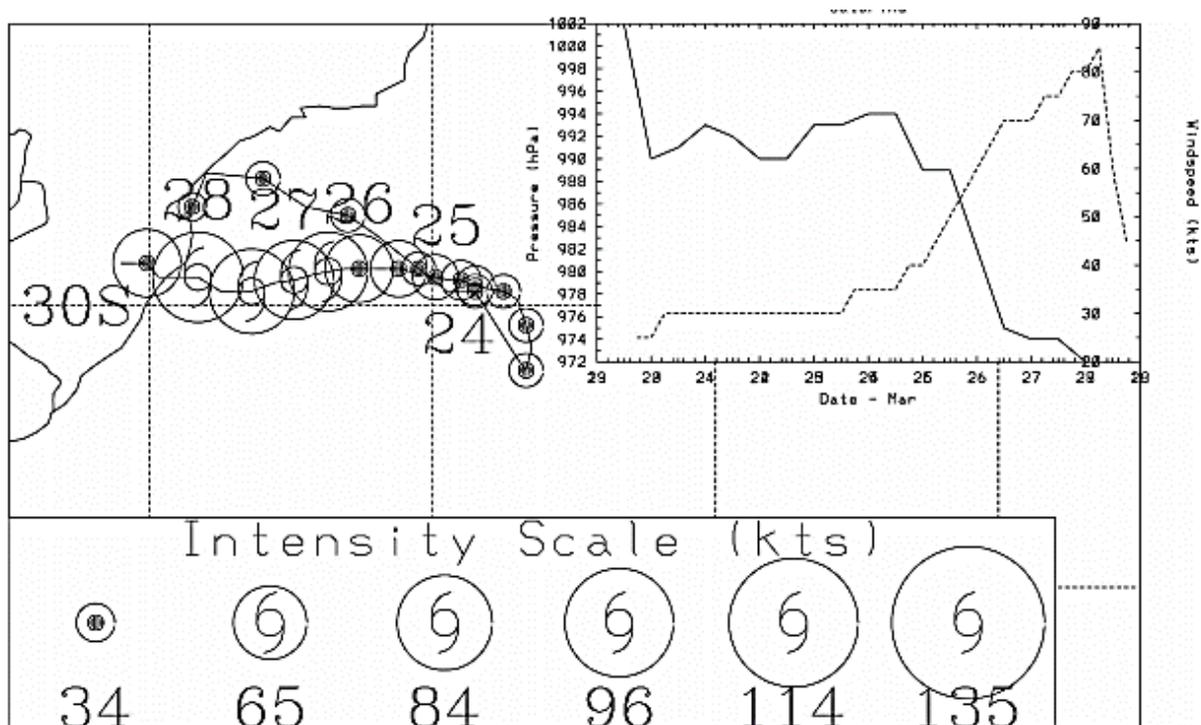


Figura 3 – Trajetória estimada para o Furacão Catarina, com suas respectivas intensidades de vento. Fonte: McTaggart-Cowan *et al.* (2006).

Bonatti *et al.* (2006) realizaram simulações utilizando o modelo global do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), os resultados obtidos mostraram que a alta resolução do modelo melhorou a intensidade da baixa pressão e ventos em superfície, mas mesmo assim, ainda não reproduziu a intensidade observada e sugeriram a necessidade da utilização de modelos de mesoescala não-hidrostáticos.

Veiga *et al.* (2008) ao analisarem a energética do processo de transformação de um ciclone extratropical para o furacão Catarina, através do diagrama de Lorenz, mostraram que a maioria das transições ocorreram com uma súbita e profunda mudança na dinâmica de ciclo da energia ambiental durante a fases iniciais do desenvolvimento do Catarina. Estas mudanças abruptas coincidiram com a fase do sistema da baixa despreendida. A conversão de energética apresentado pelo ciclo de Lorenz, estava de acordo com a importância do bloqueio em facilitar a transição.

Gan (2009) em sua análise sinótica a partir de dados do *National Center for Environmental Prediction/National Center Atmospheric Research* (NCAR/NCEP), nos horários das 00, 06, 12 e 18 UTC destaca que no dia 22 de Março às 00UTC, havia uma bifurcação do escoamento do ar em altos níveis sobre a América do Sul, além de um cavado sobre a frente fria que favoreceu a advecção de vorticidade relativa no seu setor leste, e assim contribuiu para a formação do ciclone em superfície. Além disso, ao analisar os fluxos de calor em superfície, foi encontrada a existência de centros máximos de fluxo de calor sensível ( $50 \text{ W/m}^2$ ) e latente ( $250 \text{ W/m}^2$ ) entre a costa da região sul do Brasil e a posição do centro do ciclone em superfície. Esses máximos estavam mais intensos durante o desenvolvimento do ciclone, até o dia 24 de Março, quando começaram a enfraquecer. Por fim, Gan (2009) concluiu que Catarina teve características dinâmicas bem definidas, tais como:

- Origem baroclínica na fase inicial;
- Estava desprendido do sistema baroclínico na sua fase intensa;
- Fluxos de calor na superfície contribuíram para a intensificação;
- Teve convecção bem organizada ao redor de um olho, semelhante ao que ocorre com os furacões.

Vianna *et al.* (2010) analisaram o papel do oceano na formação e evolução do Catarina a partir de informações de temperatura do oceano na superfície, profundidade e circulação; foram encontrados núcleos quentes isolados, que como sugerido pelos autores, podem ter tido grande influência nas mudanças bruscas na estrutura, tanto na intensificação dos ventos e principalmente na transformação de um ciclone extratropical em um ciclone tropical.

Diversos trabalhos (MENEZES e SILVA DIAS, 2004; SILVA DIAS *et al.*, 2004; KUBOTA *et al.*, 2006) destacam o fato de nenhum modelo de previsão de tempo operacional (modelos globais e regionais) ter conseguido prever adequadamente a intensidade do fenômeno.

Menezes e Silva Dias (2004) sugeriram que os modelos globais e regionais devido a sua resolução mais baixa, não resolvem bem a liberação de calor latente na atmosfera e isso deve ter sido uma das principais causas da deficiência destes modelos em prever o caso adequadamente.

Mathias (2012) utilizou os diagramas de fase do CPS e observou que os resultados apontavam que suas características tropicais poderiam estar relacionadas a um ciclone mais aprofundado e intenso do que estava sendo previsto nos campos meteorológicos dos modelos. Além disso, Mathias, ainda comenta que para os ciclones tropicais, além da melhoria da resolução espacial e temporal, são necessárias também boas condições de contorno de TSM.

No caso do ciclone Catarina, o conhecimento prévio de sua estrutura e de seu deslocamento para oeste poderia contribuir na previsão de sua intensificação durante sua aproximação da costa da região Sul. Seria mais fácil prever que o ciclone se intensificaria na presença das águas mais aquecidas da corrente do Brasil junto à costa, pois ele apresentou núcleo quente e não tinha como principal fonte de energia os contrastes de massas de ar (não-frontal), tendo em vista que se deslocou dentro de uma massa de ar relativamente fria e homogênea. Sem esse conhecimento, muitos poderiam pensar que o ciclone se enfraqueceria em virtude da fraca baroclinia e por estar se deslocando em uma massa de ar sem contrastes térmicos. Afinal, baixas desprendidas de sistemas frontais não costumam perdurar por muito tempo após perderem o seu suporte dinâmico e após a completa exaustão da energia potencial derivada dos contrastes de massas de ar, ocasionando o seu rápido decaimento e consequente enfraquecimento dos ventos.

Silva (2014), avaliou o impacto dos processos de subgrade, resolução e assimilação de dados no modelo BRAMS nas simulações do furacão Catarina. Foram realizados experimentos para avaliar o impacto da resolução vertical (horizontal), e o aumento da resolução teve um impacto direto na queda na pressão reduzida ao nível do mar no centro do sistema ciclônico e intensificação dos ventos ao seu redor. Este autor ainda comenta que o modelo não conseguiu reproduzir a intensidade do Catarina e também mostrou uma defasagem no tempo em seu deslocamento.

Em trabalho recente, Radu *et al.* (2014) estudaram a influência da temperatura atmosférica e da superfície do mar no impacto sobre o tamanho ciclone e verificaram que o tamanho do ciclone tropical aumenta proporcionalmente ao fluxo de calor latente da superfície, quando a temperatura da superfície atmosférica e do mar são aumentadas. Além disso, existe uma relação linear clara entre o aumento do tamanho e fluxo de calor latente durante a vida do ciclone.

Gozzo (2014) fez simulações utilizando o WRF, e mesmo com diferentes parametrizações, resoluções horizontais e domínios de simulação, não conseguiu atingir a pressão mínima no trabalho de McTaggart-Cowan *et al.* (2006), porém representou bem o perfil

da queda de pressão, de modo que às 00UTC do dia 27 o sistema alcançou o mínimo de pressão de 987 hPa.

Correa (2014) também utilizou o WRF e, em relação a comparação do vento com os dados do QuikSCAT a 10m de altura, o modelo não representou bem ventos intensos (acima de 35 nós). Este autor comenta que vários fatores podem explicar isto: resoluções horizontais das grades utilizadas; qualidade dos dados de inicialização e de contorno das simulações; opções das parametrizações físicas adotadas; e número de níveis verticais utilizados.

A seguir encontram-se sequências de figuras que representam a evolução do Catarina com informações de imagens de satélite no canal infravermelho, estimativas de vento através do QuikSCAT e estimativas de chuva pelo TRMM. A Figura 4 representa o satélite GOES-12 entre 03UTC de 20 de Março de 2004 e 03UTC do dia 28 de Março de 2004, sendo os dias representados respectivamente como: 20/03 (Figura 4A), 21/03 (Figura 4B), 22/03 (Figura 4C), 23/03 (Figura 4D), 24/03 (Figura 4E), 25/03 (Figura 4F), 26/03 (Figura 4G), 27/03 (Figura 4H), 28/03 (Figura 4I). No dia 20 de Março de 2004, observa-se o desenvolvimento e formação de baixa pressão (Figura 4A). Na vanguarda desta baixa, nota-se a nebulosidade associada a um ciclone extratropical que já estava formado. Já no dia 23 (Figura 4C) a baixa pressão se desprende da frente fria. A Figura 4D mostra a evolução do sistema, enquanto o centro de baixa pressão deslocou-se para sudeste/leste, a frente fria deslocou-se para leste/nordeste. Observa-se na Figura 4E um sistema de nuvem “vírgula”, enquanto na Figura 4F a convecção se intensificou e a forma de nuvem vírgula ficou mais evidente. A partir disso, o Catarina manteve o deslocamento para oeste e continuou se intensificando (Figura 4G). Na sequência da sua trajetória, já é perceptível a presença do “olho” (Figura 4H) e na madrugada do dia 28 (Figura 4I), o Catarina chega ao litoral sul brasileiro.

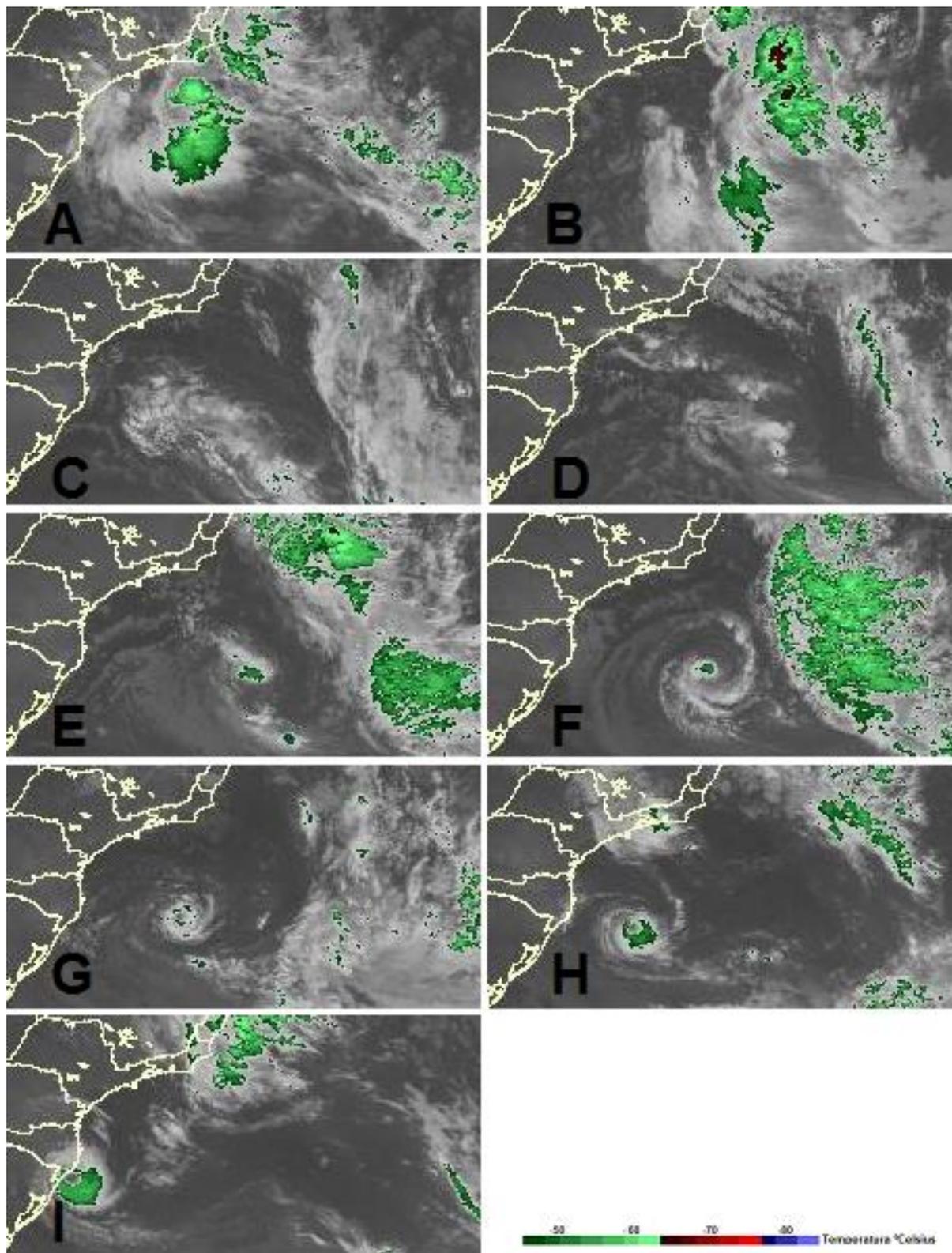


Figura 4 – Imagens do satélite GOES-12 no canal infravermelho realçada (A) 03UTC 20/03/04, (B) 03UTC 21/03/04, (C) 03UTC 22/03/04, (D) 03UTC 23/03/04, (E) 03UTC 24/03/04, (F) 03UTC 25/03/04, (G) 03UTC 26/03/04, (H) 03UTC 27/03/04, (I) 03UTC 28/03/04. Fonte: CPTEC/DSA/INPE.

As figuras seguintes referem-se aos dados de vento do satélite QuikSCAT que está em órbita em junho de 1999, pela NASA. A bordo do QuikSCAT existe um escaterômetro, denominado SeaWinds, que mede a intensidade e direção do vento a 10m de altura em relação à superfície do mar. A precisão das medidas das velocidades dos ventos é de 2m/s para valores entre 3m/s e 20 m/s e de 20° na direção dos ventos. A resolução horizontal da parcela discriminada pelo sensor é de 25km. Estas informações estão disponíveis em <http://winds.jpl.nasa.gov/>.

Na Figura 5A, observa-se que as intensidades dos ventos variam em torno de 10-15 nós no centro da baixa, mas em alguns pontos registra-se 30 nós. No dia 21 (Figura 5B), o sistema se intensifica e ventos máximos de 30 nós são observados em uma área mais abrangente. Na Figura 5C em torno do centro da baixa foram observados valores próximos a 20 e 30 nós. Na Figura 5D chama-se atenção para o fato do vento ter diminuído sua intensidade em torno de 5 nós. Entre os dias 24 a 28 (Figuras 6E, 6F, 6G, 6H e 6I), observa-se a mudança de trajetória do Catarina, com deslocamento para oeste e com a intensificação seus ventos. Na Figura 5G, referente ao dia 26/03 observa-se ventos de até 50 nós. No dia 28 quando avança sobre o continente (Figura 5I), os ventos próximos a costa são bastante variáveis, mas chegam até 25 nós. As Figuras 6E e 6H não mostram os valores próximos ao centro de baixa por conta da varredura do satélite.

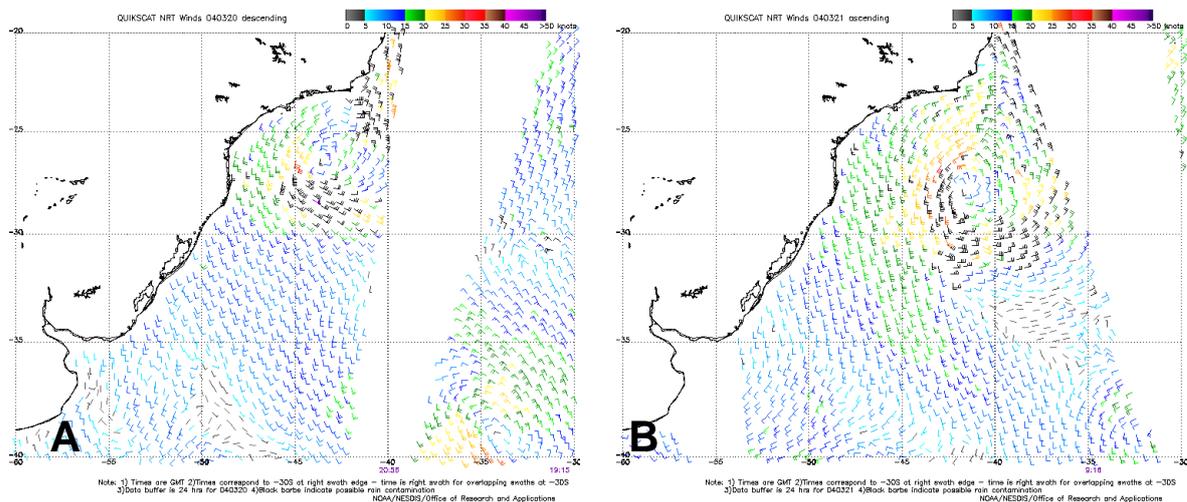


Figura 5 – Ventos a 10m estimados pelo QuikSCAT: (A) 20/03/04, (B) 21/03/04, (C) 22/03/04, (D) 23/03/04, (E) 24/03/04, (F) 25/03/04, (G) 26/03/04, (H) 27/03/04, (I) 28/03/04. Fonte: JPL/NASA.

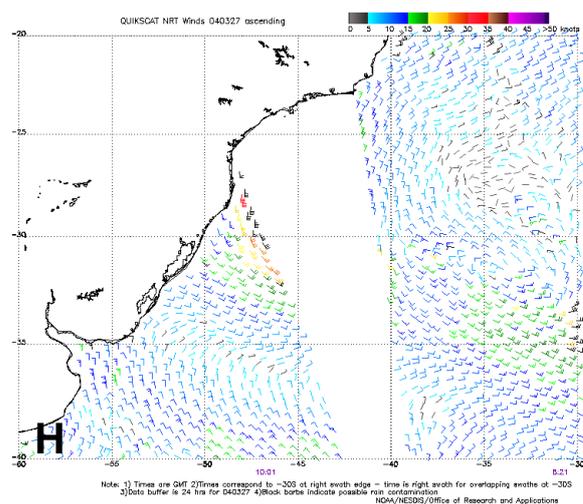
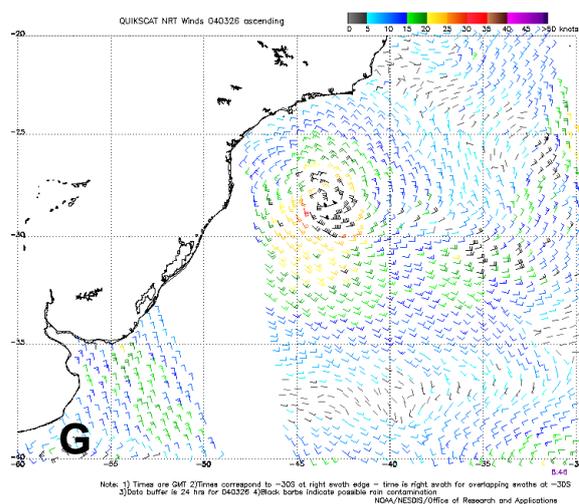
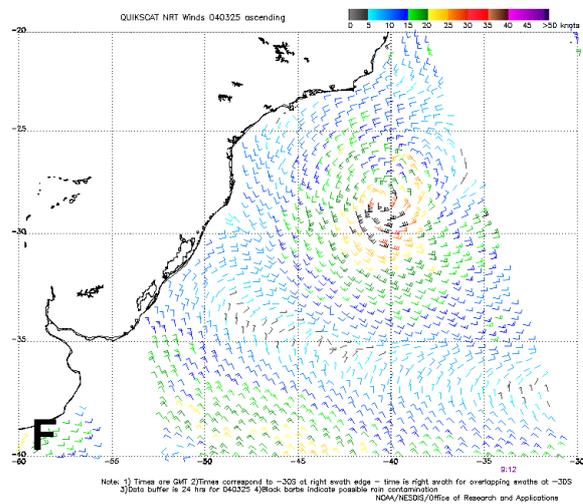
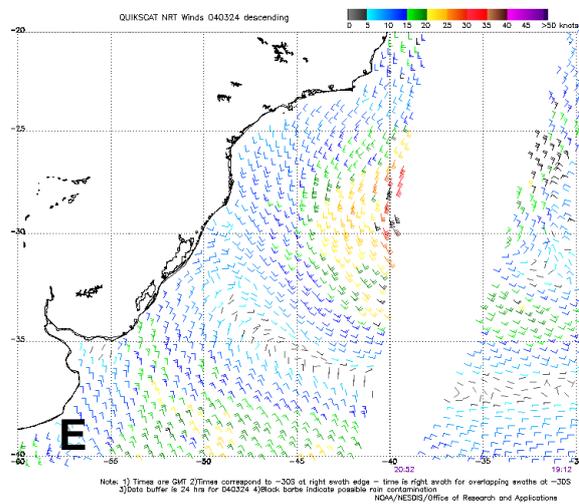
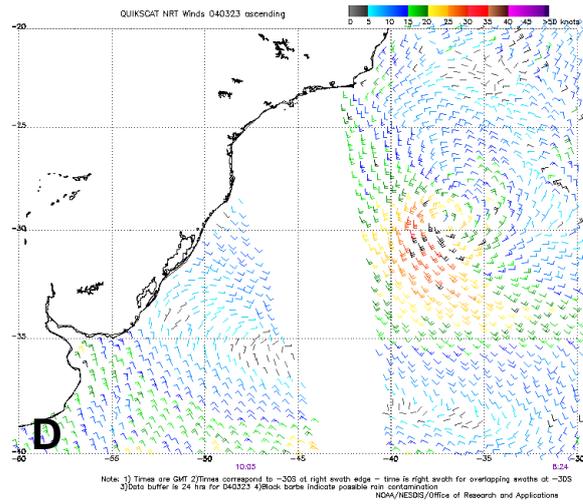
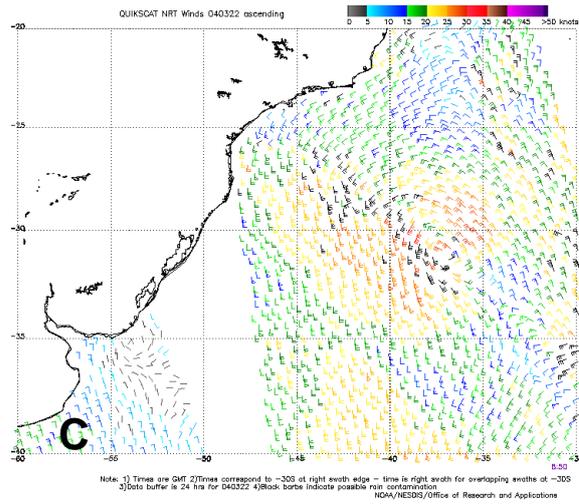


Figura 5 – Continuação.

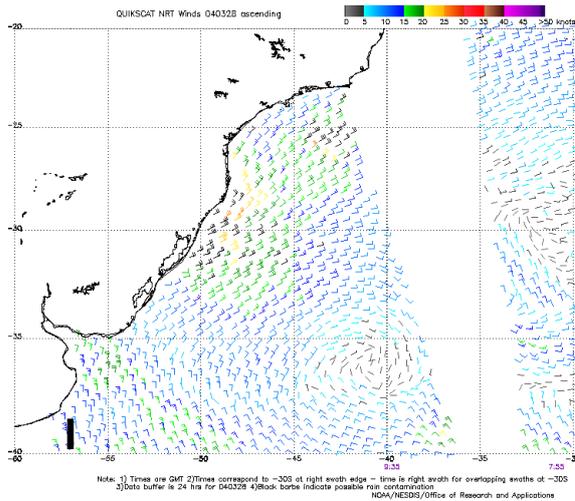


Figura 5 – Continuação.

Nas imagens do TRMM referentes ao dia 24 (Figura 6A) observa-se a nebulosidade em formato de vírgula e chuva fraca, chegando até 20mm. Na Figura 6B, o sistema tem um formato espiral melhor definido e percebe-se algo parecido com o “olho” do furacão; neste instante, a chuva é fraca e não passa de 10mm. No dia 27 momentos antes do Catarina avançar sobre a costa brasileira, observa-se o olho bem definido nas imagens do canal infravermelho, e também através da precipitação acumulada por estimativa de radar (Figuras 7C e 7D); além disso, a chuva se intensifica em torno do olho do Catarina, com acumulado de até 50mm.

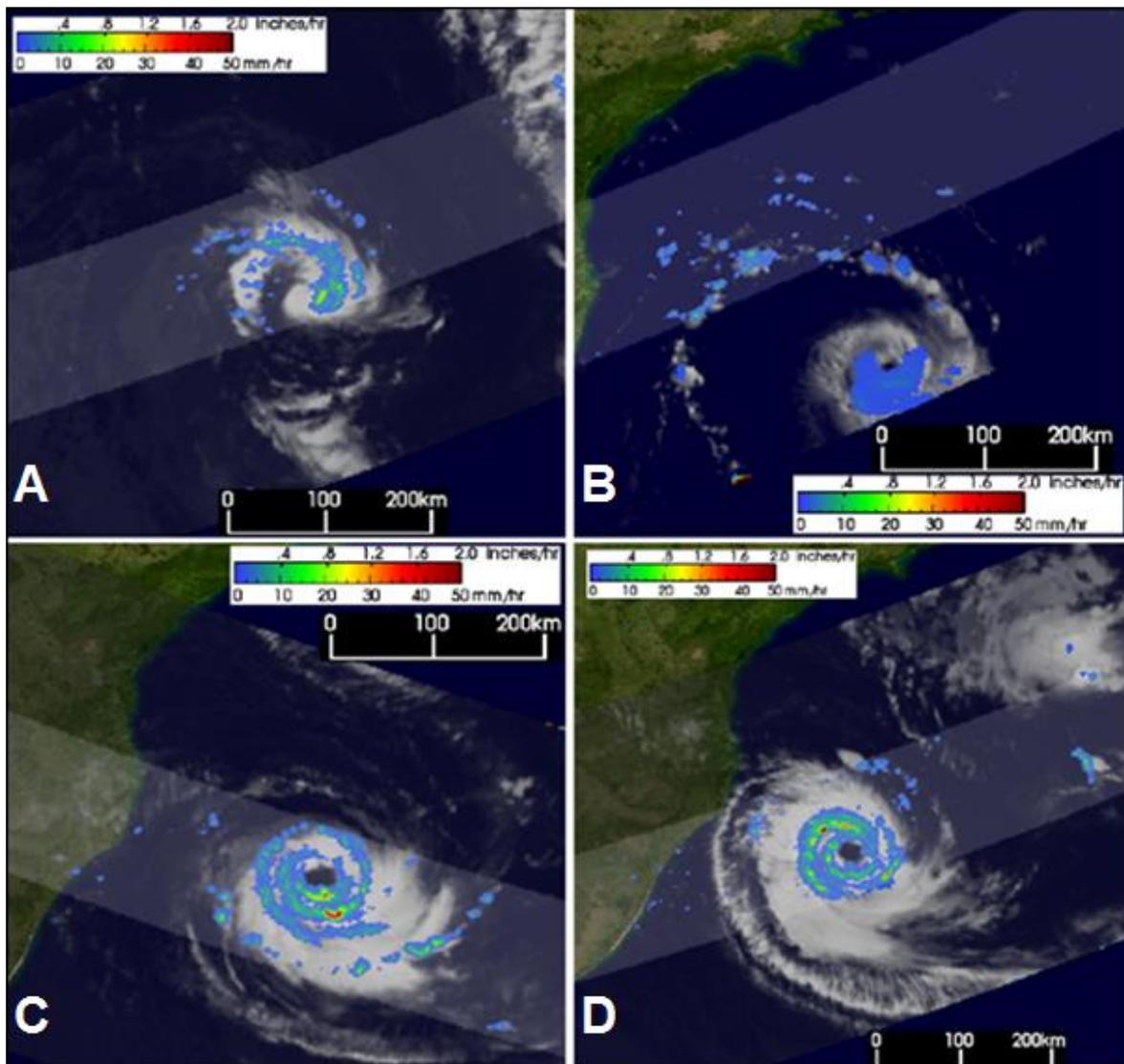


Figura 6 – Composição do canal infravermelho e imagens do radar do *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM). (A) 12UTC 24/03 (B) 12UTC 26/03 26 (C) 06UTC 27/06 (D) 11UTC 27/03/04. Fonte: GSFC/NASA.

### **3. DADOS E METODOLOGIA**

#### **3.1 DADOS**

As informações utilizadas como base para este estudo fazem parte de um conjunto de simulações numéricas entre 00 UTC do dia 18 de Março e 00 UTC do dia 01 de Abril de 2004, com resolução espacial de 6km. Estas simulações foram realizadas em ambiente de supercomputador do INPE pelo Grupo de Modelagem Oceânica, coordenado pelo Dr. Luciano Ponzi Pezzi e do qual participa o orientador desta pesquisa.

As variáveis utilizadas para as análises são: pressão reduzida ao nível do mar componentes zonal e meridional do vento, precipitação, geopotencial, temperatura, temperatura da superfície do mar, fluxo de calor sensível e fluxo de calor latente em diferentes níveis de pressão.

O primeiro conjunto de informações são os resultados das simulações acionando apenas o modelo atmosférico WRF. Já o segundo conjunto considerou o acoplamento do WRF com o modelo de circulação oceânica ROMS, doravante denominado simplesmente COAWST.

##### **3.1.1 MODELOS**

As condições iniciais e de fronteira fornecidas ao modelo atmosférico regional tiveram como base os campos do *Global Forecast System* (GFS), cujo espaçamento de grade horizontal é de 0,5°, com 64 níveis sigma de resolução vertical irregularmente espaçados e resolução temporal de 6 horas. Por sua vez, o modelo oceânico tem suas condições iniciais e de fronteira fornecidas através dos campos fornecidos pelo *Simple Ocean Data Assimilation* (SODA - Carlton and Giese, 2008), que disponibiliza médias mensais em uma grade global com espaçamento horizontal de 0,5° e 40 níveis de profundidade. Para assimilação de dados, o SODA utiliza um esquema em que os dados de temperatura e salinidade são utilizados para atualizar o modelo numérico *Parallel Ocean Program* (POP) que é forçado pelos ventos do ERA-40 (*European Center for Medium-Range Weather Forecasts 40km reanalysed fields*). Foi utilizada a projeção Mercator com apenas um domínio, que se encontra apresentado na Figura 7 e cujas configurações estão na Tabela 2.

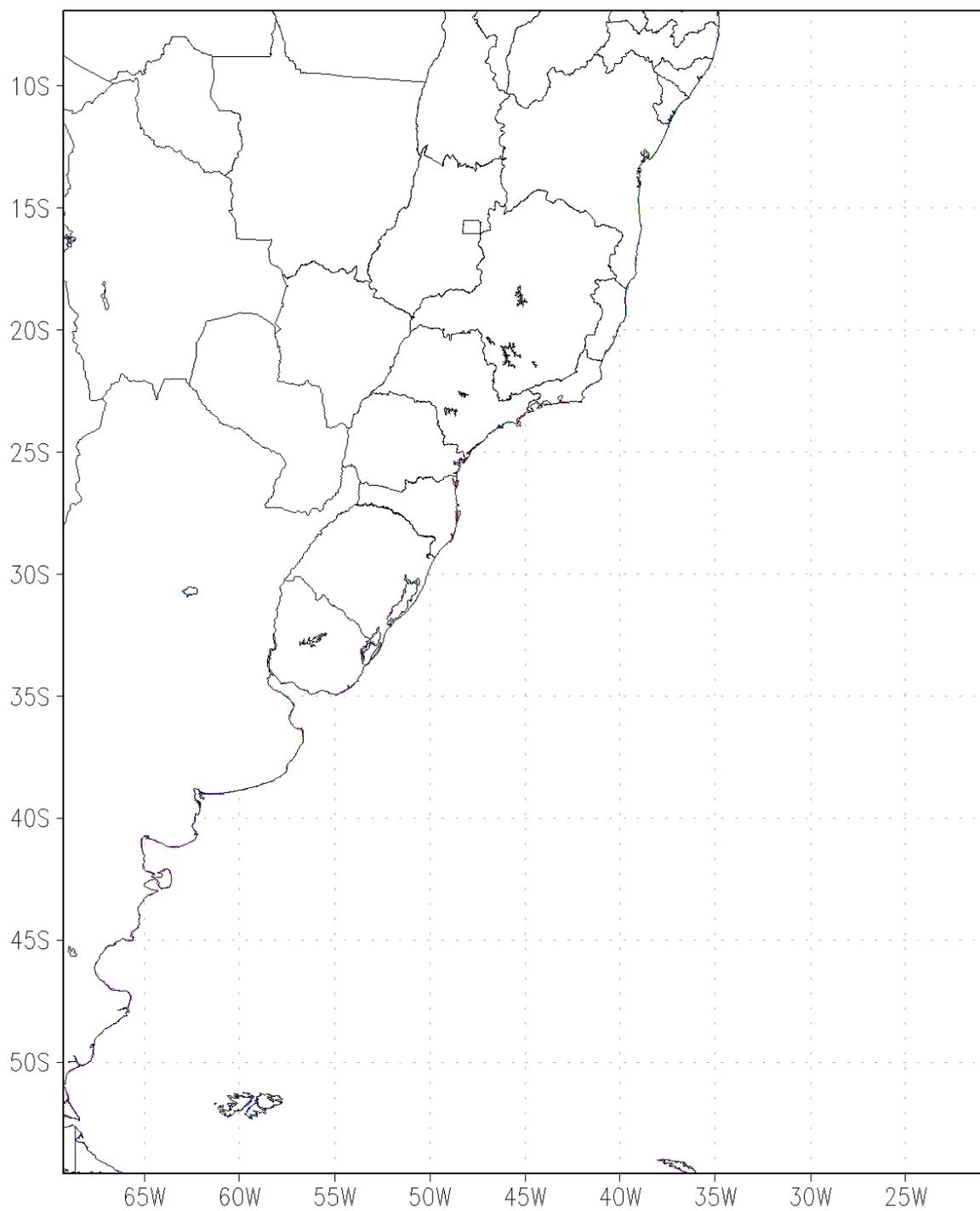


Figura 7 – Posição em projeção Mercator do domínio dos modelos WRF e COAWST.

Tabela 2 – Especificações das grades utilizadas pelo modelo WRF.

|                              |  |
|------------------------------|--|
| Modelo/Versão                | WRF V3.4   |
| Condição Inicial/Fronteira   | GFS 0.5°   |
| Período de Integração        | 336h (14 dias)   |
| Intervalo do Output          | 6 h  |
| Espaçamento Horizontal       | 6 km   |
| Número de Pontos no Eixo W-E | 746  |
| Número de Pontos no Eixo S-N | 900  |
| Número de Níveis Verticais   | 38   |
| Topo Do Modelo               | 100 hPa  |
| Níveis $\sigma$              | 1.0000, 0.9953, 0.9902, 0.9846, 0.9785, 0.9719, 0.9568, 0.9389, 0.9177, 0.8925, 0.8626, 0.8271, 0.7850, 0.7350, 0.6757, 0.6054, 0.5654, 0.5219, 0.4744, 0.4211, 0.3789, 0.3263, 0.2842, 0.2421, 0.2105, 0.1842, 0.1526, 0.1263, 0.1053, 0.0884, 0.0768, 0.0653, 0.0537, 0.0421, 0.0305, 0.0189, 0.0074, 0.0000 |
| Projeção                     | Mercator   |
| Latitude de Referência 1     | -34.00   |
| Latitude de Referência 2     | ***  |
| Longitude Central            | -45.00   |
| Latitude Central             | -34.00   |

### 3.1.1.1 WRF

O WRF (*Weather Research and Forecasting*), acessível abertamente em <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users>, é um modelo numérico de mesoescala que foi desenvolvido com a colaboração de vários centros de pesquisa norte-americanos como o *National Center Atmospheric Research* (NCAR), *Naval Research Laboratory* (NRL), *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), *Federal Aviation Administration* (FAA), *National Center for Environmental Prediction* (NCEP), *Mesoscale&Microscale Meteorology Laboratory* (MMM), *Center for Analysis and Prediction of Storms* (CAPS) e outros colaboradores (SKAMAROCK *et al.*, 2008).

O WRF possui uma gama de opções de parametrizações, que consistem em representar nos modelos numéricos os processos físicos que eventualmente não conseguem ser resolvidos explicitamente pelo modelo. No WRF as categorias físicas incorporadas são: microfísica, parametrização de cumulus, camada superficial, modelo de cobertura de solo, camada limite planetária e radiação (onda longa e onda curta). Na Tabela 3, estão apresentadas as parametrizações utilizadas nas simulações.

Tabela 3 – Especificações das parametrizações físicas.

|                      |                            |
|----------------------|----------------------------|
| Microfísica          | WSM-5                      |
| Parametrização de Cu | Betts-Miller-Janjic Scheme |
| Rad. de onda longa   | RRGTM                      |
| Rad. de onda curta   | RRGTM                      |
| Camada da superfície | MM5 Similarity Theory      |
| Modelo de superfície | Noah LSM                   |
| Física da CLP        | YSU PBL                    |

Nas notas técnicas elaboradas por Skamarock *et al.* (2008), obtém-se a descrição completa do modelo e também há uma lista de pesquisadores responsáveis por descrever as parametrizações que constam no WRF. O esquema de microfísica é responsável por resolver explicitamente os processos envolvendo o vapor d'água, nuvem e precipitação. Nesta simulação, foi escolhido o esquema WSM (WRF *Single Moment*) com cinco diferentes categorias: vapor, chuva, neve, gelo de nuvem, e a água de nuvem. Assim, é possível a existência de água super-resfriada e um gradual derretimento da neve que cai abaixo do ponto de congelamento.

A parametrização de cumulus escolhida foi Betts-Miller-Janjic, e neste esquema 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. 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 as mudanças na entropia sejam pequenas e não-negativas.

O modelo de transferência radiativa utilizado tanto para radiação de onda longa quanto para radiação de onda curta foi o RRTMG (*Rapid Radiative Transfer Model for General*

*circulation models*). Este é um esquema de banda espectral que utiliza o método *correlated-k14* para calcular fluxos e níveis de aquecimento com eficiência e precisão, melhorando substancialmente, sem grandes perdas na eficiência computacional, os resultados de modelos operacionais que utilizam outros tipos de modelos de transferência radiativa, conforme explicado no site do AER15 (*Atmospheric and Environmental Research*).

Os esquemas de camada de superfície calculam as velocidades de fricção e alteram os coeficientes que permitem calcular o aquecimento da superfície e fluxos de umidade pelos modelos de CLP (Camada Limite Planetária). O esquema utilizado (*MM5 Similarity Theory*) é baseado na teoria de similaridade de Monin-Obukhov.

O modelo de superfície utilizado foi o NOAH (mistura dos órgãos NCEP, *Oregon State University*, *Air Force Weather Agency AFWA* e *Hydrologic Research Lab (HLR)*), LSM (*Land-Surface Model*), que possui quatro camadas abaixo da superfície, com 10, 30, 60 e 100 cm de espessura cada, totalizando 2 m entre o topo e a camada mais profunda. Assim é possível calcular a temperatura do solo e a quantidade de água e gelo, levando em consideração os processos da vegetação.

O esquema utilizado de física na CLP, responsável pelos fluxos verticais sub-grade em toda a coluna atmosférica, foi o YSU PBL (*Yonsei University Planetary Boundary Layer*), uma versão atualizada do MRF PBL (*Medium Range Forecast model*) com diversas melhorias observadas nas simulações experimentais, como o entranhamento na interface entre a CLP e a atmosfera livre, e as interações que ocorrem em regiões frontais, muito importantes para simulações de frentes de brisa.

### **3.1.1.2 ROMS**

O modelo oceânico ROMS (*Regional Ocean Modeling System*) é um modelo tridimensional de equações primitivas, de superfície livre, que usa a média de Reynolds, e o método de diferenças finitas para resolver as equações de Navier-Stokes. Além disso, o modelo assume as aproximações de hidrostática e de Boussinesq (SHCHEPETKIN e McWILLIAMS, 2005). O ROMS usa um sistema de coordenadas curvilíneas ortogonais e uma grade estruturada do tipo “C de Arakawa” na horizontal; na vertical, é usado um sistema de coordenada do tipo *terrain-following*, que permite uma resolução variável principalmente nas regiões da camada de Ekman de fundo e superfície. O ROMS conta com parametrizações de escala de sub-grade, de forma que a mistura horizontal de momento pode ser ao longo de níveis verticais, superfícies geopotenciais, ou superfícies isopícnais. Já a parametrização da mistura vertical pode ocorrer

por esquemas de fechamento locais ou não-locais (Haidvogel *et al.*, 2000). O esquema de fechamento local foi feito com base nas equações da energia cinética turbulenta de Mellor e Yamada; já o fechamento não-local é baseado da formulação de camada limite perfil-K (SHCHEPETKIN e McWILLIAMS, 2005).

### 3.1.1.3 COAWST

O COAWST – *A Coupled-Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport Modeling System* (<http://woodshole.er.usgs.gov/operations/modeling/COAWST/>) é um modelo acoplado com grande potencialidade de emprego em pesquisa, o qual junta códigos numéricos de domínio público amplamente reconhecidos pela comunidade científica: o modelo atmosférico *Weather Research and Forecast* (WRF); o modelo oceânico *Regional Ocean Modeling System* (ROMS); o modelo de ondas *Simulating Waves Nearshore* (SWAN); e um módulo de transporte de sedimentos por ondas e correntes desenvolvido no âmbito da *Community Sediment Transport Modeling Project*. A comunicação entre os modelos que fazem parte do COAWST é feita pelo *Model Coupling Toolkit* (MCT). Para os propósitos deste trabalho, serão utilizados apenas os módulos referentes aos modelos WRF e ROMS.

No COAWST, o modelo ROMS fornece ao WRF a temperatura da superfície do mar (TSM). Já o WRF fornece ao ROMS a velocidade do vento em superfície a 10m, pressão atmosférica, umidade relativa, temperatura do ar em superfície, fração de nuvem, precipitação e radiação de onda longa e onda curta. No âmbito da comunidade científica brasileira, pode-se citar os esforços de Munchow *et al.* (2012) para a representação de processos acoplados regionais na costa do Rio Grande do Sul.

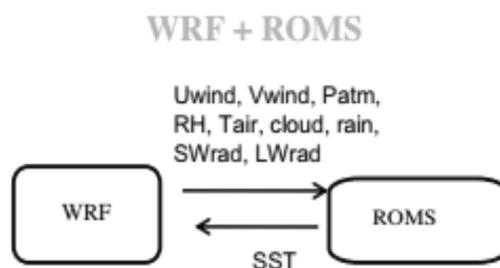


Figura 8 – Configurações de campos de dados trocados entre os modelos.  
Fonte: Warner *et al.* (2010).

# COAWST Modeling System

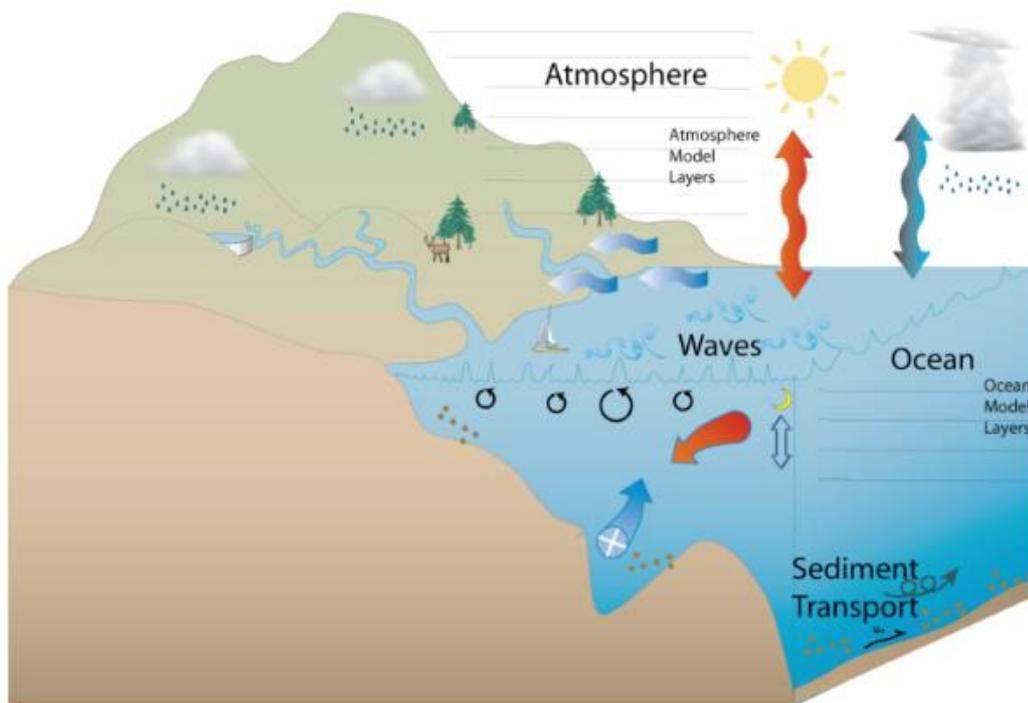


Figura 9 – Representação esquemática do modelo COAWST. Fonte: Warner *et al.* (2010).

## 3.2 MÉTODOS

### 3.2.1 RASTREAMENTO DO CICLONE

O método de rastreamento de ciclones utilizado neste trabalho foi baseado na criação de um código que identifica o menor de valor de pressão a cada ponto de grade. Isto ocorre fazendo uma varredura nos pontos “i” e “j” da grade, alocando este valor na memória e sendo sobrescrito no momento em que achar outro valor de menor intensidade. Como a grade das simulações são extensas, foi necessário criar um subdomínio para diminuir a grade de interesse e focar na trajetória estimada, conforme apresentado na Figura 10.

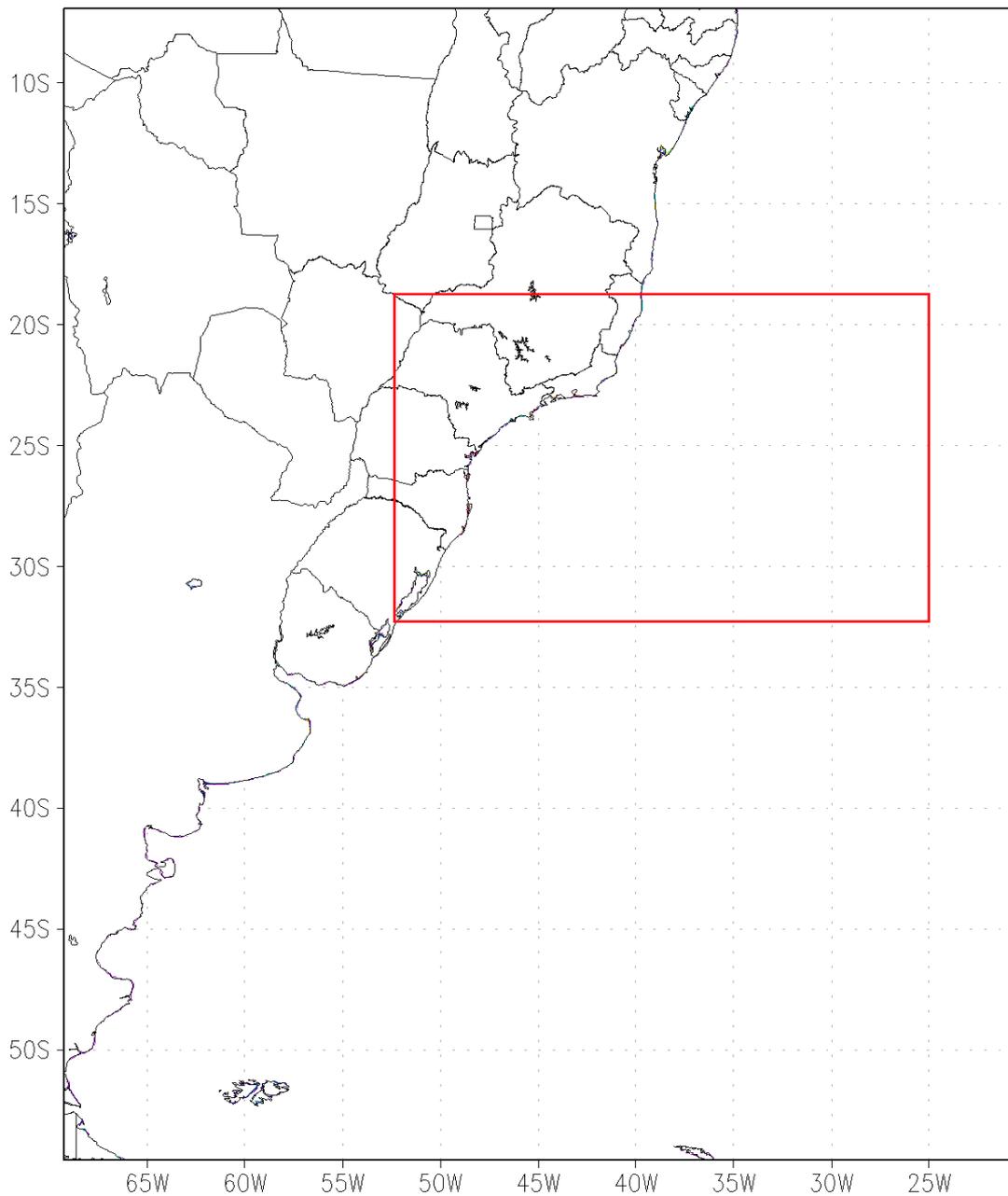


Figura 10 – Área efetiva de rastreamento dos ciclones delimitada pelo retângulo vermelho.

### 3.2.2 ESTRUTURA DO CICLONE

Hart (2003) desenvolveu uma técnica para avaliar a estrutura dos ciclones através da determinação de parâmetros que medem a assimetria térmica e a variação vertical dos gradientes de altura geopotencial em cada tempo do ciclo de vida dos sistemas. Este sistema foi denominado *Cyclone Phase Space* (CPS), e com ele é possível concluir qual é o tipo do ciclone que está sendo analisado, isto é, tropicais, extratropicais ou híbridos.

A partir de indicadores objetivos, o CPS indica a natureza térmica (núcleo quente ou frio) e a simetria térmica (frontal ou não-frontal) de um ciclone. A fase que um ciclone assume, ou seja, as características estruturais que ele adquire durante o seu ciclo de vida que implicam em variações de sua intensidade, tamanho, incerteza de previsão. Estes indicadores são:

- Simetria térmica ou de espessura do ciclone ( $B$ );
- Vento térmico em baixos níveis ( $-/V_T^L$ );
- Vento térmico em altos níveis ( $-/V_T^U$ ).

Os *scripts* e códigos que geram os diagramas encontram-se disponíveis na *homepage* do Dr. Robert Hart (<http://moe.met.fsu.edu/~rhart/software.php>), e são compatíveis com os compiladores *gfortran* ou *g77*. Cabe reforçar, no entanto, que para utilizar *ifort*, é necessário modificar alguns parâmetros obrigatoriamente.

O parâmetro  $B$  indica a estrutura térmica do sistema, isto é, se existe ou não assimetria da estrutura do campo de temperatura em torno do ciclone. Pela equação 1, observa-se que o parâmetro é resultado da diferença de espessura da camada, entre 900 hPa e 600 hPa:

$$B = h \left( \overline{Z_{600hPa} - Z_{900hPa}} \Big|_R - \overline{Z_{600hPa} - Z_{900hPa}} \Big|_L \right) \quad (1)$$

Onde  $Z$  é a altura geopotencial,  $h$  é um parâmetro que varia dependendo do hemisfério da análise, assumindo o valor de +1 no Hemisfério Norte e -1 no Hemisfério Sul. Além disso, e  $R$  e  $L$  são os círculos (direito e esquerdo) que possuem raio de 500 km (script original) e são definidos de acordo com o movimento do ciclone, neste trabalho o raio utilizado foi de 300 km. Deste parâmetro avalia-se as seguintes características:

- Se os valores de temperatura forem próximos nos dois círculos, tem-se um ciclone tropical e o parâmetro  $B \sim 0$ ;

- Se houver um lado frio e outro quente, tem-se um ciclone extratropical e o parâmetro  $B$  possui valores grandes e com variação ao longo do ciclo de vida do ciclone.

Complementarmente, os parâmetros do vento térmico são definidos como uma mudança no gradiente de altura geopotencial entre diferentes níveis de pressão:

$$-|V_T^L| = \frac{\partial(Z_{max} - Z_{min})}{\partial \ln p} \Big|_{900}^{600} \quad (1.1)$$

$$-|V_T^U| = \frac{\partial(Z_{max} - Z_{min})}{\partial \ln p} \Big|_{600}^{300} \quad (1.2)$$

Onde os índices  $L$  e  $U$  (*lower* e *upper*) representam respectivamente as camadas entre 900-600 hPa e 600-300 hPa,  $Z_{max}$  e  $Z_{min}$  correspondem à altura geopotencial. Desta forma:

- Se  $-|V_T| > 0$ , tem-se um núcleo quente, e com isto a perturbação decresce com a altura;
- Se  $-|V_T| < 0$ , tem-se um núcleo frio, e com isto a perturbação aumenta com a altura.

A seguir são apresentadas as análises para o Catarina a partir dos dados do GFS de 1° grau de resolução entre 00UTC do dia 20 de Março de 2004 e 12UTC do dia 28 de Março de 2004. A Figura 11 relaciona a simetria térmica ( $B$ ) e o vento térmico ( $-|V_T^L|$ ) entre 900 e 600 hPa. A Figura 12 relaciona o vento térmico em toda a extensão vertical avaliada, relacionando o vento térmico entre 900 e 600 hPa e entre 600 e 300 hPa ( $-|V_T^L|/|V_T^U|$ )

Por conta do GFS não ter uma altíssima resolução, alguns detalhes não ficam tão evidentes na análise dos diagramas, mas na Figura 11 em sua fase inicial o ciclone apresentava uma fraca característica frontal, com pequena assimetria térmica ( $B > 0$ ) e núcleo ligeiramente frio entre 900 e 600 hPa (valores negativos de  $-|V_T^L|$ ), sendo então classificado neste instante como ciclone extratropical. Ao longo da sua evolução a simetria térmica aumentou ( $B \sim 0$ ), mas mesmo assim seu núcleo permaneceu frio em baixos níveis. Entre os dias 23 e 24, o ciclone permaneceu com  $B \sim 0$ , por outro lado o vento térmico começa a mudar de sinal e apresenta um núcleo quente em baixos níveis (valores positivos de  $-|V_T^L|$ ), mesmo sendo relativamente fraco. A partir do dia 25, quando o Catarina começa seu deslocamento para oeste, o ciclone aumentou ligeiramente a força de sua estrutura quente em baixos níveis (valores positivos de  $-|V_T^L|$ ). Entre os dias 25 e 27, a posição do ciclone no diagrama de fases indica um comportamento de ciclone subtropical. Após isto, entre os dias 27 e 28 houve a redução da força do núcleo quente do ciclone, acarretando em perda de intensidade e assim os gradientes de pressão desapareceram.

Na Figura 12, o ciclone inicia com uma estrutura totalmente fria (valores negativos de  $-V_T^L$  e  $-V_T^U$ ), porém com uma diferença interessante: o núcleo frio do ciclone era mais intenso entre 600 e 300 hPa ( $-V_T^U$ ) do que entre 900 e 600 hPa ( $-V_T^L$ ), confirmando a característica de ciclone extratropical. Durante seu deslocamento, particularmente entre os dias 21 e 22, o ciclone perdeu intensidade do seu núcleo frio entre 600 e 300 hPa. Entre os dias 23 e 24, houve uma inversão do sinal do vento térmico em baixos níveis, que passou a ser positivo. Características peculiares passam a ser notadas entre os dias 25 e 26, quando o Catarina começa seu deslocamento anômalo para oeste; nestes instantes observa-se que o núcleo quente em baixos níveis se tornou mais intenso (valores positivos de  $-V_T^L$  e  $-V_T^U$ ). Entre os dias 27 e 28, aparece uma fraca estrutura quente em altos níveis e ocorre uma gradativa redução da força do núcleo quente em baixos níveis, ocasionando a inversão do sinal.

Nestes diagramas do CPS, conclui-se que o Catarina atingiu um núcleo quente fraco e não realizou uma transição tropical completa, sendo assim não chegou ao estágio de furacão, sendo classificado apenas como ciclone híbrido.

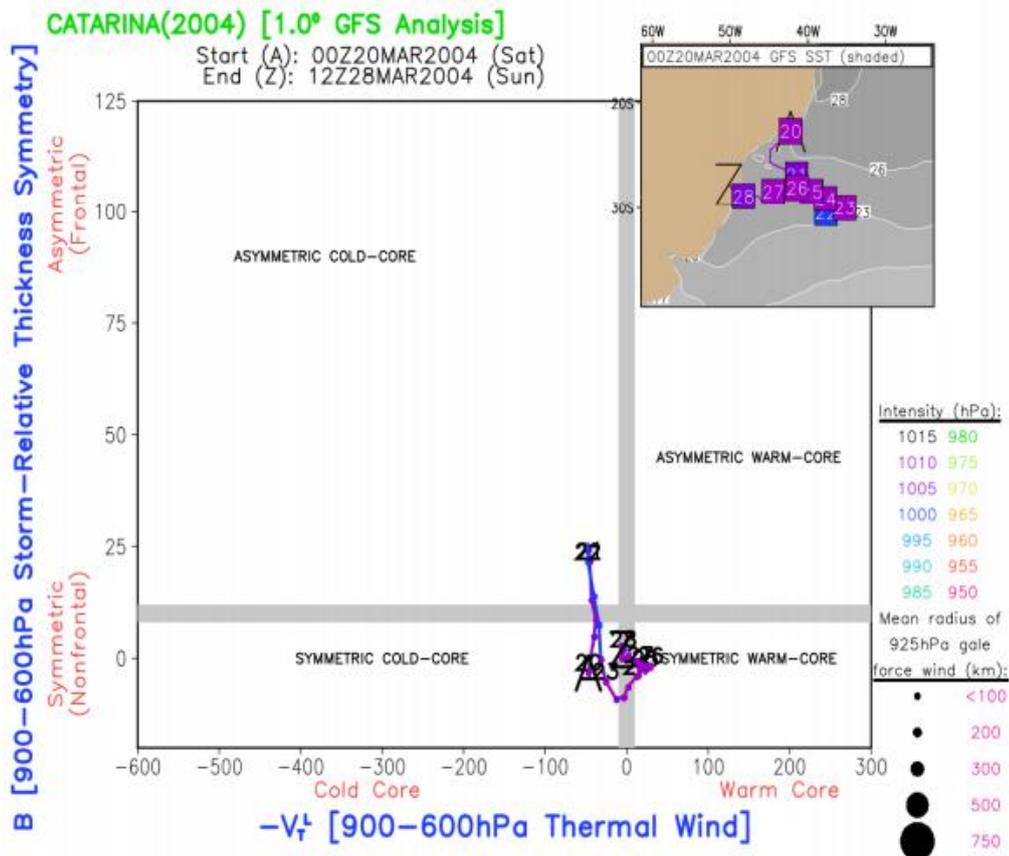


Figura 11 – Diagrama de fase: parâmetros B e  $-V_T^L$  para análise do GFS. Fonte: CPS.

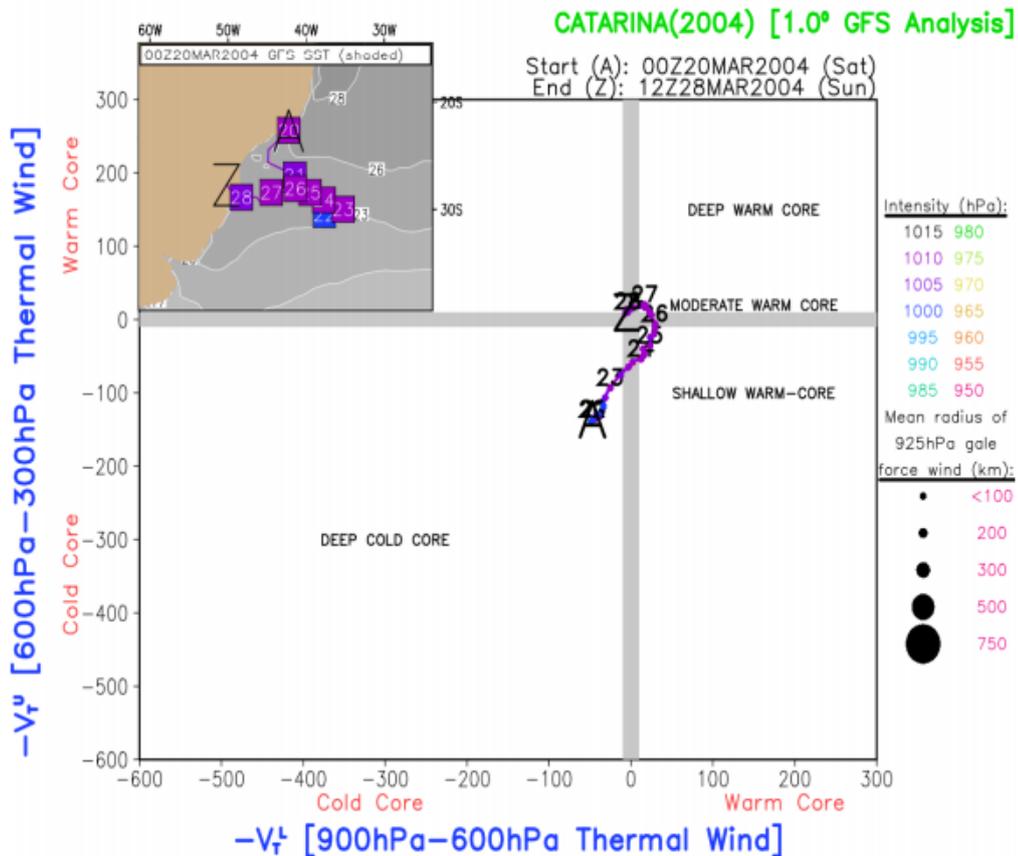


Figura 12 – Diagrama de fase: parâmetros  $-V_T^U$  e  $-V_T^L$  para análise do GFS. Fonte: CPS.

### 3.3.3 PERFIS VERTICAIS MÉDIOS

Para avaliar a contribuição de cada termo das equações em toda a coluna vertical e em cada estágio do ciclone, foram realizadas médias simples em caixas de 2° de latitude por longitude, centradas na baixa em superfície.

### 3.3.4 BALANÇO DE CALOR

O estudo do balanço da energia termodinâmica é frequentemente utilizado para se analisar a importância dos processos que contribuem para o estabelecimento da circulação atmosférica induzida por fontes de calor, e também para o cálculo de taxas de aquecimento diabático (resíduo termodinâmico). Assim, a equação que será utilizada para o cálculo do balanço termodinâmico é dada em coordenadas isobáricas por:

$$\underbrace{\frac{\partial T}{\partial t}}_I + \underbrace{\overline{V_H} \cdot \Delta_p T}_{II} + \underbrace{\omega \left( \frac{RT}{c_p P} - \frac{\partial T}{\partial p} \right)}_{III} = \underbrace{\frac{J}{c_p}}_{IV} \quad (2)$$

onde:

I – Variação local de temperatura;

II – Advecção horizontal de temperatura;

III – Sw: expansão/compressão adiabática e advecção vertical de temperatura;

IV – Aquecimento/resfriamento diabático (resíduo do balanço de calor).

Para a equação do balanço de calor foram calculados os termos da equação da energia termodinâmica em uma caixa centrada em torno do centro do ciclone Catarina com 2° graus de latitude e de longitude.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 13 apresenta as trajetórias do ciclone reproduzidas pelos modelos WRF e COAWST. A posição do ciclone foi calculada baseada na pressão reduzida ao nível médio do mar (PNMM).

As Figuras 14A (WRF) e 14B (COAWST) não conseguiram representar exatamente a trajetória do Catarina em relação ao descrito por McTaggart-Cowan *et al.* (2006), apresentado na Figura 13C. Ambas as simulações não detectaram o deslocamento mais para sul-leste do sistema, antes da sua mudança de trajetória em direção a costa sul do Brasil.

Apesar de não ter traçado todas as particularidades da trajetória, as duas simulações conseguiram prever a principal mudança, que é alteração da trajetória de leste para oeste. Ressalta-se também que, apesar de um ponto inicial muito semelhante, as diferentes simulações sugerem trajetórias e pontos finais distintos, bem como diferenças ao longo de seu desenvolvimento/evolução.

Ao avaliar a questão do acoplamento, verifica-se que a simulação utilizando o COAWST (Figura 14B) foi capaz de representar melhor a localização do ciclone em seu estágio inicial de formação e também ao atingir a costa brasileira. Nesta simulação acoplada (Figura 13B), o ciclone se forma próximo à divisa do litoral sul paulista e litoral sul paranaense, enquanto a simulação com WRF posiciona a baixa em uma posição mais afastada do Estado do Paraná. No momento em que o ciclone avança sobre o continente, a simulação do COAWST alcança a divisa dos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina às 00 UTC do dia 28; por sua vez, a simulação que conta apenas com o modelo atmosférico (Figura 14A) sugere como área de impacto a costa central de Santa Catarina, ocorrendo também às 00 UTC do dia 28.

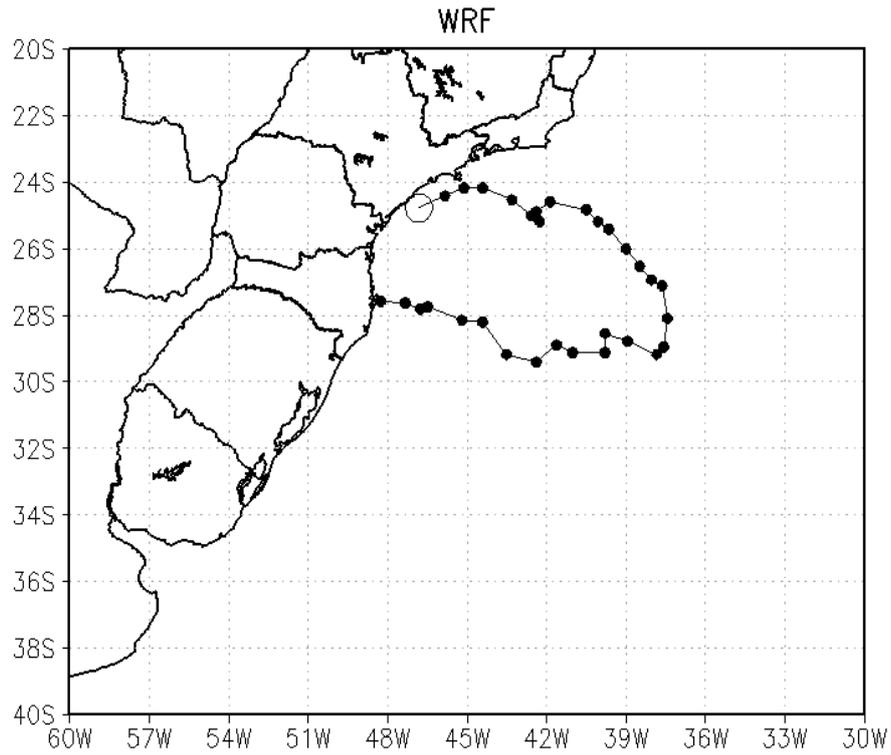


Figura 13 A – Trajetória do Ciclone Catarina com a simulação do WRF entre 06 UTC de 20 de Março e 06 UTC de 28 de Março de 2004.

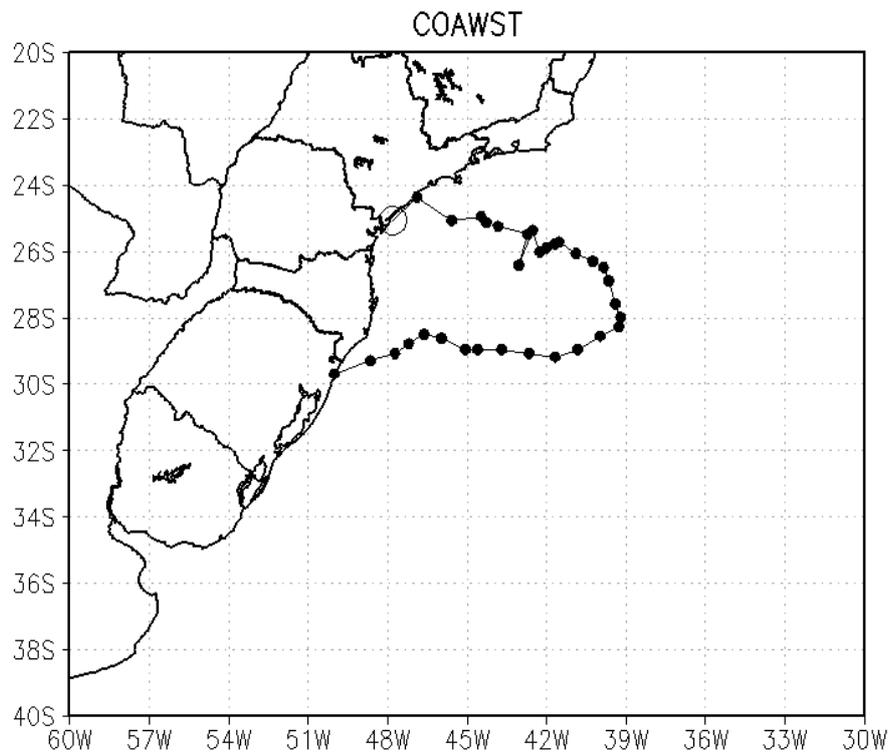


Figura 13 B – Trajetória do Ciclone Catarina com a simulação do COAWST entre 06 UTC de 20 de Março e 06 UTC de 28 de Março de 2004.

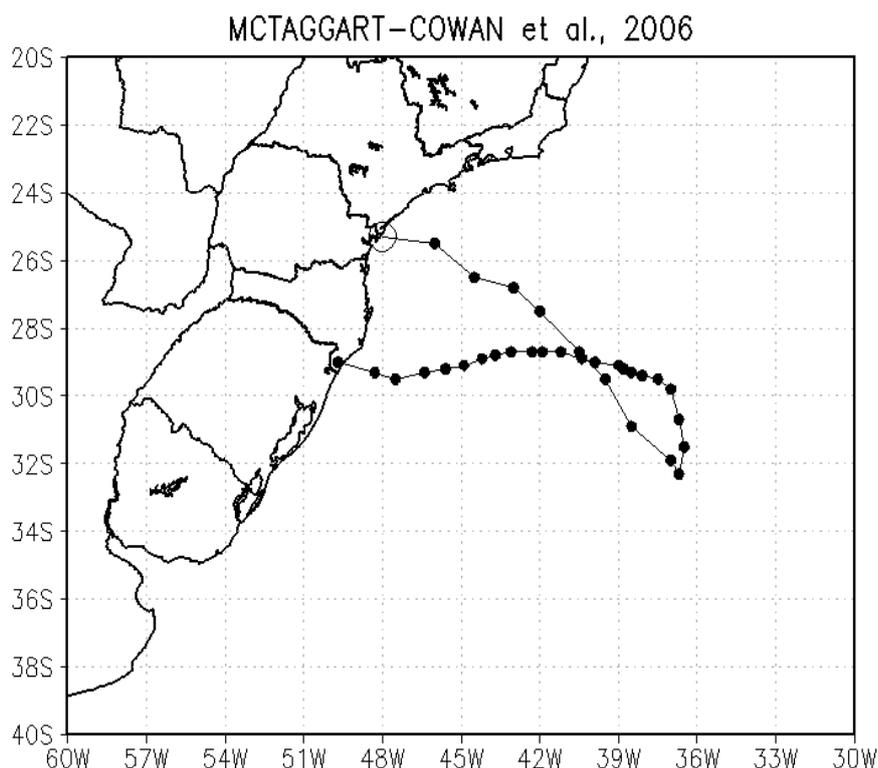


Figura 13 C – Trajetória do Ciclone Catarina: Adaptado de McTaggart-Cowan *et al.* (2006).

A evolução da pressão ao nível do mar (PRNM) a cada 6 horas para as distintas simulações mostra que os mínimos valores ocorreram em instantes distintos, ou seja, há uma diferente evolução dinâmica (Figura 15A). Destaca-se que, na simulação acoplada, a pressão apresenta dois estágios de intensificação: o primeiro é durante seu deslocamento leste-sul, e o segundo ocorre após a mudança de trajetória atingindo pressão mínima de 998 hPa no dia 25. Além disso, após ter atingido o valor mínimo de pressão, o COAWST não apresenta aumento rápido do valor de PRNM quanto o WRF.

Na Figura 14B, temos a evolução da pressão a cada 24 horas nas simulações do WRF (linha preta) e do COAWST (linha cinza), comparadas a pressão descrita no McTaggart-Cowan *et al.* (2006). Nesta análise, observa-se que as simulações não atingiram a pressão mínima estimada, demonstrando a dificuldade em representar o Catarina. A evolução mostra a rápida intensificação do sistema ao sofrer sua transição para fase híbrida com uma queda de pressão de 10 hPa em 24 horas, atingindo 992 hPa às 06 UTC do dia 24. Após isso o sistema sofre um leve aumento de pressão, mas no dia 26 ocorre um período de forte intensificação, de modo que às 06 UTC do dia 27 o sistema alcança a pressão mínima de 974 hPa.

As simulações não apresentam uma evolução como a da estimativa, mas, apesar da diferença dos valores, destaca-se que o COAWST entre 06 UTC do dia 23 e o início do dia 25,

consegue traçar a evolução do campo de pressão de modo semelhante ao de McTaggart-Cowan *et al.* (2006), enquanto o WRF tende a aumentar a pressão do sistema.

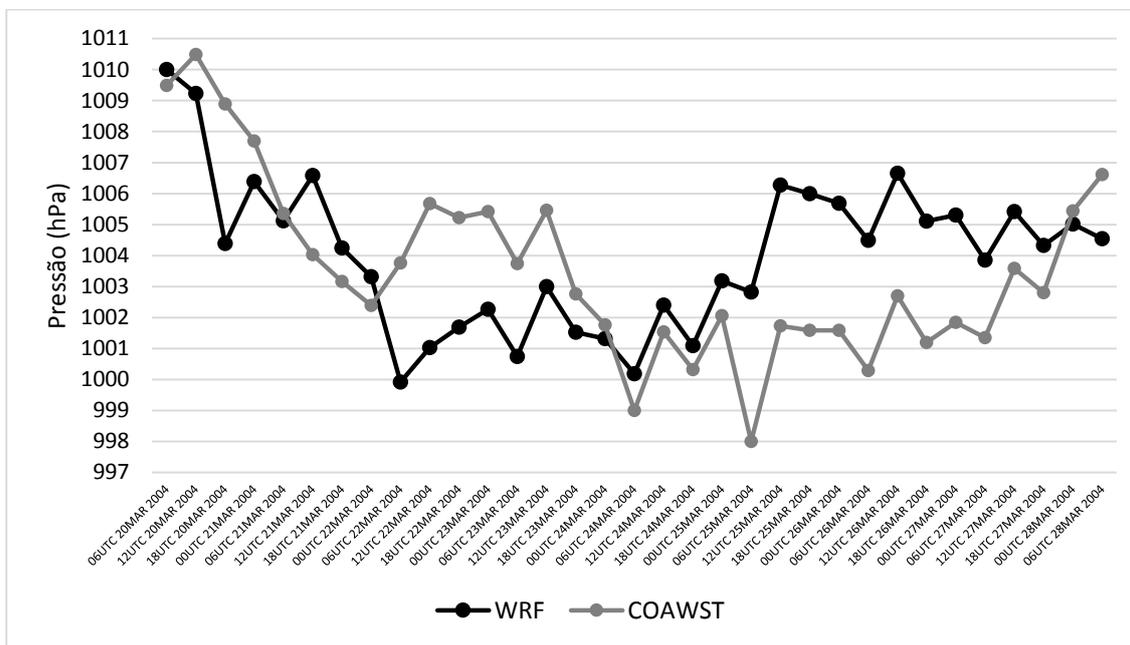


Figura 14A – Pressão ao nível do mar (hPa) no centro do ciclone a cada 6 horas ao longo do ciclo de vida do Catarina, entre 06 UTC de 20 de Março e 06 UTC de 28 de Março para as simulações WRF (linha preta) e COAWST (linha cinza).

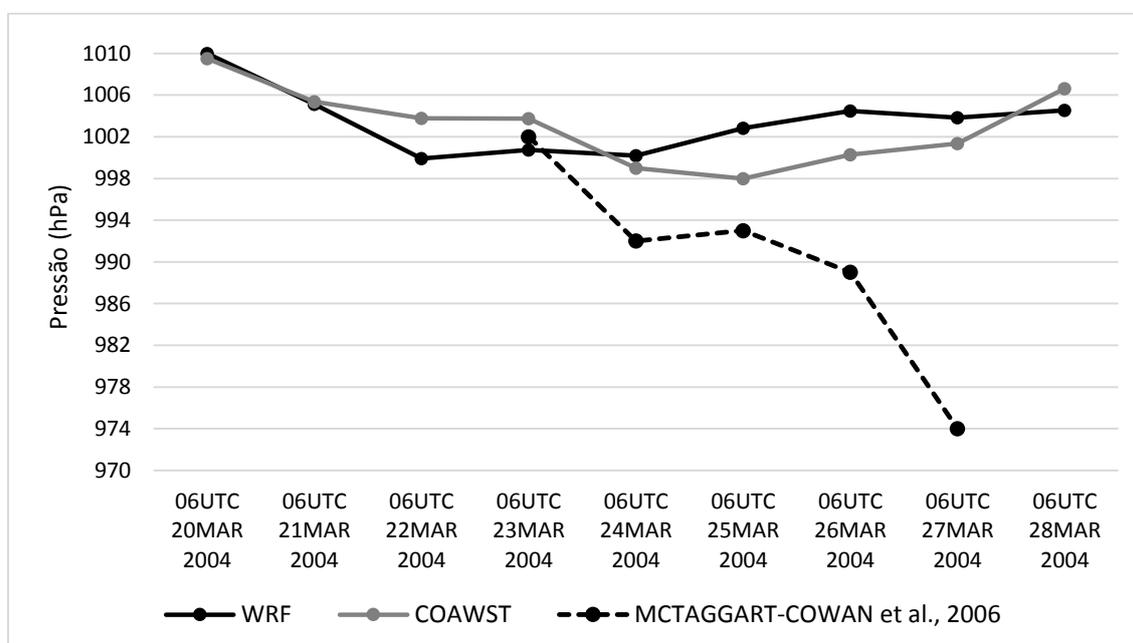


Figura 14B – Pressão ao nível do mar (hPa) no centro do ciclone entre 06 UTC de 20 de Março e 06 UTC de 28 de Março para as simulações WRF (linha preta), COAWST (linha cinza) e a estimativa feita por McTaggart-Cowan *et al.* (2006), entre 06 UTC de 23 de Março e 06 UTC de 27 de Março.

As próximas análises consistem na comparação a cada 24 horas da evolução das simulações com o WRF e com o COAWST. As comparações são apresentadas para o horário das 06 UTC do dia 20 ao dia 28 de Março de 2004.

No estágio inicial, o campo de pressão atmosférica pouco difere entre as simulações, com a indicação de um abaixamento de pressão na costa de SP (Figuras 15A e 16B); no entanto, os valores da TSM são bastante distintos, com uma região de temperaturas consideravelmente mais baixas junto à costa no COAWST, originadas dinamicamente pelo ROMS. O estágio seguinte, exposto nas Figuras 15C e 16D, apresenta isóbaras fechadas sobre a porção oceânica dos estados de SP e RJ, sendo que o WRF sugere uma área maior abrangida pelo centro da baixa. Às 06UTC de 22 de Março (Figuras 15E e 16F) ambas simulações mantêm o aprofundamento da baixa pressão, mas o WRF indica mais isóbaras fechadas associadas a uma maior intensificação. No dia 23 o sistema já deixou de se intensificar no WRF, diferentemente do comportamento indicado pelo COAWST, com a baixa ainda exibindo alguma intensificação, mesmo sobre águas menos aquecidas (Figuras 15G e 16H), Cabe reforçar que este resfriamento de TSM apresentado pelo COAWST parece superestimado, e que a baixa continuou se deslocando para leste no WRF ao passo que no COAWST, permaneceu quase no mesmo local. No dia 24 de Março, ambas simulações representaram a mudança de sentido na trajetória do sistema (Figuras 15I e 16J), e o COAWST segue fechando isóbaras ainda intensificando a baixa pressão. Deste ponto em diante, o deslocamento anômalo para oeste é indicado em ambas simulações (Figuras 15K e 16L), com o COAWST persistindo com a intensificação da baixa até 26 de Março (Figuras 16M e 16N) e com a diminuição de TSM. O dia 27 (Figuras 15O e 16P) caracteriza-se pela aproximação do sistema em relação à costa brasileira, até que no dia 28 (Figuras 15Q e 16R), a baixa atinge o centro de SC na simulação do WRF com centro de 1006hPa, enquanto que, no COAWST, o setor atingido é o norte do RS, com centro de 1008hPa.

Cabe enfatizar que os padrões de TSM representados pelo COAWST diferem bastante do WRF. De qualquer modo, o resfriamento apresentado parece demasiadamente superestimado, o que pode ter influenciado enormemente na representação do sistema de interesse.

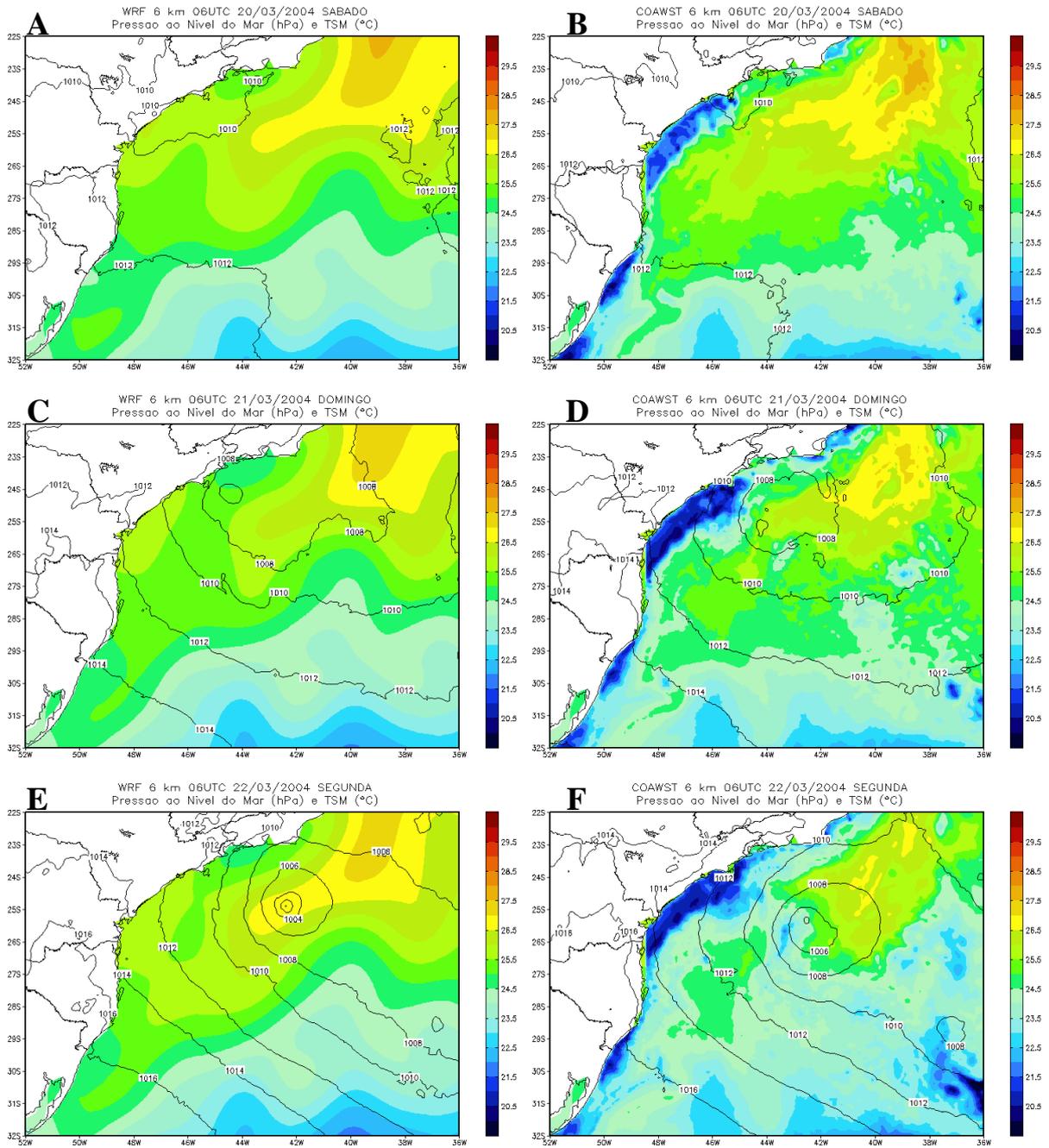


Figura 15 – Pressão reduzida ao nível do mar em hPa (contorno) e temperatura da superfície do mar em °C (sombreado) entre 06 UTC de 20 de Março e 06 UTC de 28 de Março de 2004. A coluna da esquerda representa os campos simulados pelo WRF, e a da direita, pelo COAWST.

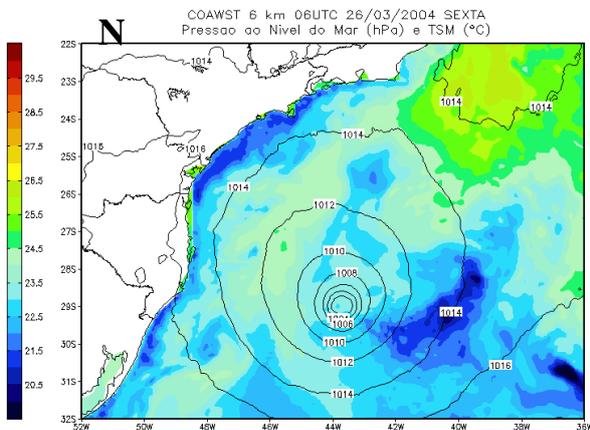
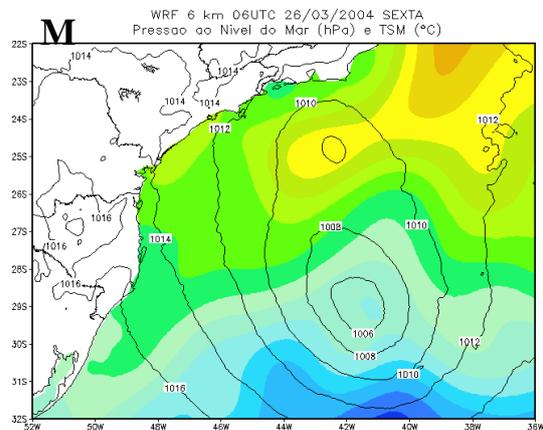
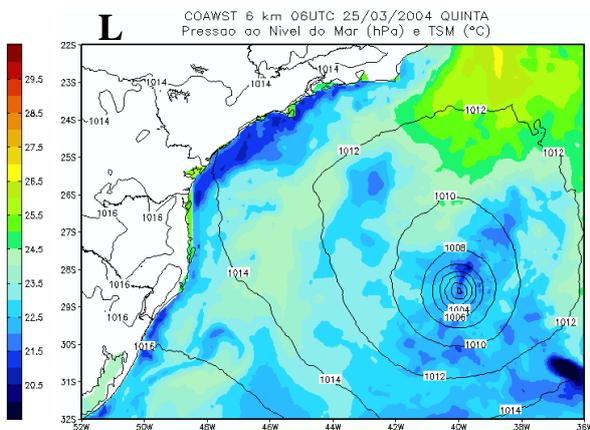
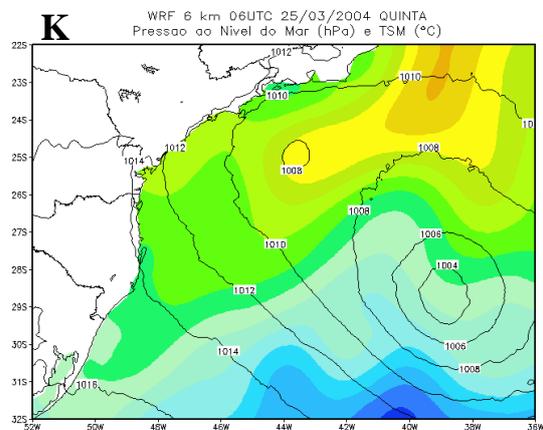
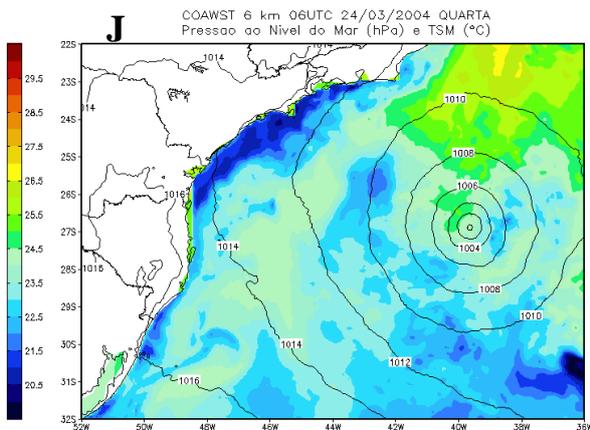
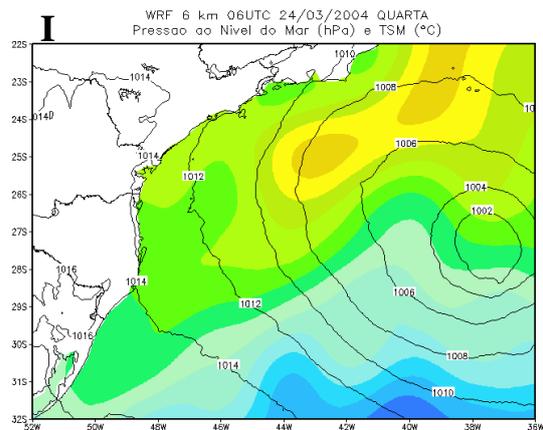
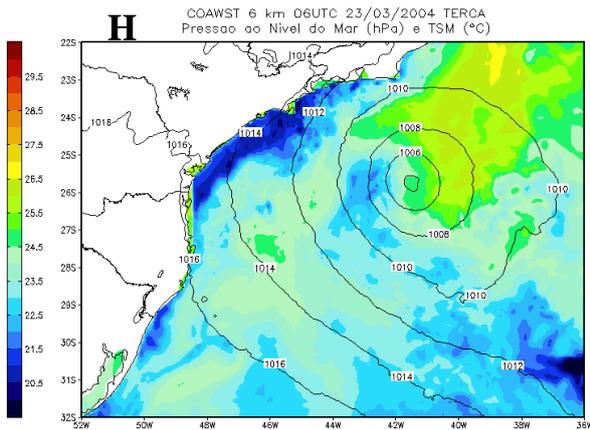
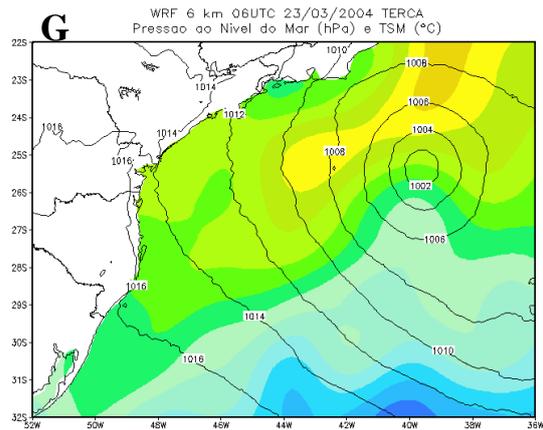


Figura 15 – Continuação.

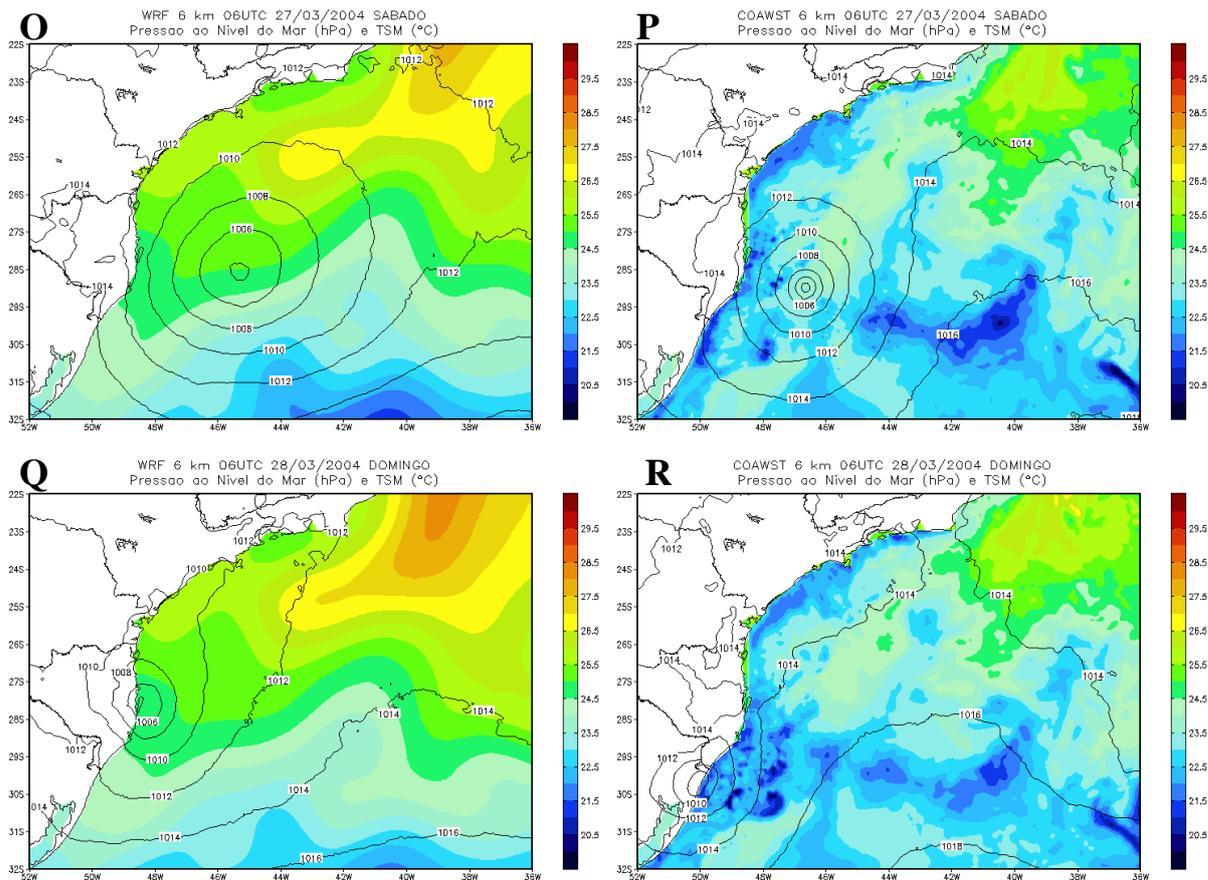


Figura 15 – Continuação.

Nas análises do campo vetorial de transporte de umidade específica, de maneira geral verifica-se um comportamento similar nas duas simulações, mas existem particularidades. Apesar do padrão ser muito parecido na gênese do sistema (Figuras 16A e B), assim que o Catarina começa evoluir (Figuras 16C e D) observa-se um aumento de intensidade do transporte na simulação do WRF em relação ao COAWST. No dia seguinte, ressalta-se um transporte mais acentuado de umidade específica no modelo acoplado. Nas Figuras 16I e 17J, observa-se que o WRF apresenta uma grande concentração de umidade específica ao sul em torno da baixa.

A partir do dia 25, com a mudança da trajetória do Catarina, o comportamento se modifica e o COAWST apresenta um transporte mais intenso que o WRF. Nas Figuras 16M e N, o modelo acoplado indica que há uma maior divergência de umidade específica em direção ao centro do ciclone na simulação com o COAWST. Além disso, o WRF “redistribuiu” seu campo de umidade, indicando uma divergência para o sistema de baixa pressão de 1008 hPa, que foi comentado no campo de TSM e PRNM. Por fim, no dia 28 (Figuras 16Q e R), em que ambas simulações sugerem uma intensa convergência de umidade no centro do ciclone,

ressalta-se a presença de um “canal” seco de umidade ao norte do Catarina na simulação que utiliza somente o modelo atmosférico, este padrão não existe na simulação acoplada.

De forma geral, em baixos níveis o ciclone se encontrava justamente na região de máximo de umidade disponível. Nas Figuras 16K e L fica claro que o centro da circulação ciclônica associada ao centro de baixa coincide com o núcleo de máximo de razão de mistura (com valores acima de 12,5 g/kg).

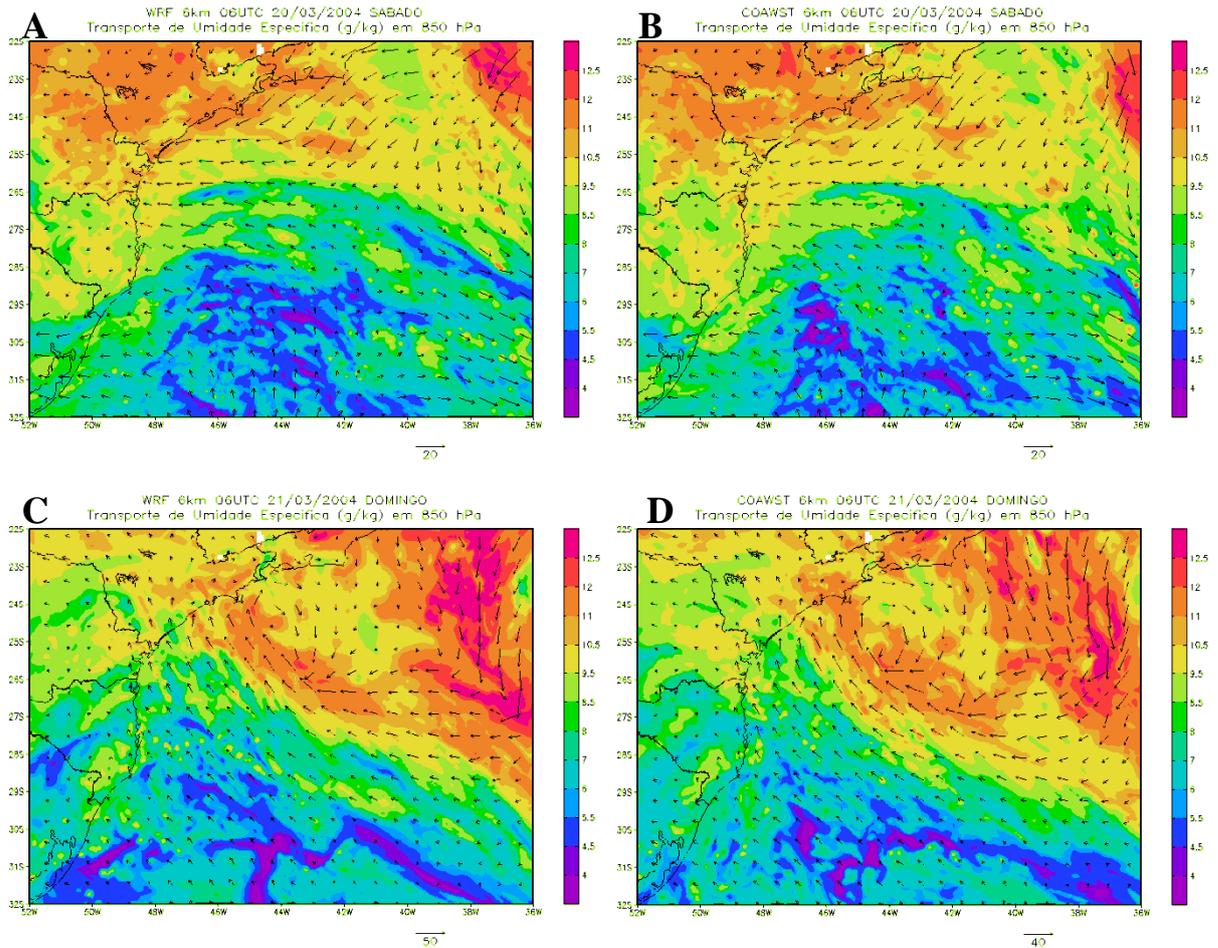


Figura 16 – Composição entre vento em m/s (vetores) e umidade específica em g/kg (sombreado) entre 06 UTC de 20 de Março e 06 UTC de 28 de Março de 2004. A coluna da esquerda representa os campos simulados pelo WRF, e a da direita, pelo COAWST.

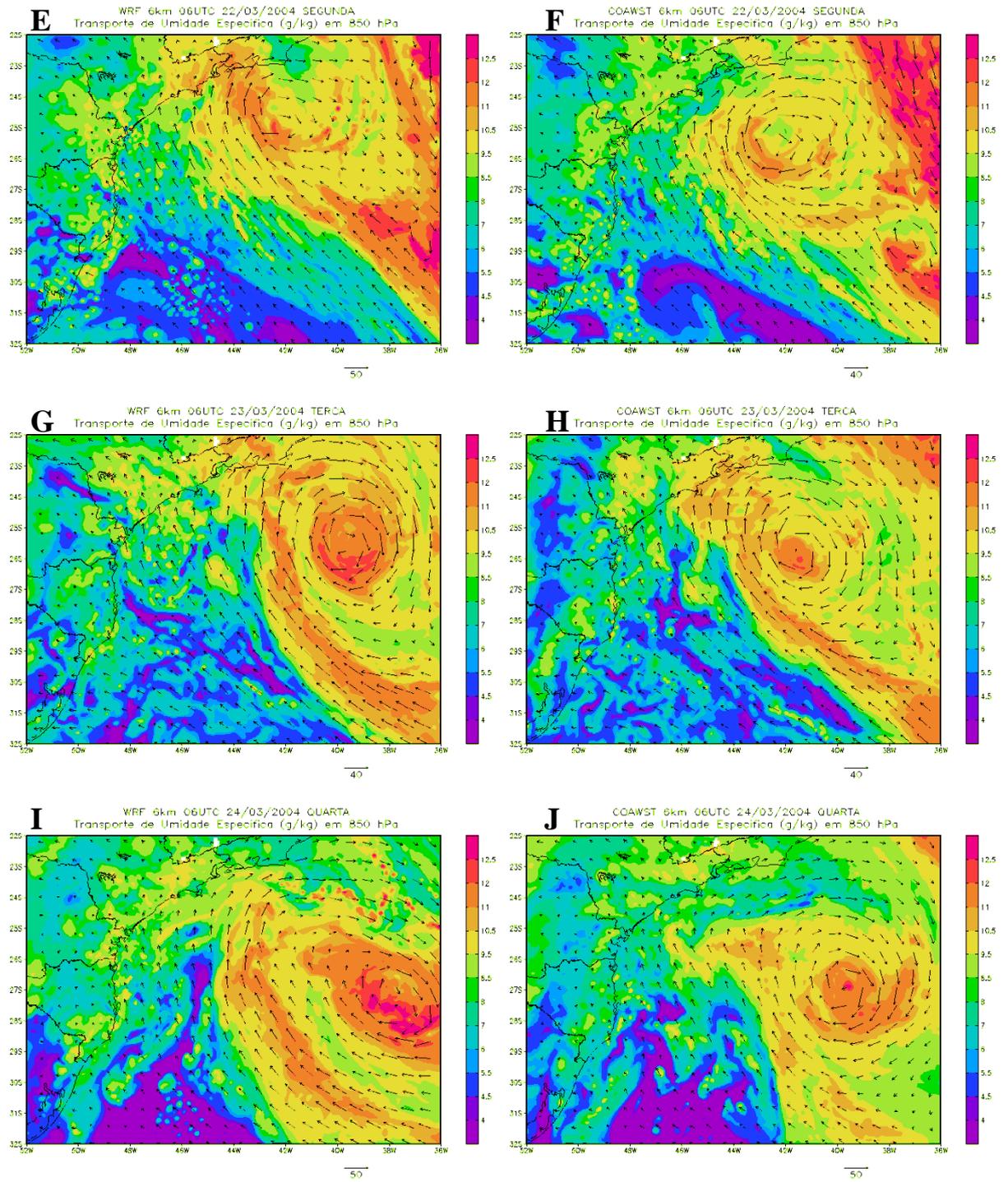


Figura 16 – Continuação.

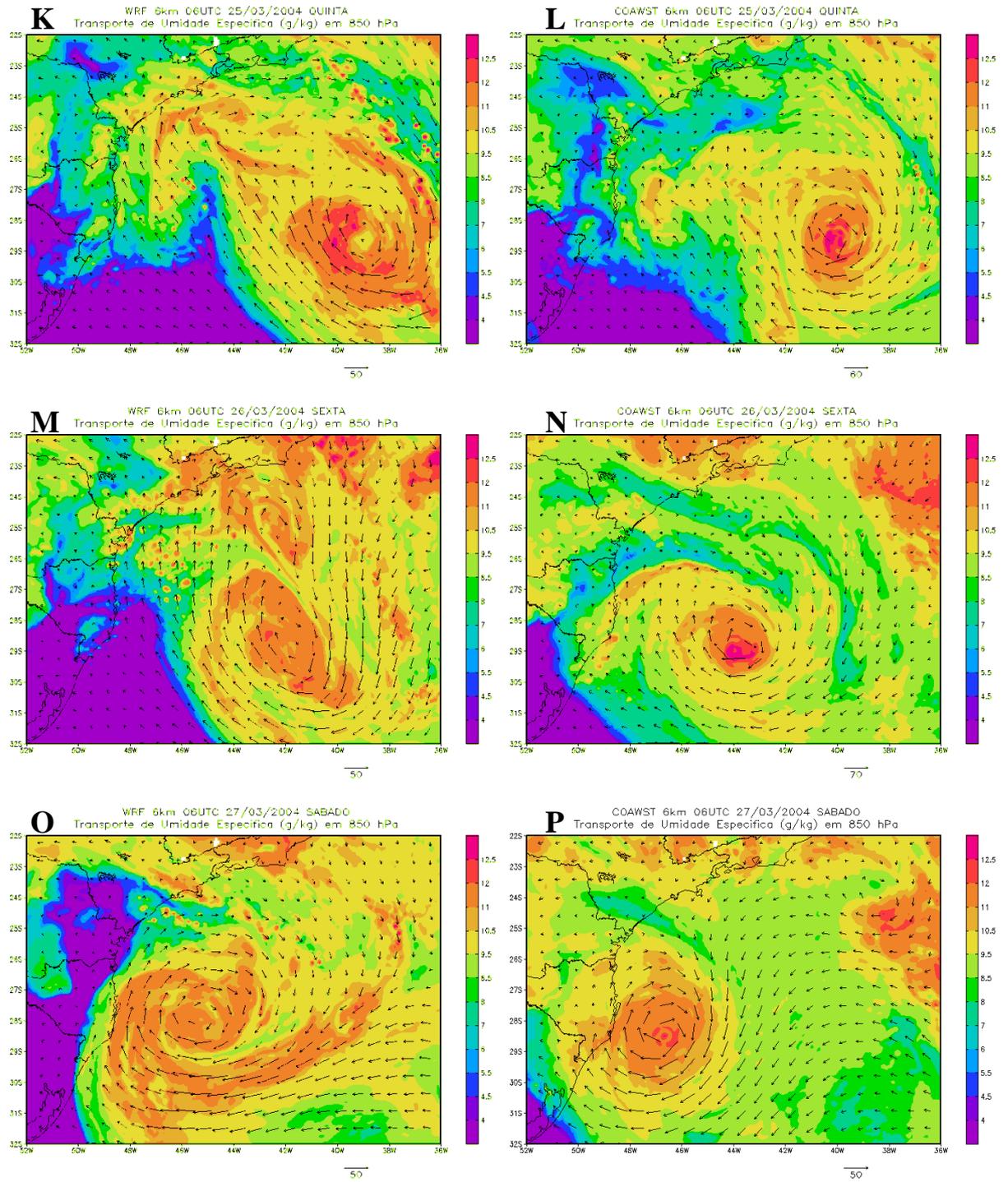


Figura 16 – Continuação.

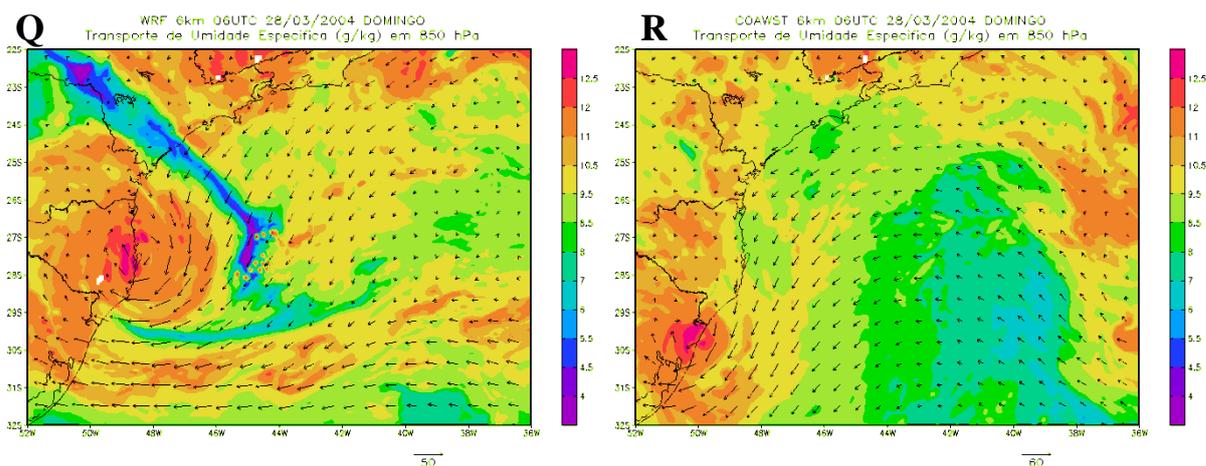


Figura 16 – Continuação.

Com relação à distribuição espacial da precipitação e do vento a 10 metros da superfície observa-se, no dia 20 (Figuras 78A e B), precipitação que varia de 10 a 70 mm na faixa leste de SC, PR e SP, decorrentes de um ciclone extratropical, assim como ventos moderados da ordem de 10 m/s. No dia 21 (Figuras 17C e D) os ventos seguem moderados e, em alguns pontos em torno do centro de baixa pressão, chegam a 15 m/s nas duas simulações; porém, diferentemente do estágio inicial, neste instante há convecção profunda na retaguarda do sistema, chegando até 200mm tanto nos campos simulados pelo WRF quanto pelo COAWST. Estes núcleos perdem intensidade ao longo dos dias 22, 23 e 24, com aparente menor correspondência da localização dos núcleos em ambas simulações. Ao longo do deslocamento do Catarina no sentido leste-sul, não foram registrados ventos intensos no centro do ciclone ou nas regiões periféricas.

Por outro lado, no dia 25 (Figuras 17K e L), o WRF registra ventos de até 15 m/s, com precipitação fraca a sudeste do sistema, enquanto o COAWST indica ventos de 20 m/s e chuva em torno do centro de baixa superior a 100mm, sendo indicativo de um maior desenvolvimento vertical do ciclone. No dia 26 (Figuras 17M e N), durante o avanço do Catarina em direção à costa brasileira, a simulação acoplada intensifica os ventos chegando a 30 m/s, com precipitação entre 10 e 100 mm ao sul do sistema. O WRF, por sua vez, não representa estes ventos mais fortes, alcançando no máximo 15 m/s e precipitação de até 70mm. No dia 27 de Março (Figuras 17O e P), observa-se ausência de precipitação próxima ao centro do ciclone nas duas simulações, o que faz todo o sentido, pois conforme mostrado na revisão bibliográfica, nestes instantes é verificado a presença do “olho”. Quando o Catarina avança sobre o sul do Brasil (Figuras 17Q e R), os ventos em ambas as simulações são mais fracos, mas de qualquer forma

o COAWST indica ventos de até 20 m/s, acompanhados de precipitação de até 60 mm entre o litoral norte do Rio Grande do Sul, e o litoral sul de Santa Catarina, enquanto o modelo atmosférico tem ventos de no máximo 5m/s com acumulado máximo de 20mm.

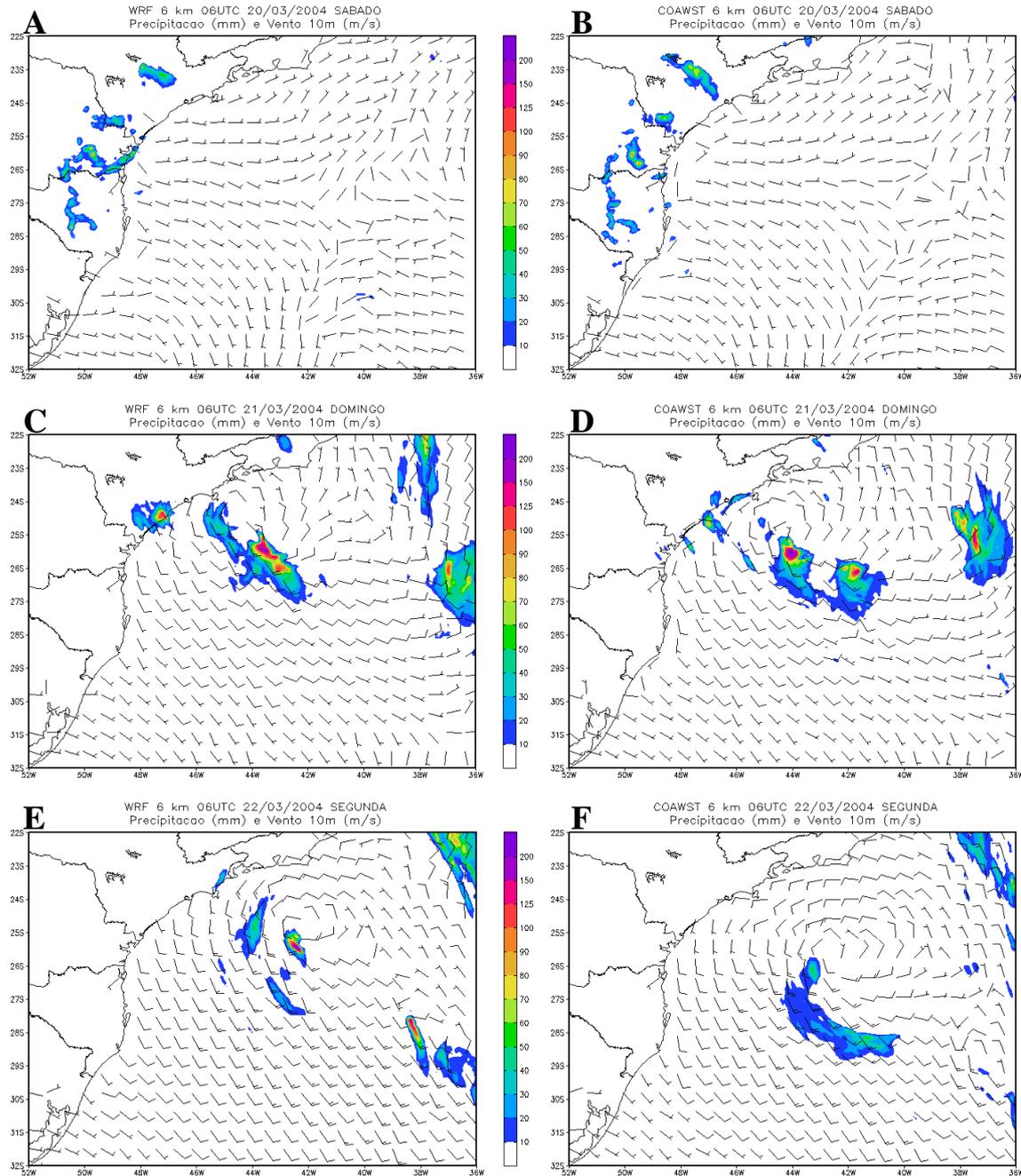


Figura 17 – Vento a 10m de altura em m/s (barbelas) e precipitação em mm (sombreado) entre 06 UTC de 20 de Março e 06 UTC de 28 de Março de 2004. A coluna da esquerda representa os campos simulados pelo WRF, e a da direita, pelo COAWST.

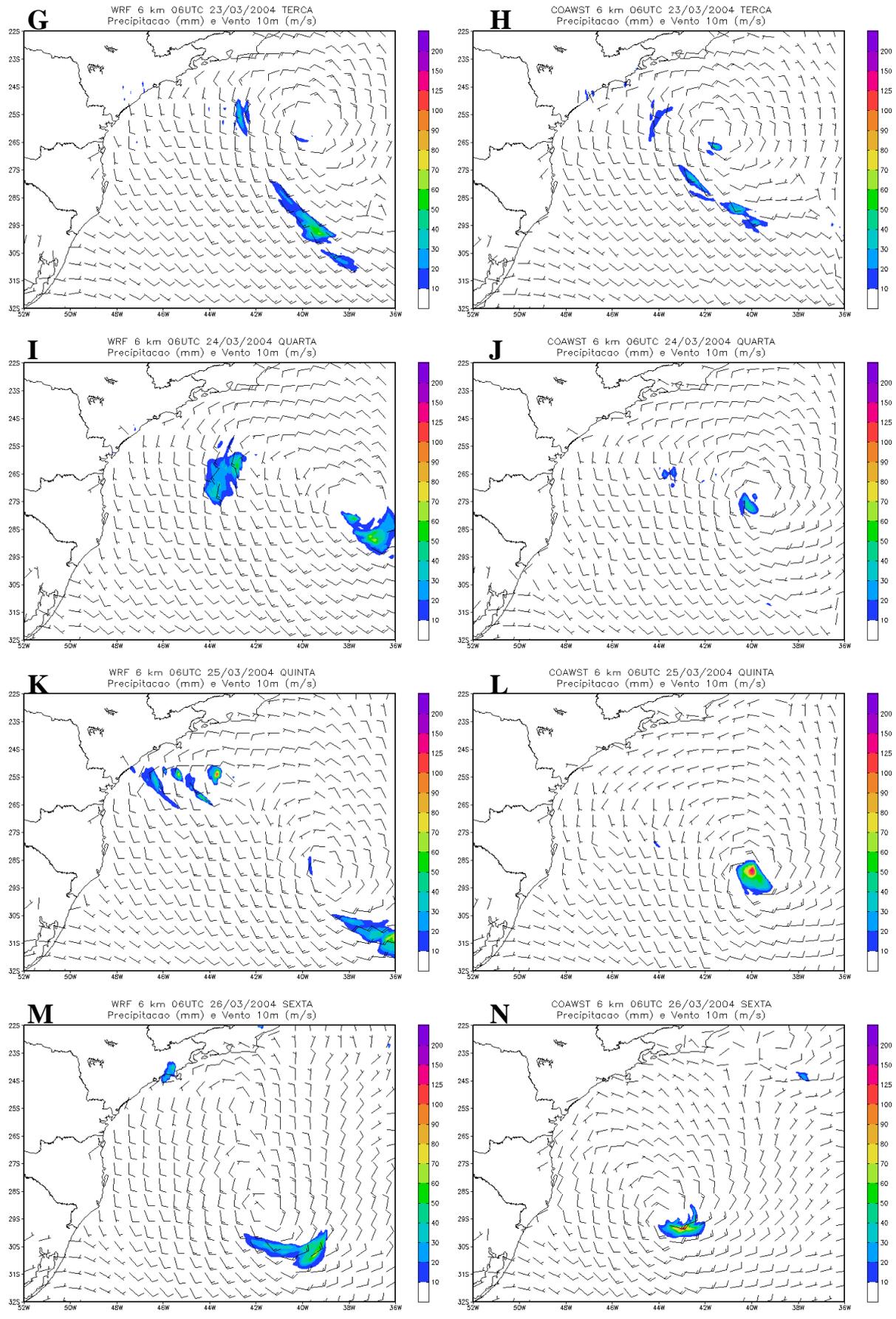


Figura 17 – Continuação.

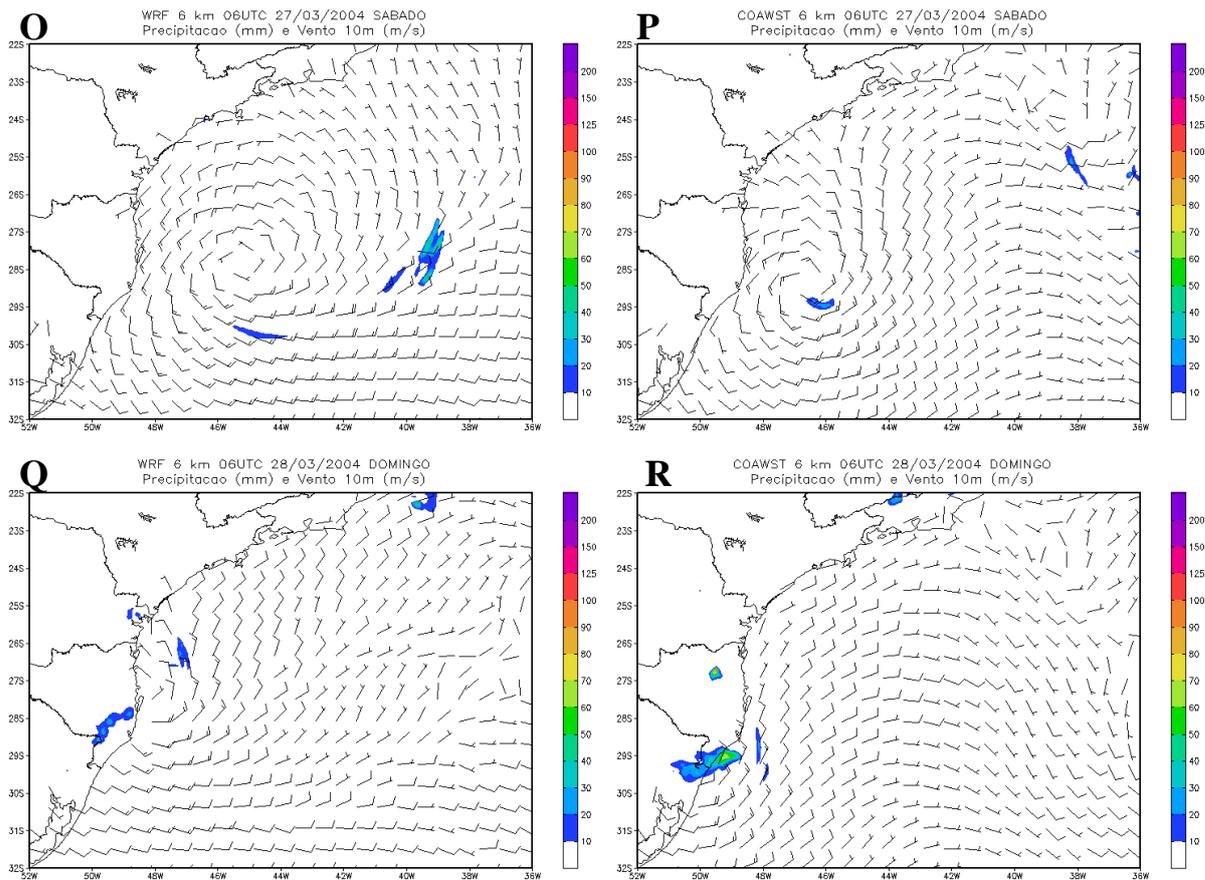


Figura 17 – Continuação.

Na tentativa de identificar os ingredientes que determinaram as diferenças entre as duas simulações, foi realizada uma análise Lagrangeana dos fluxos de calor latente e sensível, considerando uma área de  $2^\circ \times 2^\circ$  em torno do centro do ciclone em cada um dos instantes apresentados anteriormente. É preciso reforçar que, como as trajetórias são distintas, também serão distintas as áreas analisadas em cada instante de tempo.

No primeiro instante analisado (Figuras 18A e 18B), percebe-se a nítida diferença entre o modelo atmosférico e acoplado: enquanto o WRF (Figura 18A) indica fluxos variando de 90 a  $150 \text{ W/m}^2$  em toda caixa em análise, o COAWST por sua vez, indica uma extensa área com fluxos próximo a zero, mas ao longo da costa e também no canto sudeste da região do ciclone, os fluxos variam de 10 a  $100 \text{ W/m}^2$ . Nas Figuras 18C e 18D, observa-se uma mudança no padrão dos fluxos, pois agora no WRF os fluxos de calor latente variam entre 10 e  $30 \text{ W/m}^2$ , enquanto na região em torno a baixa os fluxos são mais intensos, chegando a valores máximos de  $350 \text{ W/m}^2$ . Na representação do COAWST, na região central do ciclone, os valores alcançam  $150 \text{ W/m}^2$  e neste caso nas regiões adjacentes, os fluxos também atingem  $350 \text{ W/m}^2$ .

No dia 22, os fluxos se intensificam em grande parte da área considerada pelo WRF, enquanto o COAWST segue indicando fluxos mais baixos no centro do Catarina e com valores mais intensos em sua volta. Nos dias 23 e 24 as duas simulações voltam a apresentar-se mais semelhantes, sendo que no centro do Catarina os fluxos são da ordem de 30 W/m<sup>2</sup>, chegando a 250 W/m<sup>2</sup> nas regiões adjacentes. O dia 25 (Figuras 18K e 18L) representa o instante em que o Catarina deixa de seguir o escoamento leste-sul; na simulação acoplada, há indicativo de um centro de baixa com maior gradiente de pressão e ausência de fluxo no seu núcleo. Nos dias seguintes, onde ocorreu o deslocamento do ciclone para costa do litoral da Região Sul, apesar de algumas diferenças pontuais, as duas simulações indicam perfis de fluxo de calor latente, com valores mínimos na ordem de 20 W/m<sup>2</sup> na região central do Catarina, e ao seu redor os valores máximos encontrados ficam próximos de 200W/m<sup>2</sup>, com variações espaciais.

Na madrugada do dia 28, quando o Catarina atinge os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (Figuras 18Q e R), é observado uma mudança brusca nas distribuições horizontais de fluxo de calor latente. O WRF mostra fluxos intensos que variam de 100 a 250 W/m<sup>2</sup>, com valores mais baixos apenas no seu centro, atingindo valor mínimo de 30 W/m<sup>2</sup>. Por outro lado, a simulação COAWST, que contém menores valores de TSM, indica valores entre 20 e 150 W/m<sup>2</sup> e seu centro, já sobre o continente, tem fluxo de calor latente em torno de 60 W/m<sup>2</sup>.

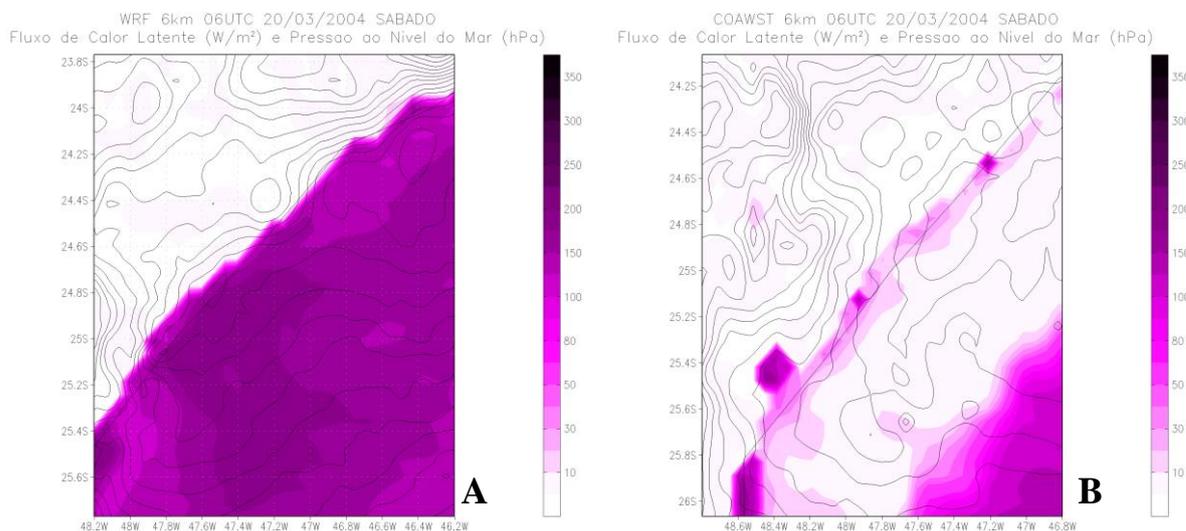
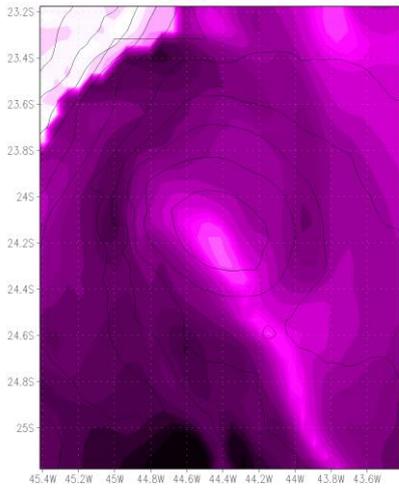


Figura 18 – Fluxo de calor latente em W/m<sup>2</sup> entre 06 UTC de 20 e 06 UTC de 28 de Março de 2004. Em relação ao centro da baixa pressão, cada caixa 2° de lado. A coluna da esquerda representa os campos simulados pelo WRF, e a da direita, pelo COAWST.

WRF 6km 06UTC 21/03/2004 DOMINGO  
Fluxo de Calor Latente ( $W/m^2$ ) e Pressao ao Nivel do Mar (hPa)



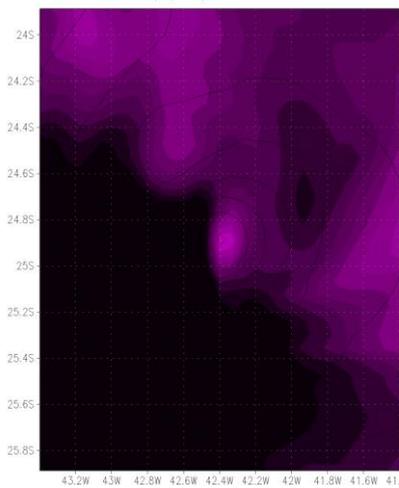
**C**

COAWST 6km 06UTC 21/03/2004 DOMINGO  
Fluxo de Calor Latente ( $W/m^2$ ) e Pressao ao Nivel do Mar (hPa)



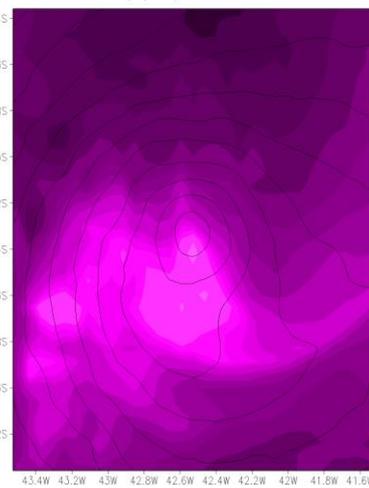
**D**

WRF 6km 06UTC 22/03/2004 SEGUNDA  
Fluxo de Calor Latente ( $W/m^2$ ) e Pressao ao Nivel do Mar (hPa)



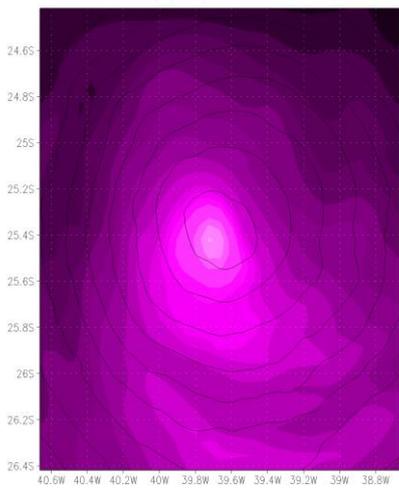
**E**

COAWST 6km 06UTC 22/03/2004 SEGUNDA  
Fluxo de Calor Latente ( $W/m^2$ ) e Pressao ao Nivel do Mar (hPa)



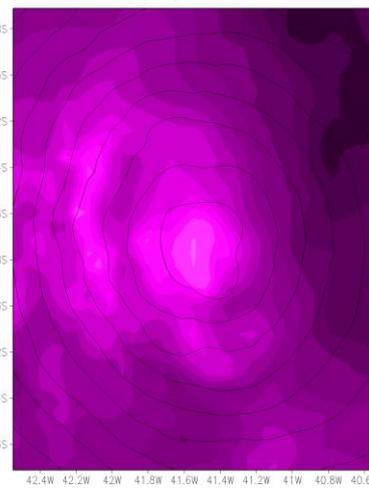
**F**

WRF 6km 06UTC 23/03/2004 TERCA  
Fluxo de Calor Latente ( $W/m^2$ ) e Pressao ao Nivel do Mar (hPa)



**G**

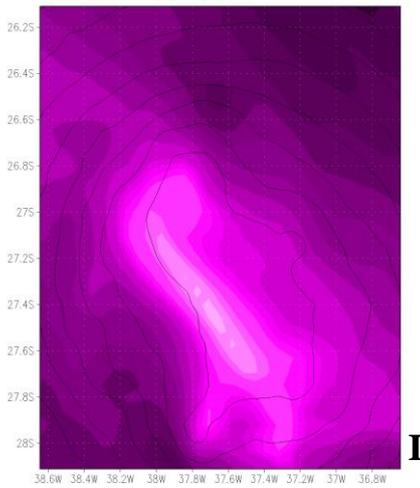
COAWST 6km 06UTC 23/03/2004 TERCA  
Fluxo de Calor Latente ( $W/m^2$ ) e Pressao ao Nivel do Mar (hPa)



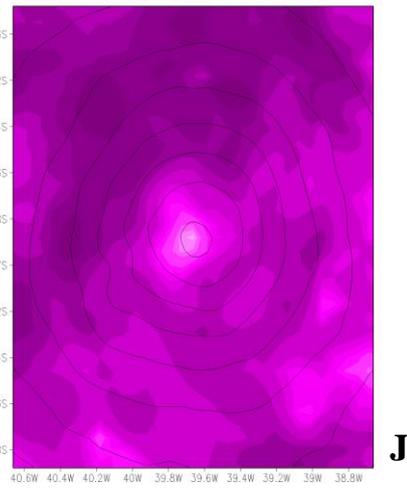
**H**

Figura 18 – Continuação.

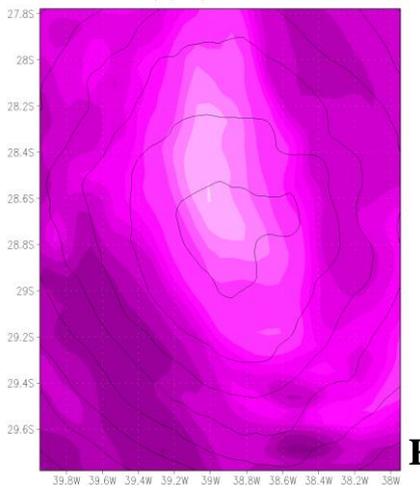
WRF 6km 06UTC 24/03/2004 QUARTA  
Fluxo de Calor Latente ( $W/m^2$ ) e Pressao ao Nivel do Mar (hPa)



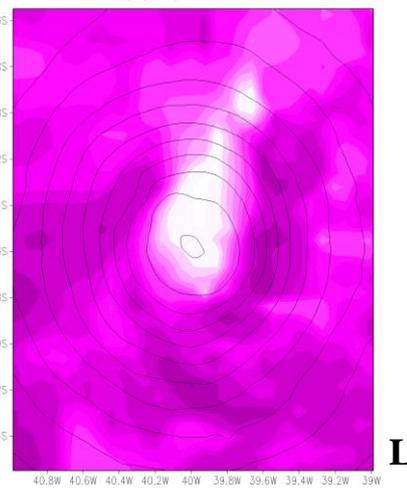
COAWST 6km 06UTC 24/03/2004 QUARTA  
Fluxo de Calor Latente ( $W/m^2$ ) e Pressao ao Nivel do Mar (hPa)



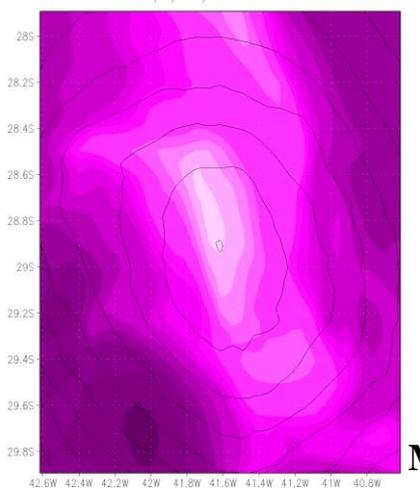
WRF 6km 06UTC 25/03/2004 QUINTA  
Fluxo de Calor Latente ( $W/m^2$ ) e Pressao ao Nivel do Mar (hPa)



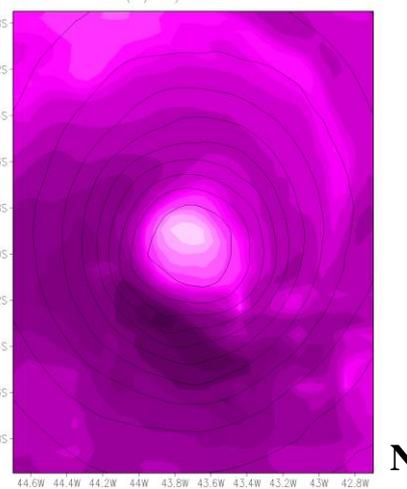
COAWST 6km 06UTC 25/03/2004 QUINTA  
Fluxo de Calor Latente ( $W/m^2$ ) e Pressao ao Nivel do Mar (hPa)



WRF 6km 06UTC 26/03/2004 SEXTA  
Fluxo de Calor Latente ( $W/m^2$ ) e Pressao ao Nivel do Mar (hPa)



COAWST 6km 06UTC 26/03/2004 SEXTA  
Fluxo de Calor Latente ( $W/m^2$ ) e Pressao ao Nivel do Mar (hPa)



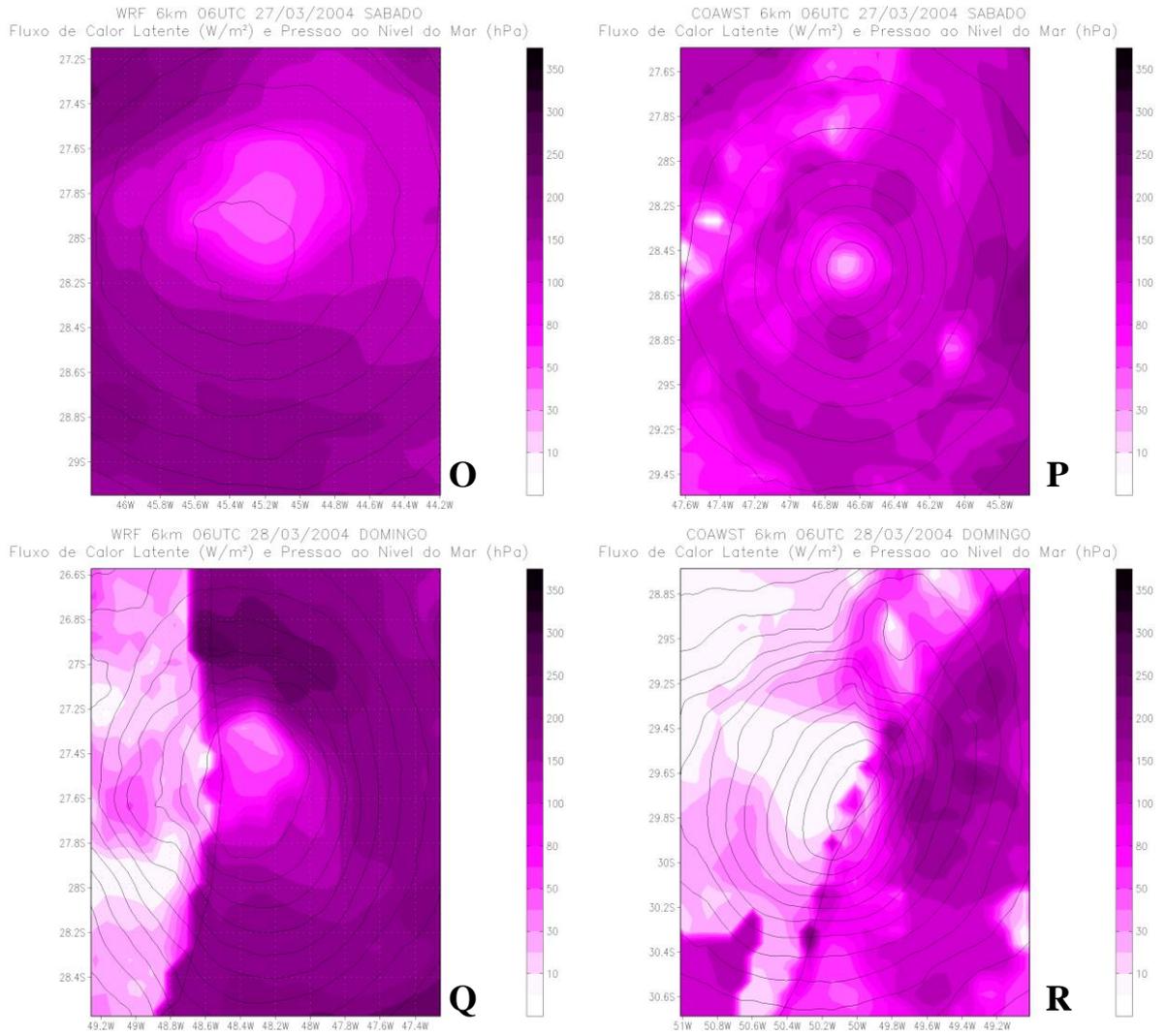


Figura 18 – Continuação.

As Figuras 19 e 20 contém a mesma sequência apresentada na Figuras 18, sendo plotadas em uma única figura em suas posições de interesse, para melhor visualização de sua localização e dos contrastes espaciais.

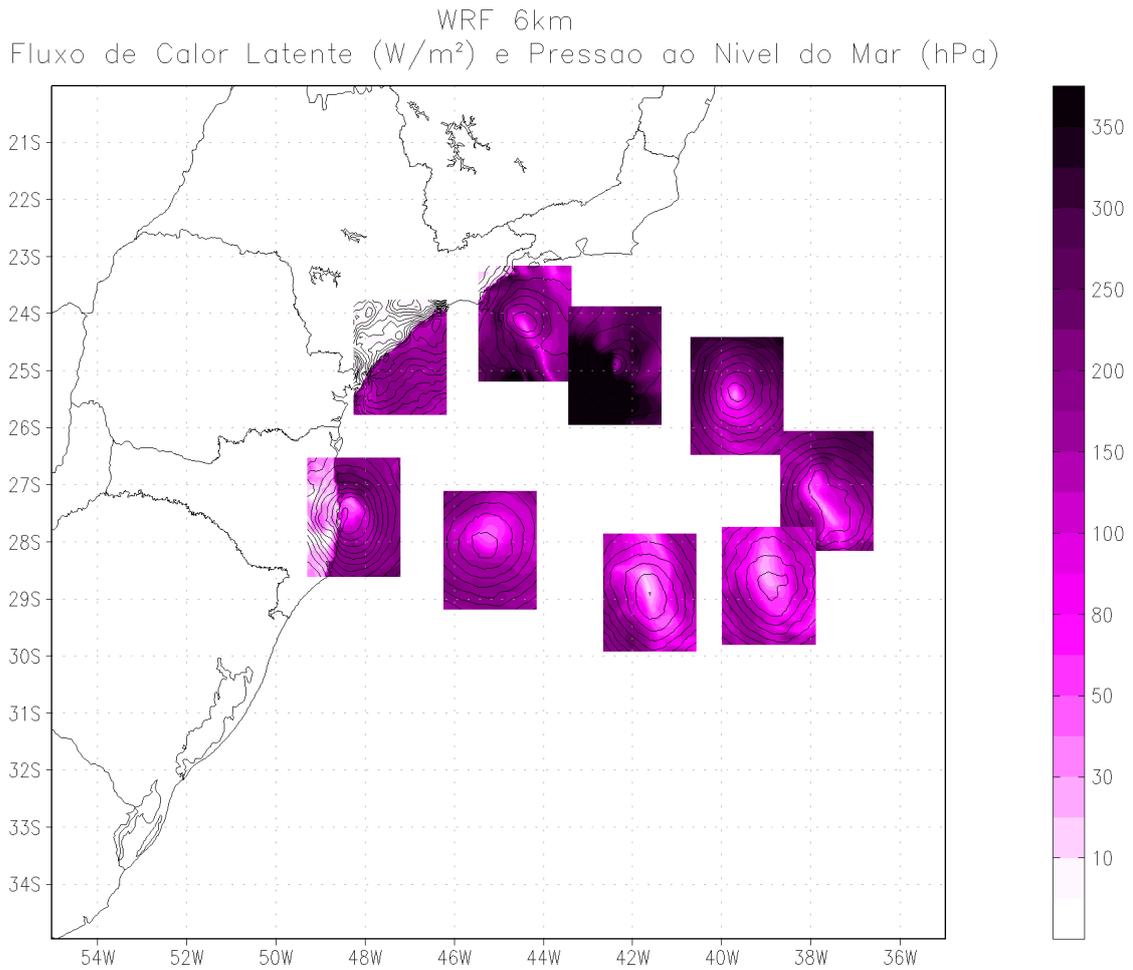


Figura 19 – Fluxo de calor latente ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) para a simulação obtida com o WRF. As caixas estão centradas no centro da baixa pressão a cada 24 horas, entre 06 UTC de 20 de Março e 06 UTC de 28 de Março de 2004. Em relação ao centro da baixa pressão, cada caixa possui 2° de lado.

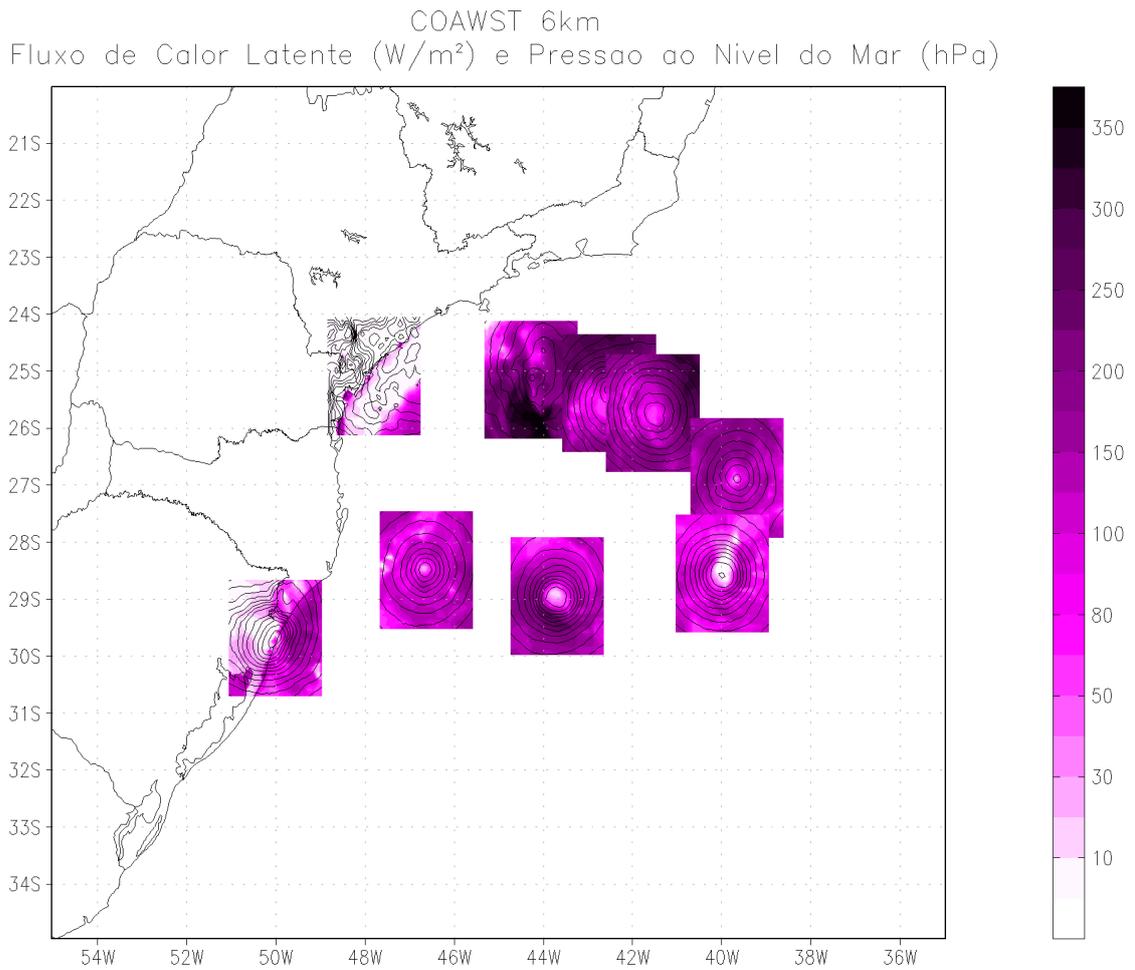


Figura 20 – Fluxo de calor latente ( $W/m^2$ ) para a simulação obtida com o COAWST. As caixas estão centradas no centro da baixa pressão a cada de 24 horas, entre 06 UTC de 20 de Março e 06 UTC de 28 de Março de 2004. Em relação ao centro da baixa pressão, cada caixa possui 2° de lado.

A análise lagrangeana dos fluxos de calor sensível, também considerando uma caixa com 2° de resolução em relação ao centro do ciclone mostra que, no dia 20 de Março (Figuras 21A e 22B), a área com fluxos mais intensos de até 50 W/m<sup>2</sup> é mais espalhada na simulação utilizando o WRF. Além disso, o COAWST indica fluxos mais baixos ao longo da costa, e seu máximo atinge 40 W/m<sup>2</sup>. Na sequência das análises, novamente ocorrem diferenças entre as duas simulações. No WRF (Figura 21C) próximo à costa tem-se fluxos negativos de até -70 W/m<sup>2</sup>, enquanto a região adjacente do Catarina atinge fluxo máximo de 130 W/m<sup>2</sup> e seu centro indica 10 W/m<sup>2</sup>. Neste mesmo instante, o COAWST (Figura 21D) tem valores entre 50 e 70W/m<sup>2</sup> próximo a seu centro, e ao sul desta região também são registrados valores máximos da ordem de 130W/m<sup>2</sup>. No decorrer do dia 22 (Figuras 21E e F), o padrão de fluxo de calor sensível é totalmente distinto em cada simulação: enquanto o WRF representa sua região em torno ao centro de baixa com valores elevados entre 50 e 130 W/m<sup>2</sup>, o COAWST indica um padrão que varia de -10 a 60 W/m<sup>2</sup>. Na análise do dia 23 (Figuras 21G e H), o padrão das simulações volta a ficar parecido, com valor máximo não ultrapassando os 50 W/m<sup>2</sup>. Porém, no dia 24, as simulações voltam a apresentar peculiaridades, pois, enquanto o WRF (Figura 21I) tem um centro com 10 W/m<sup>2</sup> e apresenta a região sul em relação à baixa de superfície com 80 W/m<sup>2</sup>, o COAWST (Figura 21J), apesar do centro também ser de 10 W/m<sup>2</sup>, a oeste do ciclone tem-se 60 W/m<sup>2</sup> e a leste da baixa -20 W/m<sup>2</sup>. No dia 25, o COAWST segue indicando valores negativos.

A partir do dia 26, com a mudança de trajetória para oeste, os fluxos se intensificam na simulação acoplada (Figura 21N) atingindo fluxos de calor sensível de até 90W/m<sup>2</sup>, situação está que também ocorre no modelo atmosférico (Figura 21M). No dia 27, véspera do ciclone avançar sobre o continente, os fluxos diminuem consideravelmente nas duas simulações, ficando próximos a 10 W/m<sup>2</sup> em seu centro e regiões adjacentes. Finalmente, no dia 28 (Figuras 21Q e R), é observada uma mudança nas distribuições de fluxo de calor sensível. O WRF mostra fluxos entre 10 e 50 W/m<sup>2</sup>, enquanto o COWST indica valores mais baixos entre -30 e 30W/m<sup>2</sup>, em função dos baixos valores de TSM desta simulação.

Assim como feito para o fluxo de calor latente, as Figuras 22 e 23 representam, respectivamente para o WRF e para o COAWST, a mesma análise da Figura 21, apenas sendo indicada na mesma figura, para melhor visualização de suas localizações.

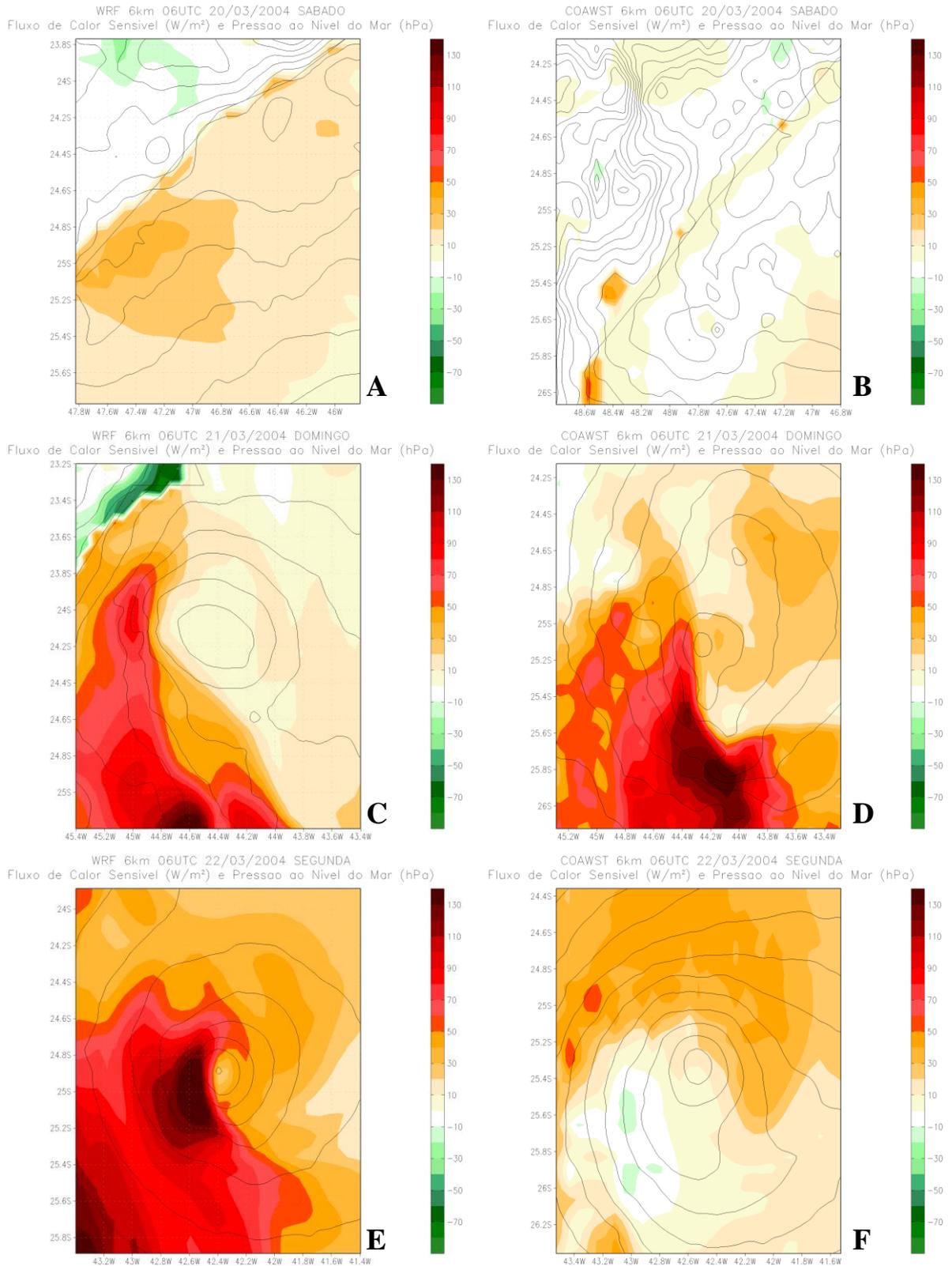
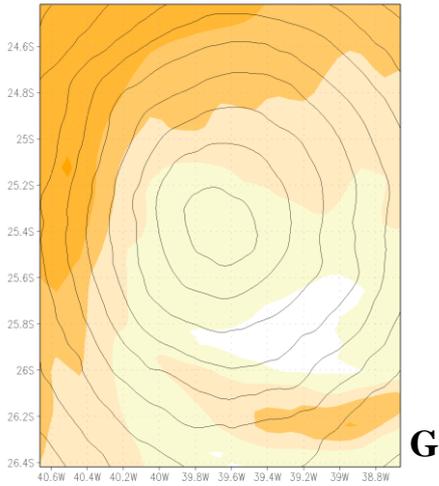


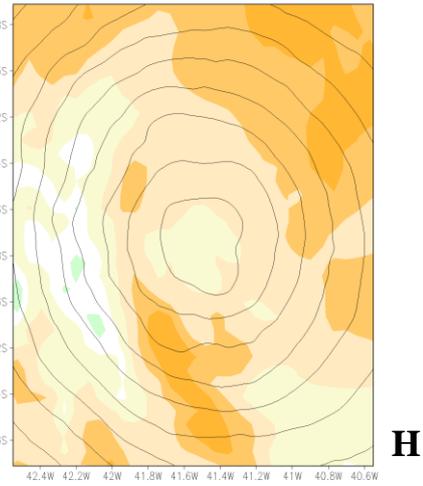
Figura 21 – Fluxo de calor sensível em W/m<sup>2</sup> entre 06 UTC de 20 de Março e 06 UTC de 28 de Março de 2004. Em relação ao centro da baixa pressão, cada caixa possui 2° de lado.

A coluna da esquerda representa os campos simulados pelo WRF, e a da direita, pelo COAWST.

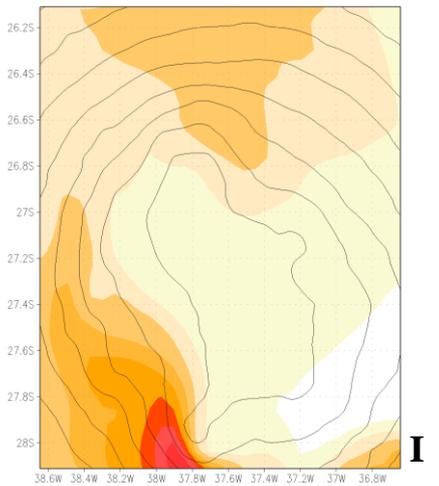
WRF 6km 06UTC 23/03/2004 TERÇA  
Fluxo de Calor Sensível (W/m<sup>2</sup>) e Pressão ao Nível do Mar (hPa)



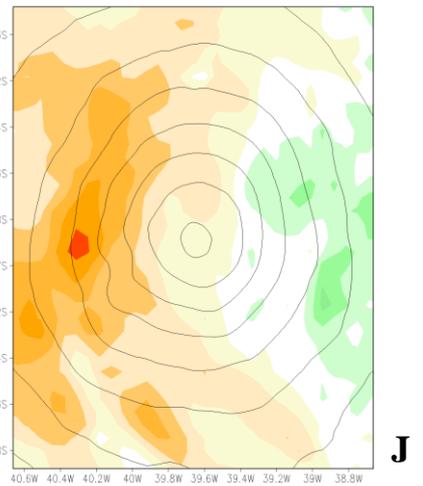
COAWST 6km 06UTC 23/03/2004 TERÇA  
Fluxo de Calor Sensível (W/m<sup>2</sup>) e Pressão ao Nível do Mar (hPa)



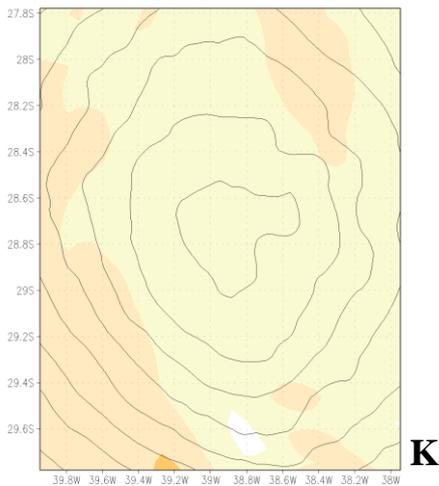
WRF 6km 06UTC 24/03/2004 QUARTA  
Fluxo de Calor Sensível (W/m<sup>2</sup>) e Pressão ao Nível do Mar (hPa)



COAWST 6km 06UTC 24/03/2004 QUARTA  
Fluxo de Calor Sensível (W/m<sup>2</sup>) e Pressão ao Nível do Mar (hPa)



WRF 6km 06UTC 25/03/2004 QUINTA  
Fluxo de Calor Sensível (W/m<sup>2</sup>) e Pressão ao Nível do Mar (hPa)



COAWST 6km 06UTC 25/03/2004 QUINTA  
Fluxo de Calor Sensível (W/m<sup>2</sup>) e Pressão ao Nível do Mar (hPa)

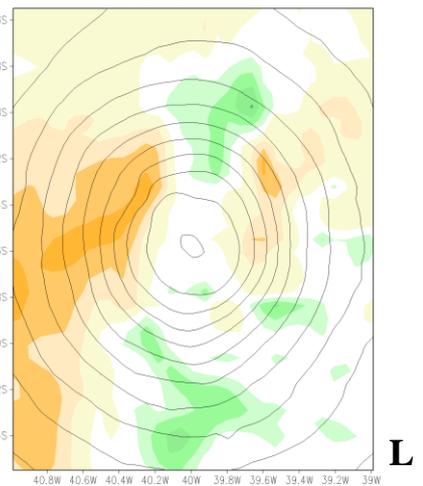
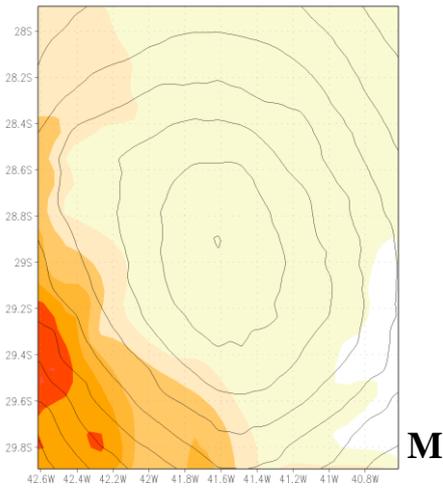
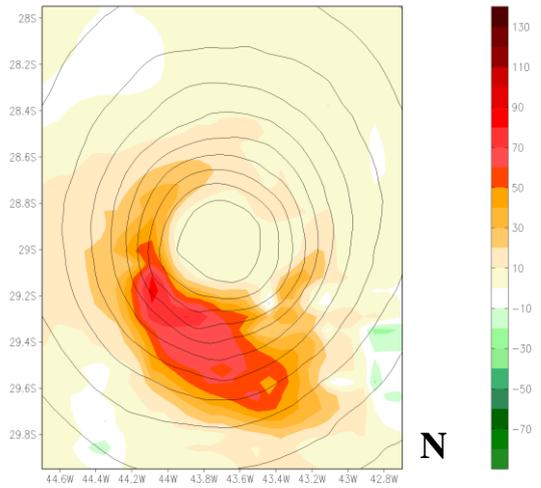


Figura 21 – Continuação.

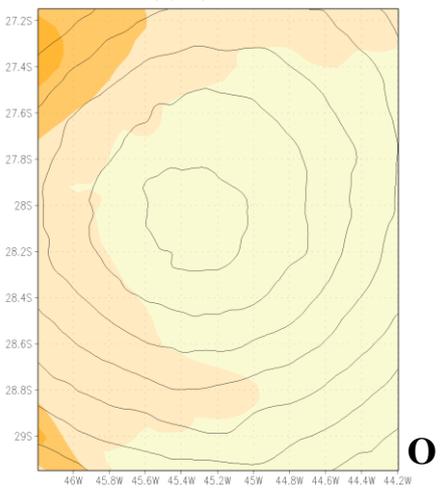
WRF 6km 06UTC 26/03/2004 SEXTA  
Fluxo de Calor Sensível (W/m<sup>2</sup>) e Pressão ao Nível do Mar (hPa)



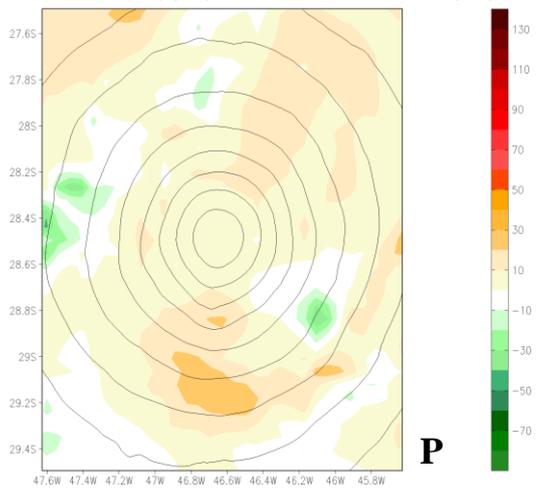
COAWST 6km 06UTC 26/03/2004 SEXTA  
Fluxo de Calor Sensível (W/m<sup>2</sup>) e Pressão ao Nível do Mar (hPa)



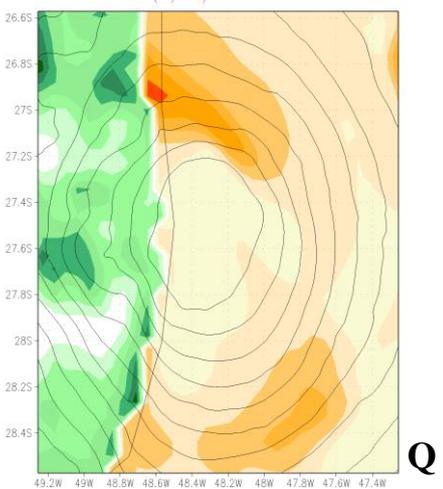
WRF 6km 06UTC 27/03/2004 SABADO  
Fluxo de Calor Sensível (W/m<sup>2</sup>) e Pressão ao Nível do Mar (hPa)



COAWST 6km 06UTC 27/03/2004 SABADO  
Fluxo de Calor Sensível (W/m<sup>2</sup>) e Pressão ao Nível do Mar (hPa)



WRF 6km 06UTC 28/03/2004 DOMINGO  
Fluxo de Calor Sensível (W/m<sup>2</sup>) e Pressão ao Nível do Mar (hPa)



COAWST 6km 06UTC 28/03/2004 DOMINGO  
Fluxo de Calor Sensível (W/m<sup>2</sup>) e Pressão ao Nível do Mar (hPa)

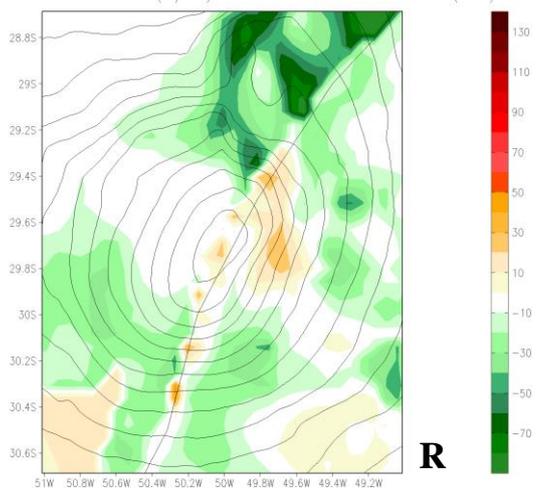


Figura 21 – Continuação.

WRF 6km  
Fluxo de Calor Sensível ( $W/m^2$ ) e Pressão ao Nível do Mar (hPa)

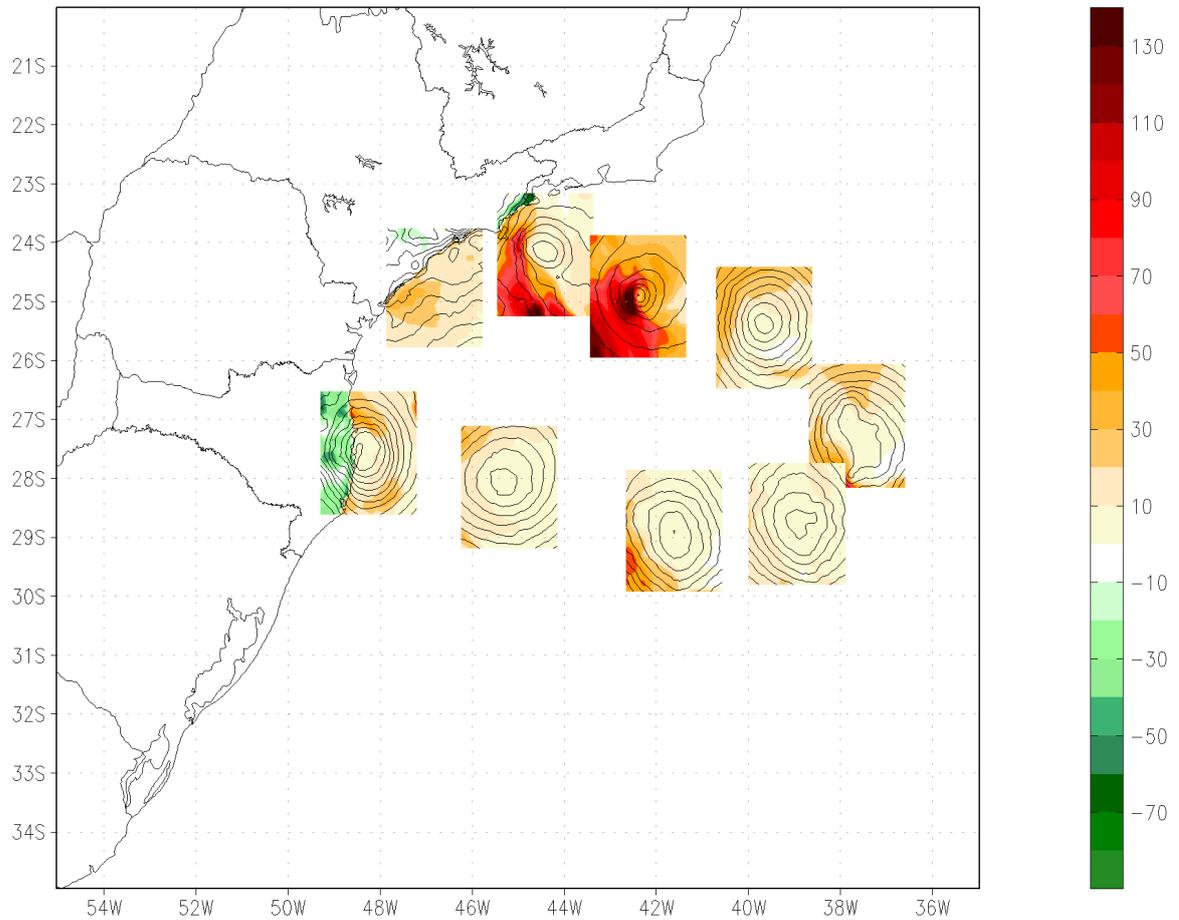


Figura 22 – Fluxo de calor sensível ( $W/m^2$ ) para simulação obtida com o WRF. As caixas estão centradas no centro da baixa pressão a cada 24 horas, entre 06 UTC de 20 de Março e 06 UTC de 28 de Março de 2004. Em relação ao centro da baixa pressão, cada caixa possui 2° de lado.

COAWST 6km  
Fluxo de Calor Sensível ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) e Pressão ao Nível do Mar (hPa)

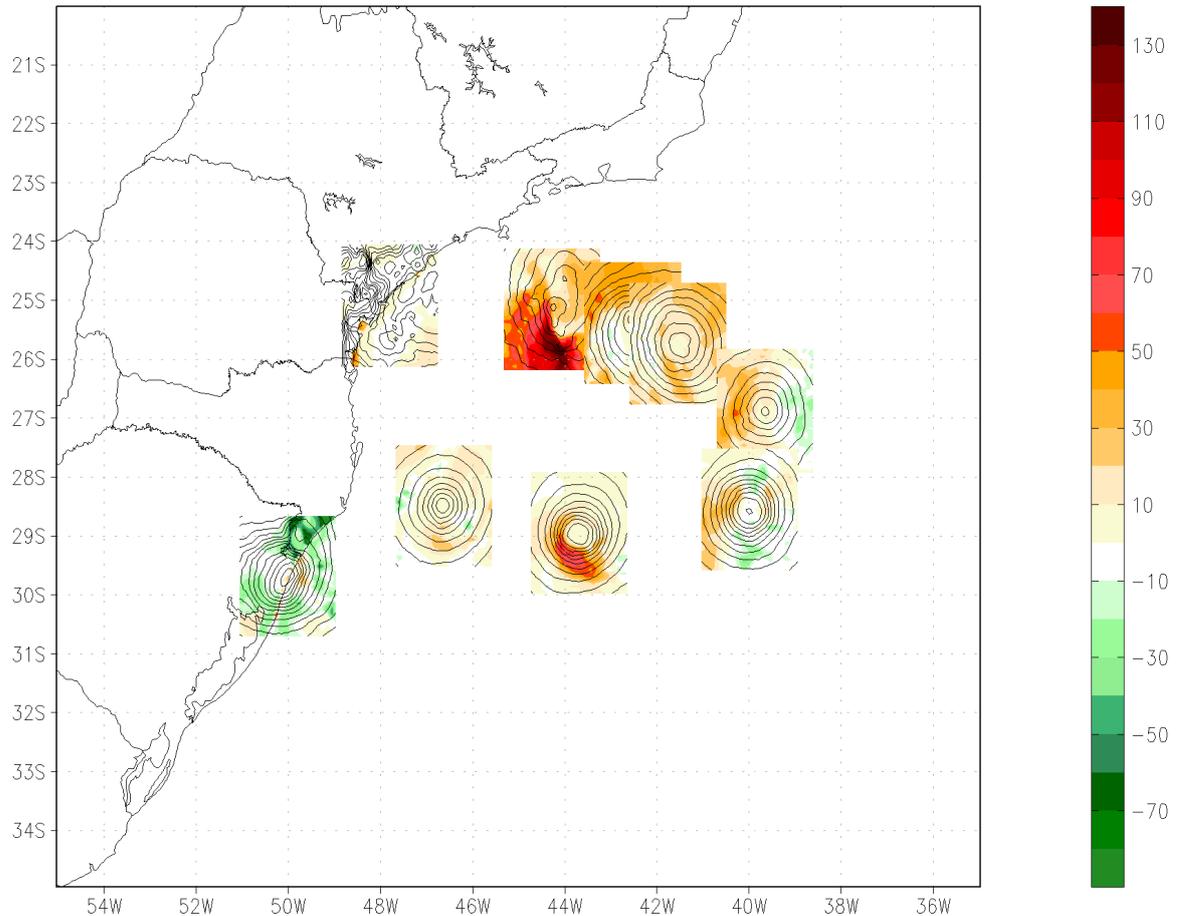


Figura 23 – Fluxo de calor sensível ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) para a simulação obtida com o COAWST. As caixas estão centradas no centro da baixa pressão a cada 24 horas, entre 06 UTC de 20 de Março e 06 UTC de 28 de Março de 2004. Em relação ao centro da baixa pressão, cada caixa possui  $2^\circ$  de lado.

No que diz respeito à estrutura dos ciclones, foi realizada a análise do diagrama de fases para as simulações com o WRF (Figuras 24 e 25) e com o COAWST (Figuras 26 e 27). Valores negativos de  $-V_T$  indicam um núcleo frio, já valores positivos mostram um núcleo quente. Assim, temos que:

- Ciclone extratropical:  $-|V_T^L|/|V_T^U|$  são negativos, sendo que  $-|V_T^U|$  é maior;
- Ciclone tropical:  $-|V_T^L|$  e  $-|V_T^U|$  são positivos, sendo que  $-|V_T^L|$  é maior.

Conforme estabelecido por Hart (2003), o diagrama de fases será apresentado em dois gráficos: parâmetros B e  $-V_T^L$  e parâmetros  $-V_T^L$  e  $-V_T^U$ . O início do sistema é dado pelo ponto

“o” e o final por “x”. As cores dos pontos são referentes à intensidade do centro de baixa pressão e o tamanho do círculo refere-se ao tamanho da região que possui os ventos sustentados.

A Figura 24 representa os parâmetros  $B$  e  $-V_T^L$  para a simulação obtida com o WRF. O ciclone começa às 06Z do dia 20 de Março, sendo que neste instante o CPS mostra um sistema com fraca assimetria térmica bem como com núcleo quente moderado em ambos baixos e altos níveis. Durante o desenvolvimento do sistema ocorre um pequeno aumento da assimetria térmica na região, indicando assim um aumento da inclinação com altura das superfícies de altura geopotencial; além disso, o sistema se manteve quente em toda a vertical. No dia 23, observa-se que o sistema perdeu gradualmente a assimetria térmica até atingir o limiar entre os dois tipos de sistema. O núcleo quente em baixos níveis também perdeu intensidade atingindo uma região praticamente neutra. No decorrer da evolução do Catarina, o núcleo quente em altos níveis também foi se enfraquecendo, enquanto nos baixos níveis o sistema ficou praticamente neutro. No dia 27 o sistema se tornou simétrico em relação ao campo de altura e manteve-se assim até o período em que se dissipou.

A Figura 25 evidencia que o ciclone Catarina manteve um raso núcleo quente em baixos níveis, desde o seu aparecimento até o momento onde realizou transição de fase para um ciclone extratropical no dia 23; deste instante em diante, o sistema apresenta núcleo frio. Nos dias 24 e 25, o sistema avança para uma faixa próxima a neutralidade e entre os dias 26 e 27 encontra-se em uma região que propicia a transição tropical e com núcleo quente moderado. No dia 28, quando o Catarina atinge o continente, o diagrama volta a indicar uma faixa de neutralidade.

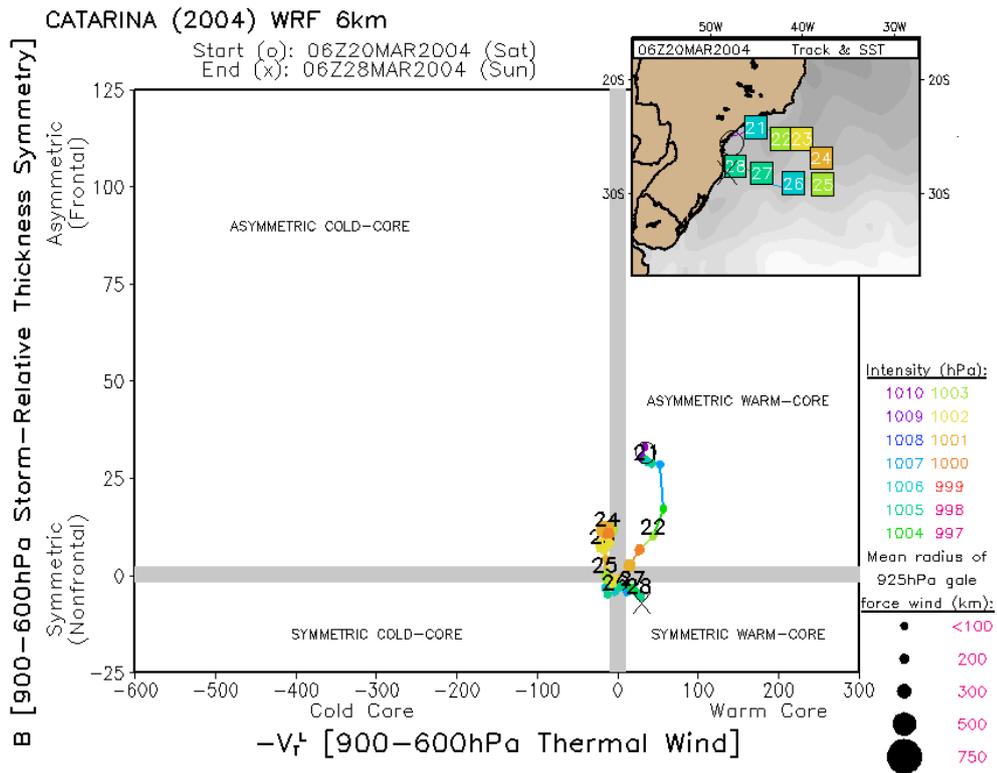


Figura 24 – Diagrama de Fase relacionando os parâmetros B e  $-V_T^L$  para a simulação realizada com o WRF.

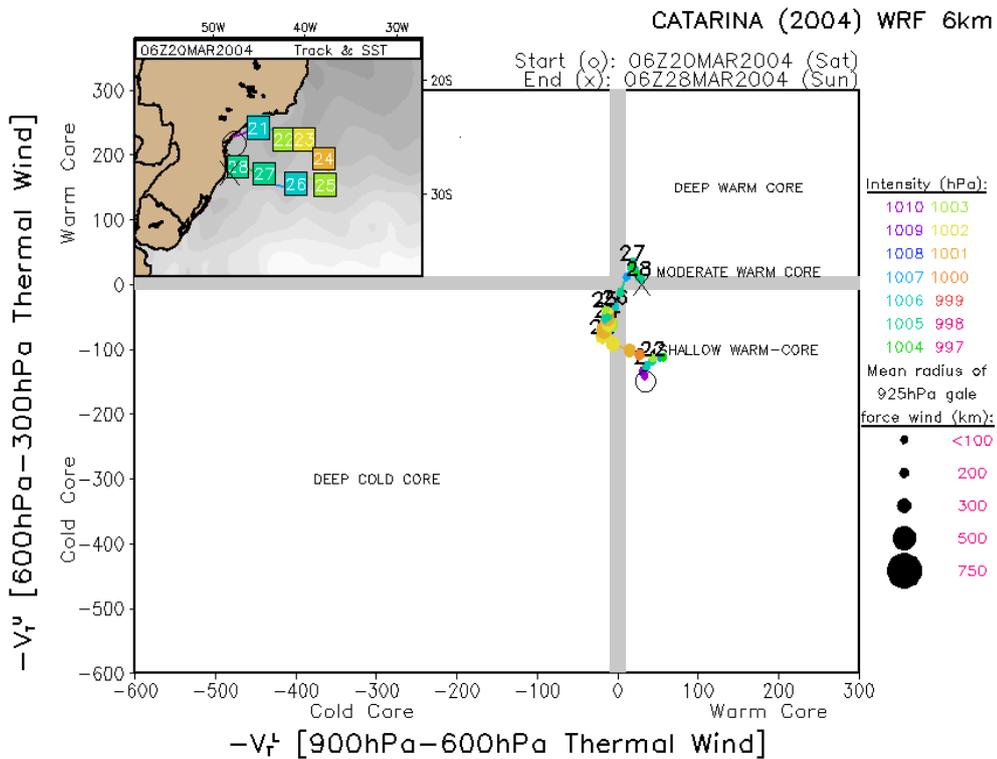


Figura 25 – Diagrama de Fase relacionando os parâmetros  $-V_T^L$  e  $-V_T^U$  para a simulação realizada com o WRF.

Analisando a Figura 26 (parâmetros B e  $-V_T^L$  para a simulação do COAWST), observa-se que logo após o instante inicial, há um aumento da assimetria térmica do ciclone. Durante seu desenvolvimento, mudanças começam a ocorrer no sistema, e há uma redução da assimetria térmica do ciclone e a redução da intensidade do núcleo frio em baixos níveis, de modo que durante o dia 22 já existe um núcleo quente. Durante os dias 23 e 24 o núcleo quente intensificou e posteriormente enfraqueceu e a assimetria do sistema continuou diminuindo até atingir valores próximos à neutralidade nos dias 27 e 28.

Na Figura 27 encontram-se analisados os parâmetros  $-V_T^L$  e  $-V_T^U$  para a simulação obtida com o COAWST. Verifica-se que, durante seu estágio inicial, a intensidade do núcleo frio do ciclone aumentou suavemente em toda sua extensão vertical; porém, na sequência o núcleo frio começou a perder força, o que ocorre de forma mais rápida em baixos níveis. Logo no dia 21, o sinal do vento térmico em baixos níveis inverteu, passando a caracterizar um núcleo quente. A partir do dia 23 o núcleo quente em baixos níveis começou a enfraquecer e a partir deste dia o ciclone teve seu núcleo totalmente quente, até a fase final do Catarina.

De forma geral, conclui-se que o Catarina começou tipicamente como um ciclone extratropical, com núcleo frio e forte assimetria térmica na simulação acoplada. Após o seu desenvolvimento no oceano, ocorre um rápido aprofundamento e o ciclone ganhou um núcleo quente raso que se aprofundou gradativamente até o dia 23. A partir disso, o Catarina continuou se desenvolvendo e intensificando seu núcleo quente e próximo ao dia 27 já estava em um estágio próximo a um núcleo profundamente quente. Além disso, entre os dias 27 e 28 os parâmetros  $-V_T^L$  e  $-V_T^U$  indicam uma transição tropical com evolução característica de furacão.

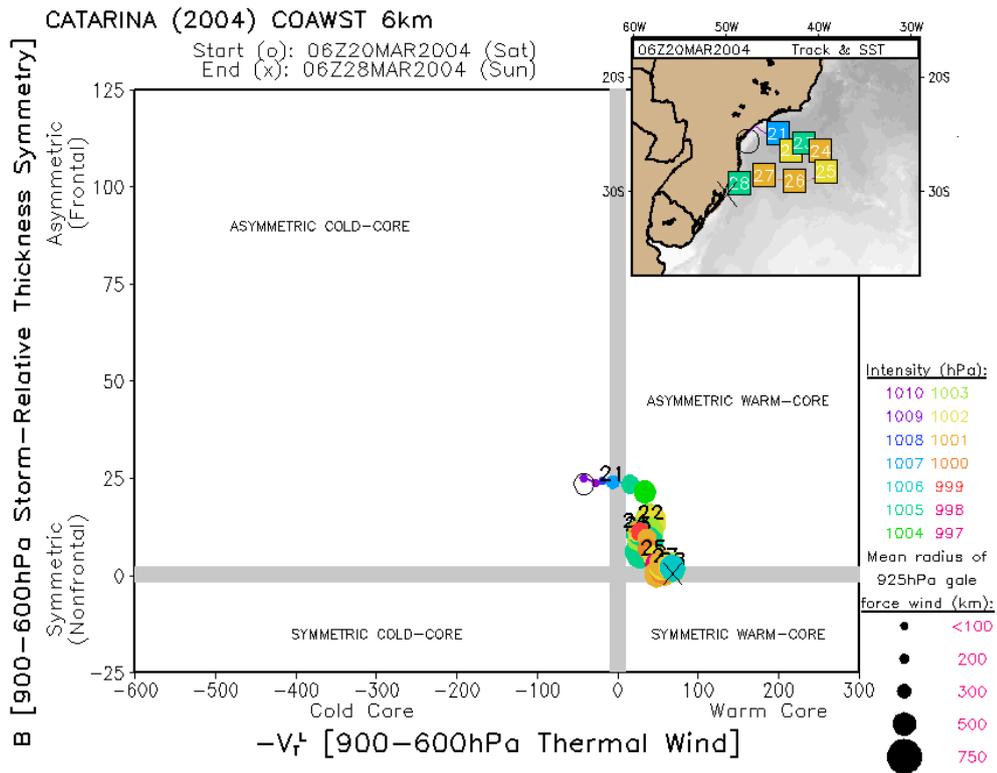


Figura 26 – Diagrama de Fase relacionando os parâmetros B e  $-V_T^L$  para a simulação realizada com o COAWST.

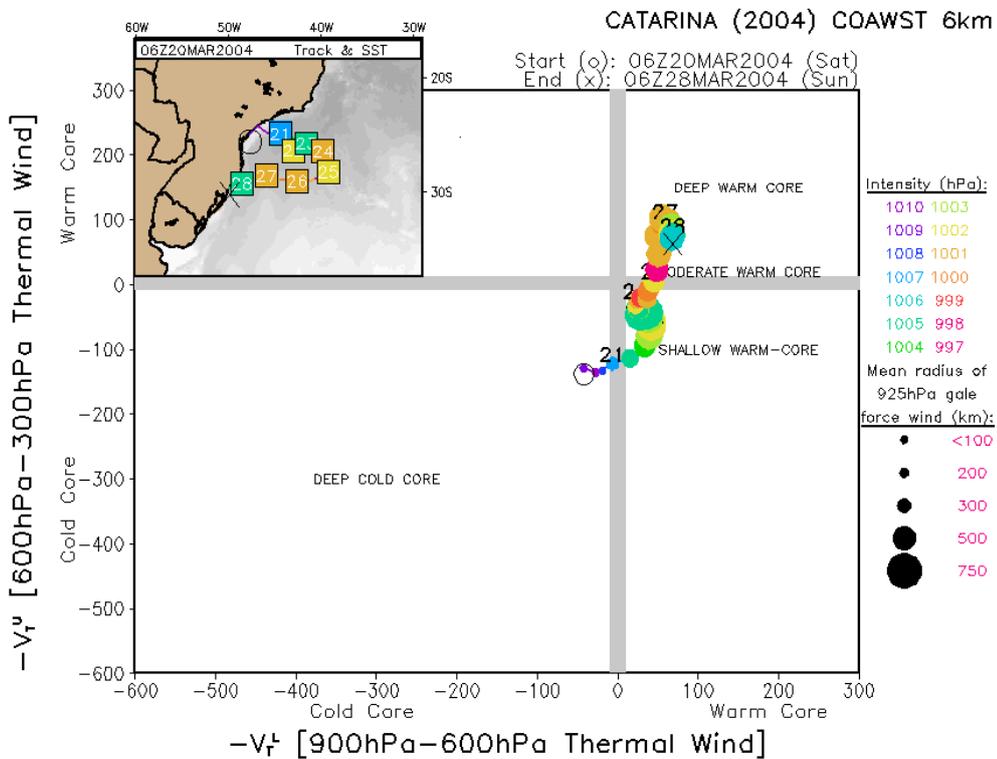


Figura 27 – Diagrama de Fase relacionando os parâmetros  $-V_T^L$  e  $-V_T^U$  para a simulação realizada com o COAWST.

Para completar as informações que possam permitir uma melhor compreensão dos processos que diferenciaram as duas simulações, foram avaliados os perfis verticais dos termos da equação da termodinâmica. Cada instante será representado pela superposição dos perfis verticais dos termos de variação local, advecção horizontal de temperatura, advecção vertical de temperatura/termo adiabático e o termo de resíduo, determinado conforme os demais.

Na fase inicial do ciclone, verifica-se que para a simulação com o WRF (Figura 28A) o termo de variação local possui valores negativos e de pequena intensidade até 350 hPa, após este nível o termo torna-se positivo; já a advecção horizontal apresenta valores positivos em praticamente toda camada, e há uma inversão de sinal a partir do nível de não divergência. A soma da advecção vertical e o termo adiabático apresenta um perfil vertical totalmente positivo até 150 hPa. Em relação ao resíduo, existe um perfil oposto ao termo de movimento vertical. Para a simulação com o COAWST (Figura 28B), todos os perfis em análise são muito próximos de zero até 700 hPa, após este nível os padrões se distinguem, sendo que a advecção horizontal de temperatura assume um perfil totalmente negativo, enquanto a variação local possui pouca variação e nos níveis mais altos possui valores positivos. O termo de movimento vertical adquire valores positivos até 300 hPa, tornando-se negativo até 200 hPa e voltando a ser positivo nos últimos níveis. O resíduo adquire um perfil oposto ao movimento vertical.

No decorrer do desenvolvimento do Catarina, as simulações com o WRF e com o COAWST apresentam perfis verticais totalmente distintos dos termos do balanço de calor. No dia 21, o termo de variação local pouco difere entre ambas simulações, mas este resultado é oriundo de processos completamente distintos entre as simulações, uma vez que o COAWST sugere forte influência do movimento vertical entre 400 e 300 hPa o que determina o perfil do resíduo.

No dia 22, enquanto a simulação com o WRF (Figura 28E) tem como resultado um resíduo positivo apenas em 330 e em 200 hPa, a simulação acoplada realizada com o COAWST (Figura 28F) tem um perfil positivo em toda coluna. O termo relacionado ao movimento vertical e ao termo diabático também difere pouco daquele sugerido pelo WRF, mas, no entanto, a advecção horizontal de temperatura é absolutamente distinta, sendo totalmente positiva de acordo com o WRF e totalmente negativa de acordo com o COAWST. No dia seguinte (23/03), o comportamento dos perfis médios da equação do balanço de calor segue distinto em todos os aspectos nas simulações. Conforme o WRF, a Figura 28G sugere uma advecção horizontal de temperatura positiva máxima nos baixos níveis, com valores positivos e decaindo em toda a coluna, exceto nos níveis de 200 e 150 hPa; o COAWST, por sua vez, sugere um perfil vertical

da advecção horizontal com pouca alteração. Em ambas as simulações, de qualquer maneira, o termo de advecção vertical somado ao termo adiabático apresenta oscilações ao longo da coluna, e em função de sua magnitude, torna-se determinante para o perfil do resíduo.

Em 24 de Março, dia que antecede a mudança de trajetória do ciclone, a simulação com o COAWST passa a identificar valores mais pronunciados do que o WRF, apesar do fato das variações locais de temperatura serem pequenas em ambas simulações. O termo de advecção horizontal é semelhante entre 1000 e 800 hPa, mas o WRF sugere máximos negativos da ordem de 20K/dia entre 300 e 200 hPa e valores próximos a zero no restante da coluna; já o COAWST sugere valores positivos em toda a coluna, com máximo em níveis médios, porém inferiores a 10K/dia. A diferença maior neste instante está novamente no termo associado ao movimento vertical somado ao termo adiabático, o qual é mais intenso no COAWST e determina o perfil do resíduo, configurado por um pronunciado núcleo negativo em 300 hPa de 40K/dia.

No dia 25 (Figura 28K), destaca-se o fato do WRF ter sugerido tanto a variação local de temperatura quanto a soma do termo relacionado ao movimento vertical com o termo adiabático quase nulos até 600hPa, fazendo com que a advecção horizontal positiva tenha determinado o resíduo negativo desde a superfície até este nível. A partir daí o movimento vertical novamente determina o sinal do resíduo no caso do WRF, com alternância entre valores positivos e negativos até 100 hPa. Para a simulação com o COAWST, Figura 28L, a advecção horizontal de temperatura e a variação local de temperatura são muito próximas a zero em toda a coluna, fazendo com que o resíduo seja determinado quase que em sua totalidade pela soma do movimento vertical e o termo adiabático. Não obstante, é necessário ressaltar que não existe qualquer correspondência entre os termos equivalentes ao comparar as duas simulações.

Durante o estágio de deslocamento do Catarina em direção à costa brasileira, o WRF (Figura 28M) indica advecção horizontal de temperatura levemente negativa desde a superfície até 250 hPa, e positiva acima deste nível; o termo relacionado à soma do movimento vertical e o termo adiabático fica próximo a zero até aproximadamente 500 hPa, tornando-se negativo e mínimo em 250 hPa e positivo e máximo em 100 hPa. Aliados a uma pequena variação local de temperatura em toda a coluna, estes perfis determinam o resíduo como sendo levemente positivo até 200 hPa e com máximo em 300 hPa, ficando negativo apenas acima do nível de 150 hPa. Os perfis sugeridos pelo COAWST são totalmente distintos (Figura 28N), com o resíduo sendo determinado basicamente pela soma do movimento vertical e do termo adiabático, a qual apresenta máximo relativo em 700 e em 300 hPa da ordem de 15K/dia.

No dia 27, estágio antes do Catarina atingir o continente, novamente verifica-se padrões distintos nas simulações. Apesar do termo de variação local de temperatura em ambas simulações possuir pequena magnitude, enquanto a simulação com o WRF (Figura 28O) indica valores de advecção horizontal de temperatura próximos a zero até 800 hPa e negativos a partir deste nível, o COAWST sugere valores negativos apenas entre 1000 e 900 hPa, passando a valores positivos e superando 10K/dia em 100 hPa (Figura 28P). O termo relacionado à soma do movimento vertical com o termo adiabático apresenta-se fora de fase ao comparar este instante das simulações, exceto no que se refere ao máximo de aquecimento no nível de 150 hPa. Todos estes aspectos fazem com que o perfil do resíduo seja consideravelmente distinto entre as duas simulações, concordando apenas em relação aos valores negativos encontrados em 150 hPa.

Na madrugada do dia 28, o Catarina já tinha atingido a costa brasileira e as simulações seguem apresentando diferenças significativas. Na Figura 28Q, o WRF indica um perfil positivo do termo de movimento vertical até 350 hPa, este termo volta a ter inversão em 200 e 150 hPa. Ainda em relação ao WRF, a advecção horizontal de temperatura tende a ser negativa ao longo da coluna, o que determina um resíduo positivo, sendo que neste último termo ocorre uma rápida inversão entre 650 e 550 hPa. No COAWST (Figura 28R) destaca-se o perfil de advecção de horizontal de temperatura negativo com valores entre -15 e -25 K/dia ao longo de toda camada. Além disso, a junção do termo de advecção vertical de temperatura com o termo adiabático é negativo até 300 hPa. Em relação ao resíduo, o COAWST sugere um perfil com valores positivos em toda a coluna, atingindo 35 K/dia em 350 hPa.

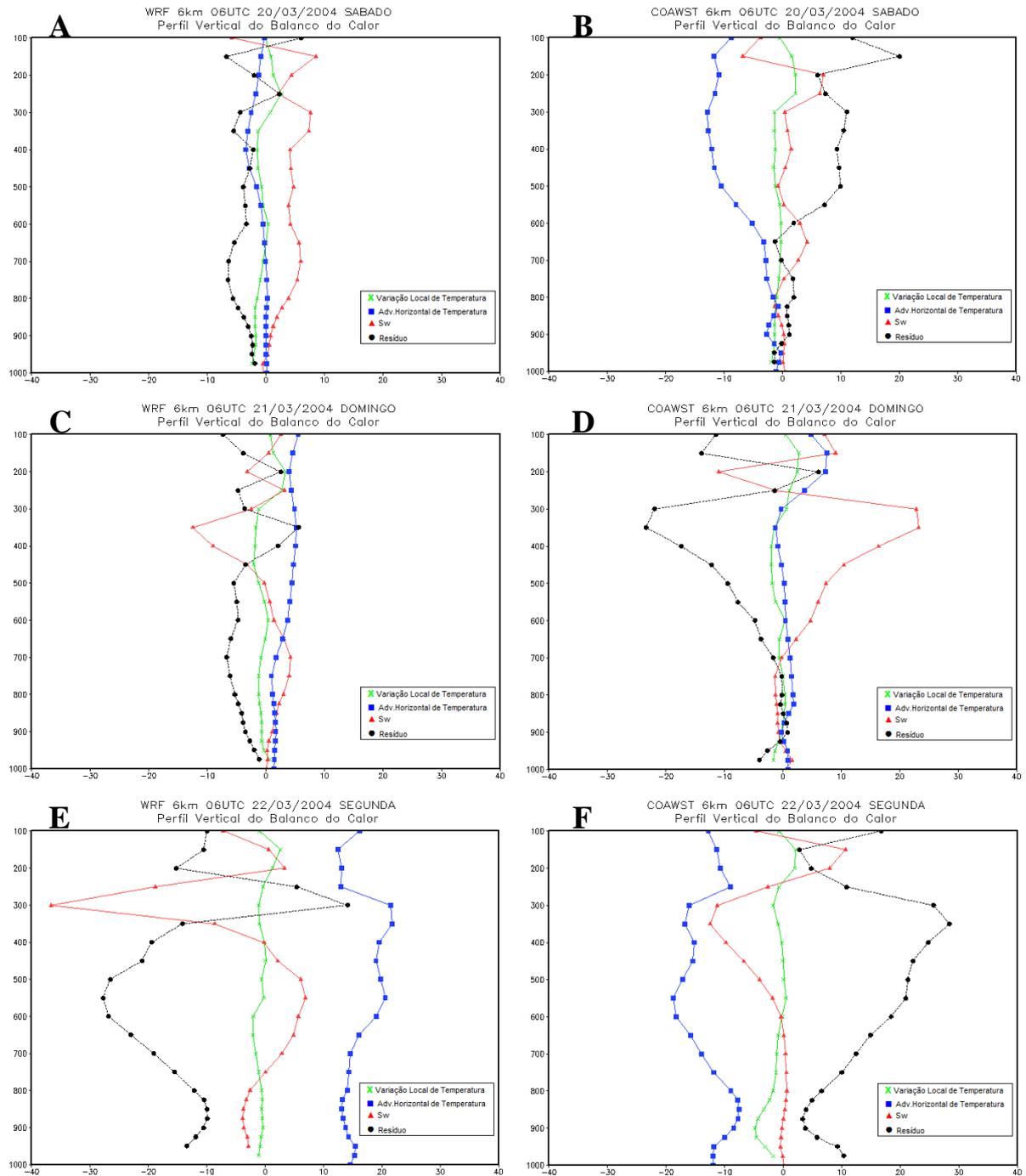


Figura 28 – Perfil vertical médio na área em torno do ciclone em superfície: variação local (linha verde) advecção horizontal de temperatura em K/dia (linha azul), Sw: termo relacionado ao movimento vertical em K/dia (linha vermelha) e resíduo da equação da termodinâmica (linha preta).

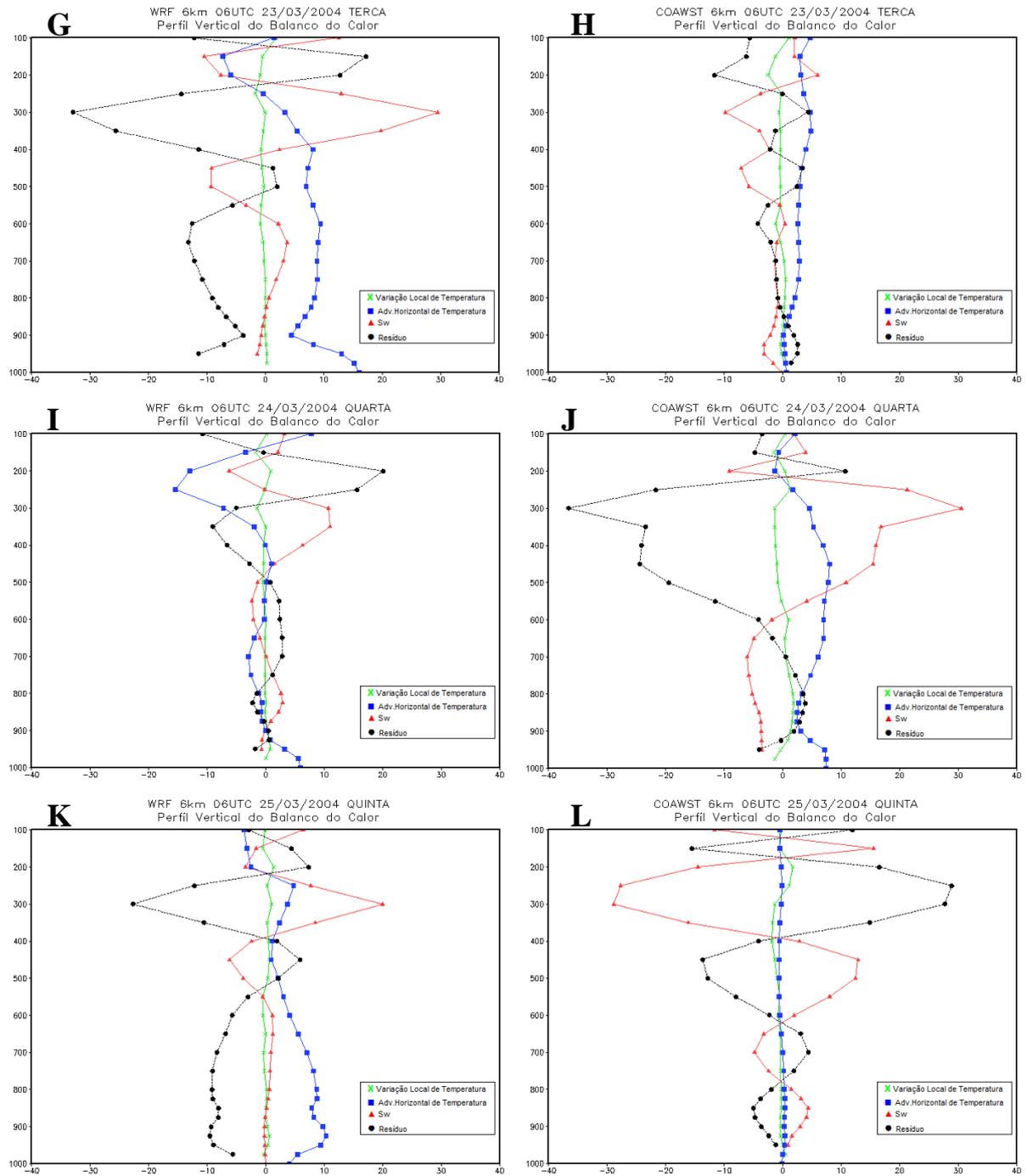


Figura 28 – Continuação.

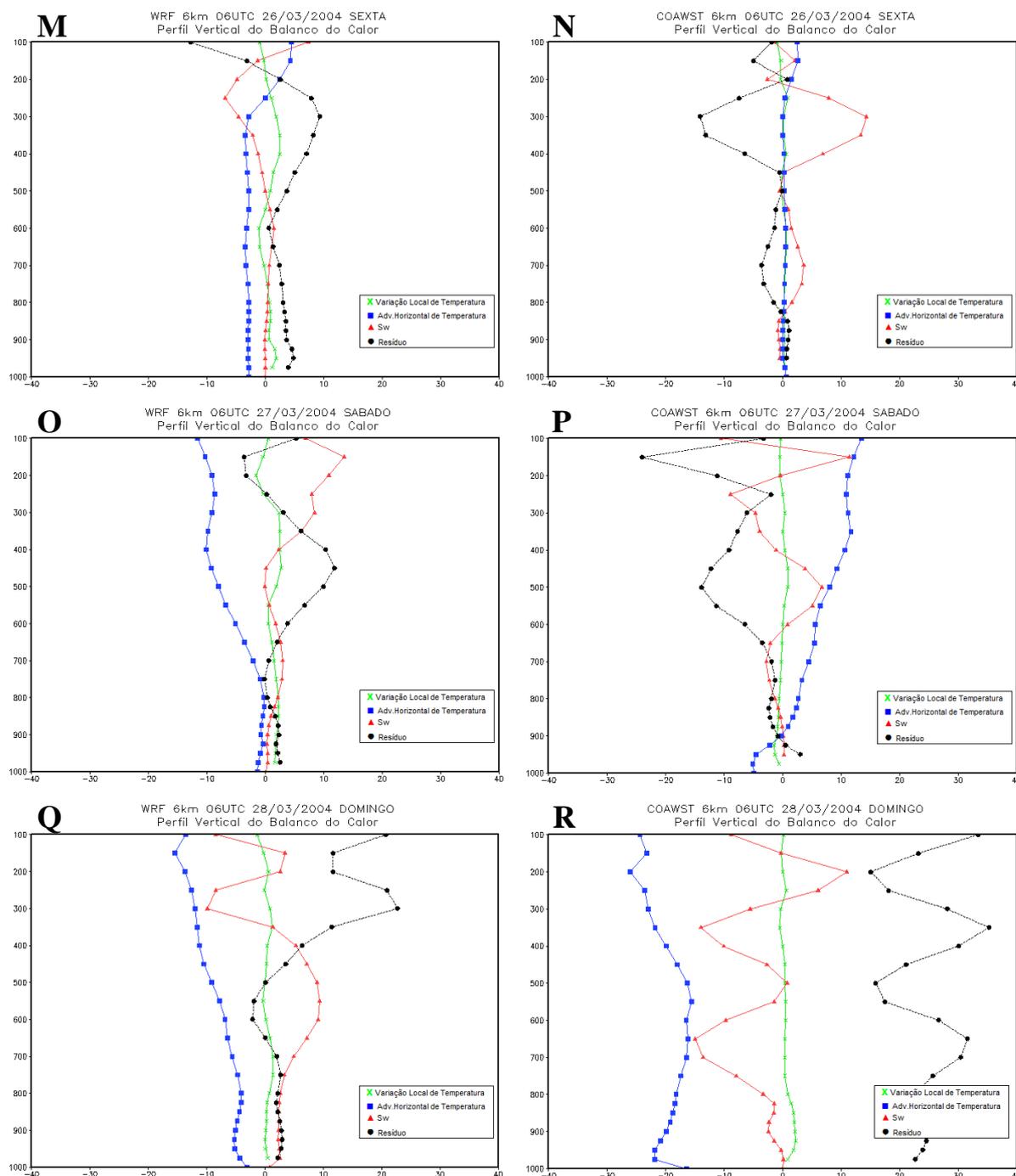


Figura 28 – Continuação.

As figuras a seguir mostram a evolução dos perfis verticais médios dos resíduos calculados a partir da equação do balanço da termodinâmica. Na simulação utilizando o modelo atmosférico WRF, identificou-se uma tendência do resíduo apresentar valores tipicamente negativos entre os dias 20 a 25 de Março de 2004, até 400 hPa; acima deste nível, observa-se valores positivos porém com estrutura complexa. Por outro lado, entre os dias 26 a 28 de Março de 2004, após a fase de mudança de trajetória e o início do deslocamento para oeste, o resíduo passa a apresentar um perfil predominantemente positivo em toda a coluna.

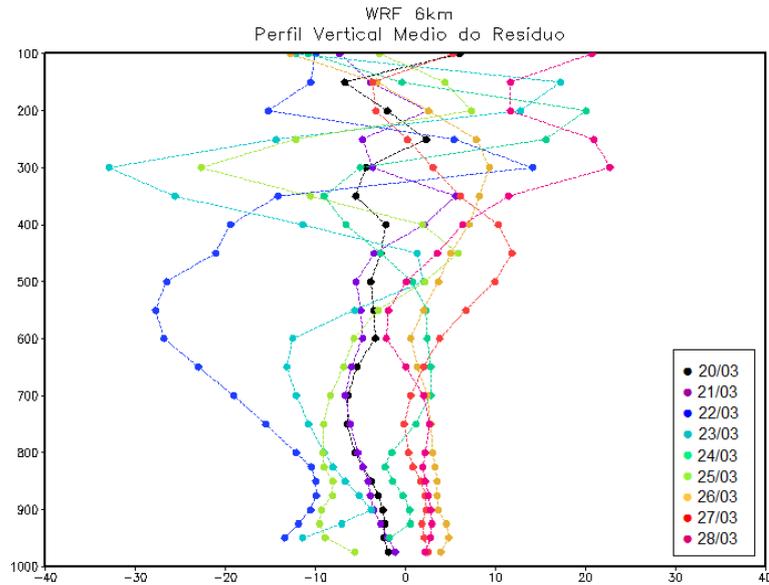


Figura 29 – Evolução diária do perfil vertical médio para o termo do resíduo na simulação com o WRF.

Na simulação com o COAWST, por outro lado, não há um padrão definido e as alterações de sinal ocorrem em diversos níveis na maioria dos dias analisados. Apenas o dia 22 de Março e o dia 28 de Março de 2004 apresentaram um perfil inteiramente positivo.

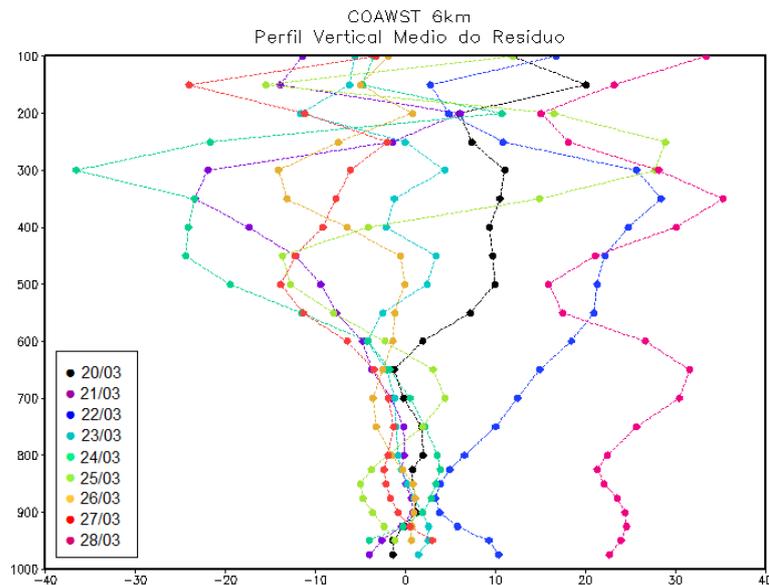


Figura 30 – Evolução diária do perfil vertical médio para o termo do resíduo na simulação com o COAWST.

De uma maneira geral, pode-se dizer que a análise do balanço de calor não elucidou os mecanismos que diferenciaram a evolução do sistema em cada uma das simulações analisadas. Esperava-se que as diferentes tendências dos núcleos térmicos ficassem bastante evidentes ao comparar as simulações, fato este que não foi verificado.

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho buscou analisar a relevância do acoplamento entre a atmosfera e o oceano na representação do ciclone Catarina. Dois conjuntos de resultados de simulações numéricas foram empregados para o presente estudo: o primeiro obtido somente com o modelo atmosférico WRF e o segundo com o modelo acoplado COAWST (WRF acoplado com o modelo de circulação oceânica ROMS). As etapas desenvolvidas para as análises destas simulações consistiram na elaboração de um algoritmo para rastreamento da trajetória do ciclone, a utilização do algoritmo do *Cyclone Phase Space* (HART, 2003), a realização de uma análise lagrangeana para avaliar os fluxos com a superfície oceânica, e finalmente o cálculo dos termos do balanço de calor através da equação da termodinâmica.

É preciso destacar inicialmente dois aspectos fundamentais: (i) a representação da evolução de um sistema ciclônico bastante atípico foi alcançada nas duas simulações, e (ii) a simulação acoplada apresentou um viés frio em relação ao campo de TSM.

Os diagramas de fase são uma rápida e funcional ferramenta, capaz de compactar as informações; porém, é necessário compreender como a estrutura do sistema é representada em cada quadrante destes diagramas. Conforme mencionado no capítulo 4, o diagrama de fases foi apresentado em dois gráficos: parâmetros B e  $-V_T^L$  e parâmetros  $-V_T^L$  e  $-V_T^U$ .

Para os parâmetros B e  $-V_T^L$  foi verificado que no instante inicial da simulação com o WRF, o CPS mostra um sistema com fraca assimetria térmica, com núcleo quente moderado em baixos e altos níveis. Durante a evolução do Catarina ocorre um pequeno aumento da assimetria térmica na região, o que indica uma inclinação com altura das superfícies de altura geopotencial. Enquanto o sistema seguia seu deslocamento para leste, ocorreu perda da assimetria e o núcleo quente em baixos níveis também perdeu intensidade atingindo uma condição praticamente neutra. Após a mudança de trajetória, o núcleo quente em altos níveis também foi se enfraquecendo, enquanto nos baixos níveis o sistema ficou próximo à neutralidade. Na sua fase final, o sistema se tornou simétrico em relação ao campo de altura e manteve-se assim até o período em que se dissipou. No que se refere aos parâmetros  $-V_T^L$  e  $-V_T^U$ , o Catarina manteve um raso núcleo quente em baixos níveis, até o momento onde realizou transição de fase para um ciclone extratropical, a partir deste instante o sistema apresenta núcleo frio. Durante sua trajetória para oeste, o sistema encontra-se em uma região que propicia a transição tropical.

Ao analisar os parâmetros  $B$  e  $-V_T^L$  na simulação acoplada, identifica-se um aumento da assimetria térmica do ciclone, a qual ocorre em resposta ao aumento do gradiente térmico pela advecção de ar com diferentes características na região da formação do sistema frontal, tendo também um núcleo frio em baixos níveis. Assim, o ciclone surgiu como um típico ciclone extratropical associado a uma frente. Antes da mudança de trajetória, o sistema passou por duas fases: primeiro ocorreu uma intensificação do núcleo quente, e posteriormente um enfraquecimento. Já os parâmetros  $-V_T^L$  e  $-V_T^U$  mostram que o Catarina começou como um ciclone extratropical, com núcleo frio e forte assimetria térmica na simulação acoplada. Ao longo do seu desenvolvimento ocorre um rápido aprofundamento e o ciclone ganhou um núcleo quente raso que se aprofundou durante a trajetória para leste. Mesmo após se deslocar em direção à costa brasileira, o Catarina continuou se desenvolvendo configurando um núcleo profundamente quente. Nos últimos dias de sua vida, os parâmetros indicam uma transição tropical com evolução característica de furacão.

A análise lagrangeana de fontes de calor latente indica diversos momentos com diferenças pontuais nos padrões dos fluxos nas duas simulações em análise. No instante inicial, o WRF indica fluxos mais intensos que o COAWST, porém o modelo acoplado representa uma maior quantidade de fluxo na região próxima à costa. Ao longo do desenvolvimento do Catarina, o padrão dos fluxos no sistema e em suas regiões adjacentes é bastante próximo, sendo que em seu centro os fluxos são da ordem de  $30 \text{ W/m}^2$ , chegando a  $250 \text{ W/m}^2$  nas regiões dentro da caixa de análise. Nas duas simulações, no instante em que há mudança na direção da trajetória, verifica-se ausência de fluxos no centro do ciclone. Nos dias seguintes, onde ocorreu o deslocamento do ciclone para costa do litoral da Região Sul, e apesar de algumas diferenças pontuais, as duas simulações indicam fluxos de calor latente, com valores mínimos na ordem de  $20 \text{ W/m}^2$  na região central do Catarina, e ao seu redor os valores máximos encontrados ficam próximos de  $200 \text{ W/m}^2$ , com consideráveis variações espaciais. Na madrugada em que o sistema atinge o litoral sul, o WRF mostra fluxos intensos que variam de  $100$  a  $250 \text{ W/m}^2$ , com valores mais baixos apenas no seu centro, atingindo valor mínimo de  $30 \text{ W/m}^2$ . Por outro lado, a simulação com o COAWST, caracterizada por menores valores de TSM, indica valores entre  $20$  e  $150 \text{ W/m}^2$  e, em seu centro, já sobre o continente, há um fluxo de calor latente da ordem de  $60 \text{ W/m}^2$ .

Na análise lagrangeana dos fluxos de calor sensível, também se verifica que os valores máximos encontrados foram bastante próximos em determinados instantes, apesar dos padrões serem diferentes. Cabe destacar que, no dia 22, o WRF representa sua região em torno ao centro

de baixa com valores elevados entre 50 e 130 W/m<sup>2</sup>, enquanto o COAWST indica um padrão que varia de -10 a 60 W/m<sup>2</sup>. No dia 27, véspera do ciclone avançar sobre o continente, os fluxos diminuem consideravelmente nas duas simulações, ficando próximos a 10 W/m<sup>2</sup> em seu centro e regiões adjacentes. Finalmente, no dia 28, é observada uma mudança nas distribuições de fluxo de calor sensível. O WRF mostra fluxos entre 10 e 50 W/m<sup>2</sup>, enquanto o COWST indica valores mais baixos entre -30 e 30W/m<sup>2</sup>. De maneira semelhante àquela do fluxo de calor latente, no caso do calor sensível estes valores mais baixos também ocorrem em função dos baixos valores de TSM desta simulação.

Na análise do balanço de calor, o perfil do termo de variação local de temperatura deveria indicar as principais mudanças na evolução temporal do sistema; no entanto, suas variações foram consideravelmente pequenas em cada simulação, não evidenciando as alterações experimentadas pelo Catarina ao longo de seu ciclo de vida. Os perfis de cada termo do balanço de calor diferiram categoricamente entre as simulações, possuindo pouca correspondência entre as mesmas. Algumas possíveis explicações para este indesejado comportamento dos termos do balanço de calor podem ser apresentadas, como à adoção de uma caixa de dimensões constantes com 2° de lado em latitude e longitude, para a qual foi obtida uma média dos perfis verticais de cada termo. Esta dimensão pode não ser adequada em todos os instantes para representar o sistema. Além disso, o cálculo da variação temporal considerou apenas os instantes adjacentes ao horário analisado, fato que pode ter mascarado a evolução temporal do sistema por não considerar todos os instantes simulados.

Apesar das limitações, a presente análise sugere que a simulação COAWST consegue representar um maior aprofundamento da pressão em relação ao modelo atmosférico. Outro aspecto relevante é a diferença entre o comportamento que a evolução temporal do centro de baixa pressão que apesar da trajetória não ter sido fielmente representadas, o modelo COAWST conseguiu estimar melhor a zona de impacto do Catarina. Dessa forma conclui-se que é relevante utilizar o acoplamento oceano-atmosfera em casos de ciclones intensos por conta das melhorias apresentadas ao comparado somente com o modelo atmosférico.

## 6. LIMITAÇÕES E SUGESTÕES

De acordo com a expectativa inicial do presente estudo, uma simulação acoplada poderia representar um diferencial para aprimorar o entendimento sobre a evolução do Ciclone Catarina. Um grande esforço foi investido na análise de simulações realizadas pelo Grupo de Modelagem Oceânica do INPE, do qual participa o orientador desta pesquisa. Pode-se dizer que as análises conduzidas foram capazes de identificar as principais diferenças entre as simulações. De certa forma, os detalhes de cada simulação foram capturados; no entanto, ainda fica difícil afirmar convictamente que estas simulações representaram adequadamente o fenômeno em questão.

Como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se:

- realizar experimentos numéricos de sensibilidade para verificar se outras parametrizações atmosféricas podem melhor representar o Catarina, principalmente ao que diz respeito à sua intensidade e trajetória;
- realizar outras simulações com o ROMS isoladamente de modo a controlar o excessivo resfriamento da temperatura da superfície do mar, aspecto decisivo para a evolução dos campos na simulação acoplada; e
- testar outras informações para serem utilizadas como condições iniciais e de contorno, tanto para a atmosfera quanto para o oceano.

## BIBLIOGRAFIA

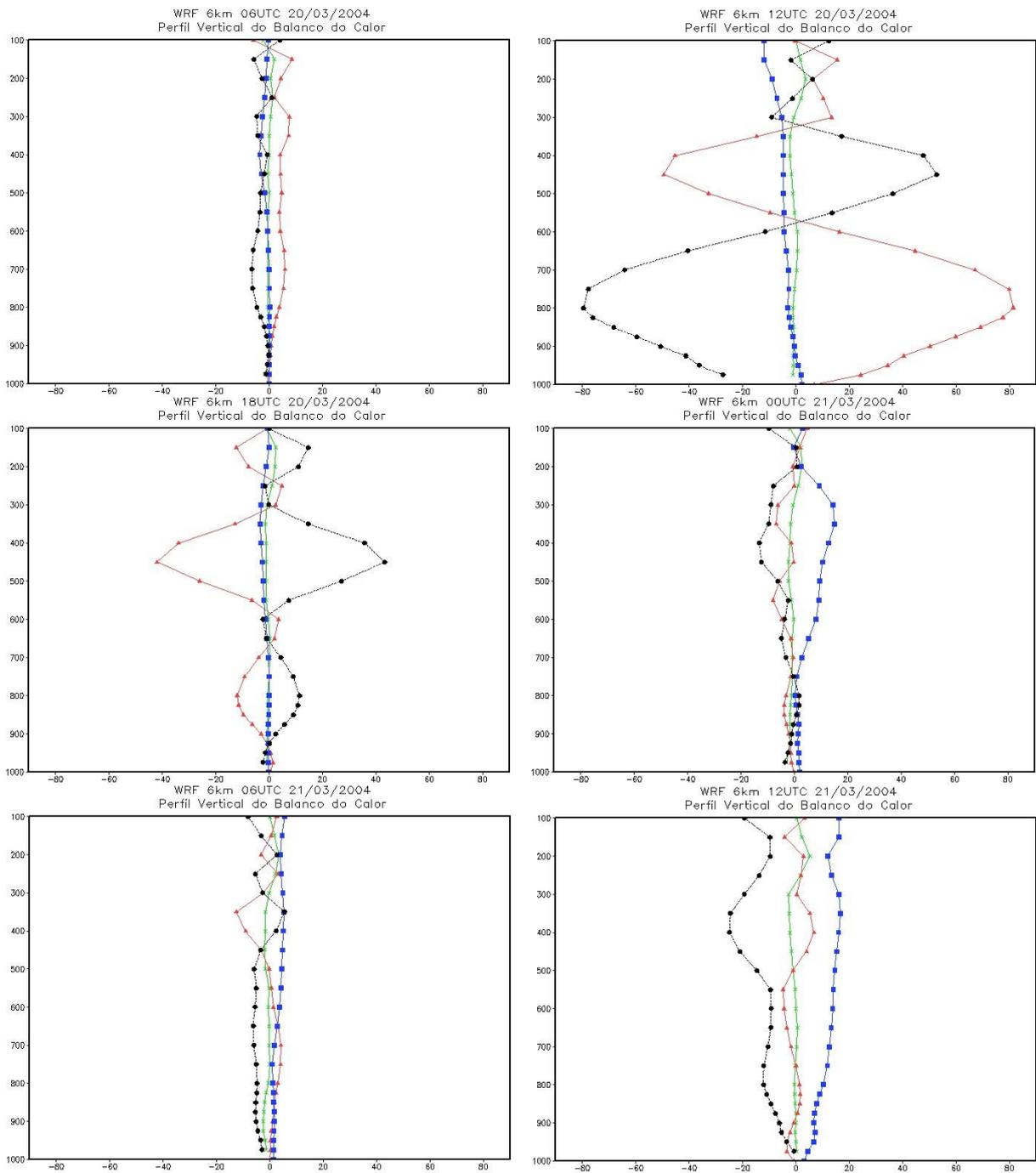
- Bjerknes, J.: On the structure of moving cyclones. *Geophys. Publ.*, 1, 2: 1-8, 1919.
- Bjerknes, J., Solberg, H.: Life Cycle of Cyclones and the Polar Front Theory of Atmospheric Circulation. *Geof. Publ.*, 3 (1), 3-18, 1922.
- Beven, J. L.: A study of three ‘hybrid’ storms, paper presented at 22nd Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Am. Meteorol. Soc., Fort Collins, Colo., 645 – 646, 1997.
- Bonatti, J. P., Rao, V. B., Silva Dias, P. L.: Estudo Observacional da Propagação para Leste do Fenômeno Catarina e sua Simulação com Modelo Global de Alta Resolução. XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Fortaleza - CE, 2004.
- Bonatti, J. P., Rao, V. B., Silva Dias, P. L.: On the west ward propagation of Catarina storm, in: International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography (ICSHMO), 8, 1659–1675, INPE, Foz do Iguaçu, Brazil, 2006.
- Carton, J., Giese, B. S.: A Reanalysis of Ocean Climate Using Simple Ocean Data Assimilation (SODA). *Monthly Weather Review*, 136, 2999-3017, 2008.

- Charney, J. G.: The Dynamics of Long Waves in a Baroclinic Westerly Current. *J. Meteor.*, 4 (5), 135-162, 1947.
- Charney, J. G., Eliassen, A.: On the Growth of the Hurricane Depression. *J. Atmos. Sci.*, 21, 68–75, 1964.
- Correa, C. L.R.: Condições Atmosféricas Associadas ao Furacão Catarina e a Outros Dois Casos de Estudo. Dissertação (Mestrado em Meteorologia. Universidade Federal de Pelotas), 160pp, 2014.
- Davis, C. A. E., Bosart, L. F.: Baroclinically Induced Tropical Cyclogenesis. *Monthly Weather Review*, v. 131, p. 2730-2747, 2003.
- Dutra, M. M.: C Ciclones subtropicais sobre o Atlântico Sul: análise da estrutura dinâmica de eventos. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), IAG/USP, 144 pp 2012.
- Eady, E. T.: Long waves and cyclone waves. *Tellus*, 1, 33–52, 1949.
- Emanuel, K.: Na air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part I: Steady state maintenance. *J. Atmos. Sci.*, 43, p. 585-604, 1986.
- Emanuel, K. A.: Tropical cyclones. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 31(1), 75-104, 2003.
- Gan, M. A.: Ciclone Catarina: Análise Sinótica: III Simposio Internacional de Climatologia – Canela, 2009.
- Gozzo, L. F.: Ciclones Subtropicais Sobre o Sudoeste do Atlântico Sul: Climatologia e Fontes De Umidade. Tese (Doutorado em Meteorologia), IAG/USP, 129 pp 2014.
- Gray, W. M.: Global view of the origin of tropical disturbances and storms. *Monthly Weather Review*, v.96, n. 10, p. 669-700, 1968.
- Guishard, M. P.: Atlantic subtropical storms: Climatology and characteristics. Tese (Doutorado em Meteorologia), Dept. of Meteorology, The Pennsylvania State University, University Park, PA, 158 pp. 2006.
- Haidvogel, D.B., Arango, H.G., Hedstrom, K., Beckmann, A., Malanotte-Rizzoli, P, Shchepetkin, A. F.: Model Evaluation Experiments in the North Atlantic Basin: Simulations in Nonlinear Terrain-Following Coordinates. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 32, 239-281, 2000.
- Haidvogel, D.B., Arango, H., Budgell, W.P., Cornuelle, B.D., Curchitser, E., Di Lorenzo, E., Fennel, K., Geyer, W.R., Hermann, A.J., Lanerolle L., Levin, J., McWilliams, C., Miller, A. J., Moore, A. M., Powell, T. M., Shchepetkin, A.F., Sherwood, C.R., Signell, R. P., Warner J.C., Wilkin, J.: Ocean forecasting in terrain-following coordinates: Formulation and skill assessment of the Regional Ocean Modeling System. *Journal of Computational Physics* 227(7):3595–3624, 2008.
- Hart, R. E.: A cyclone phase space derived from thermal wind and thermal asymmetry. *Monthly Weather Review*, v. 131, 585–616, 2003.
- Kubota, P. Y., Tomita, S. S., Herdies, D. L., Bonatti, J. P.: Avaliação do MCGA/CPTEC no estudo sobre a previsão de um ciclone extratropical no Atlântico Sul próximo da costa brasileira. XIV Congresso Brasileiro De Meteorologia - Florianópolis, SC, 2006.
- Mathias, R, S, B.: Análise e Classificação de Ciclones Utilizando Diagramas de Fase: Conceitos E Aplicação Em Previsão De Tempo Operacional. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 117pp, 2014.

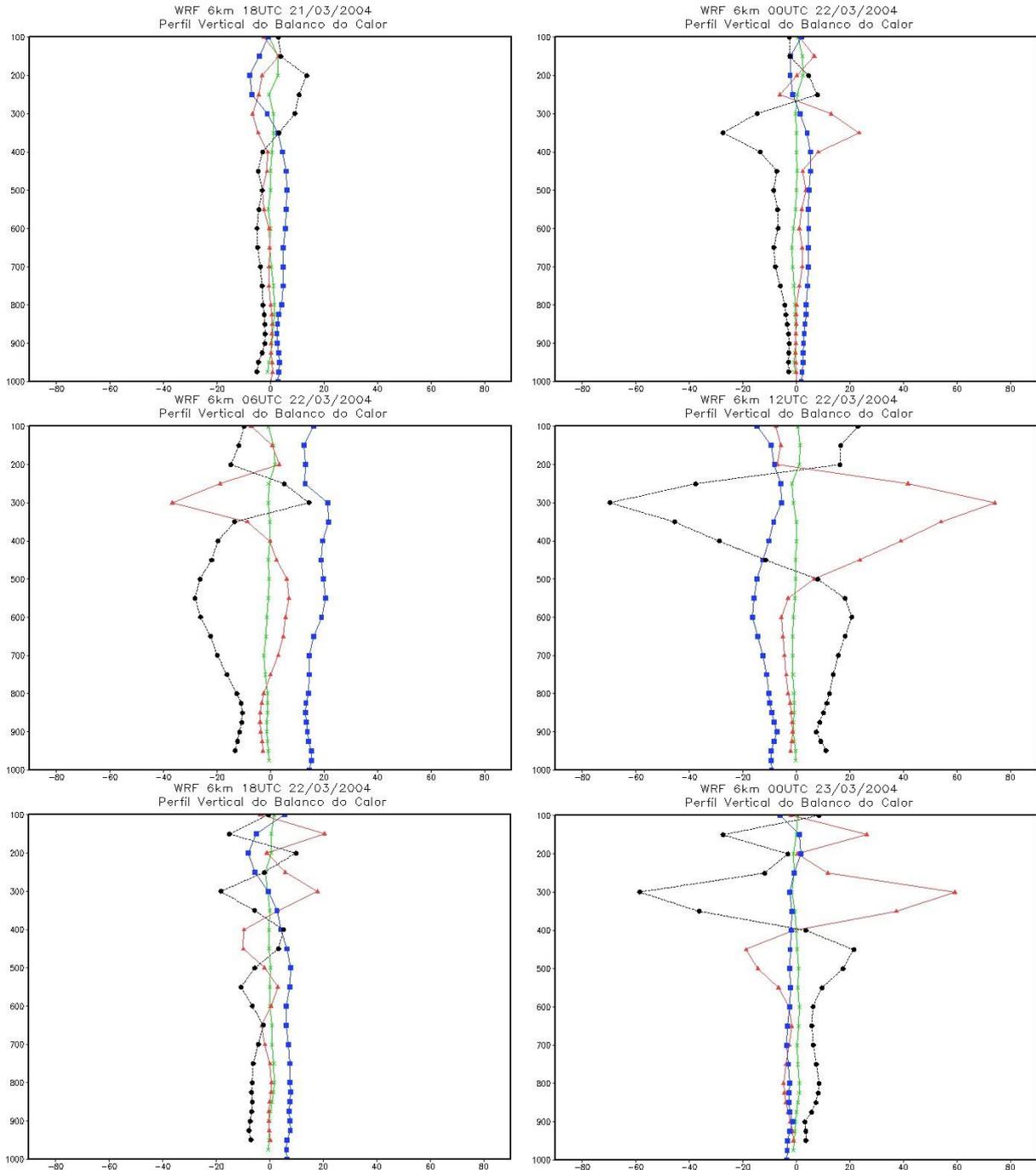
- McBride, J. L.; ZEHR, R.: Observational Analysis of Tropical Cyclone Formation. Part II: Comparison of Non-Developing Versus Developing Systems. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 38, n.6, p. 1132-1151, 1981.
- McTaggart-Cowan, R., Bosart, L., Davis, C. A., Atallah, E. H., Gyakum, J. R., Emanuel, K. A.: Analysis of Hurricane Catarina (2004), *Monthly Weather Review*, 134, p. 3029-3053, 2006.
- Menezes, W., Silva Dias, P. L.: Um estudo do impacto das opções físicas do modelo RAMS na simulação numérica do ciclone Catarina. XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Fortaleza - CE, 2004.
- Munchow, G.B., Absy, J. M., Alves, R. C. M., Pezzi, L. P: Preliminary Results of Coast Coupling System for Rio Grande do Sul State/Brazil and Central Region of South Atlantic Ocean 2012 ROMS User Workshop, Rio de Janeiro - RJ, 2012.
- Pezza, A. B., Simmonds, I.: The first South Atlantic hurricane: Unprecedented blocking, low shear and climate change, *Geophys. Res. Lett.*, 32, 2005.
- Pezza, A. B., Simmonds, I.: Large –scale factors in tropical and extratropical cyclone transition and extreme weather events. *Trends and Directions in Climate Research*, v.1146, p.189-211, 2008.
- Shchepetkin, A.F., McWilliams, J.C.: The Regional Ocean Modeling System: a split-explicit, free surface, topography following coordinates ocean model. *Ocean Modelling*, 9, 347–404, 2005.
- Radu, R., Toumi R., Phau J.: Influence of atmospheric and sea surface temperature on the size of hurricane Catarina, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol: 140, Pages: 1778-1784, ISSN: 0035-9009, 2014.
- Reboita, M. S.: Ciclones Extratropicais sobre o Atlântico Sul: Simulação Climática e Experimentos de Sensibilidade. Tese (Doutorado em Meteorologia) IAG/USP, 294pp, 2008;
- Sanford, T. B., Black, P. G., Haustern, J. R., Feeney, J. W., Forristall, G. Z., Price, J. F.: Ocean Response to a Hurricane. Part I: Observation. *Journal of Physical Oceanography*, v. 17, n. 11, p. 2065-2083, 1987.
- Silva, M.C.L.: Simulações Numéricas do Ciclone Catarina: Impacto dos Efeitos Subgrade, Resolução e Assimilação de Dados. Tese (Doutorado em Meteorologia), IAG/USP, 120pp, 2014.
- Silva Dias, P. L., Silva Dias, M.A.F., Seluchi, M., Diniz, F.A.: O Ciclone Catarina: Análise Preliminar da Estrutura, Dinâmica e Previsibilidade. XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Fortaleza - CE, 2004.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X., Wang, W. E Powers, J. G.: A description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Note, Boulder – Colorado – USA. 113p, 2008.
- Sutcliffe, R.C., Forsdyke, A. G.: The theory and use of upper air thickness patterns in forecasting, *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, v. 76, p. 189-217, 1950.
- Veiga, J. A. P., Pezza, A. B., Simmonds, I., Silva Dias, P.L.: An Analysis of the Environment Energetics Associated with the transition of the First South Atlantic Hurricane. *Geophysical Research Letters*, v. 35 L15806, 2008.

- Vianna, J. A. P., Menezes, V.V., Pezza, A. B., Simmonds, I.: Interaction between Hurricane Catarina (2004) and Warm Core Rings in the South Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, v.115, 2010.
- Warner, J.C., Armstrong, B., He R., Zambon, J.B.: Development of a Coupled Ocean–Atmosphere–Wave–Sediment Transport (COAWST). Modeling System. *Ocean Modelling*, 35, 230–244, 2010.

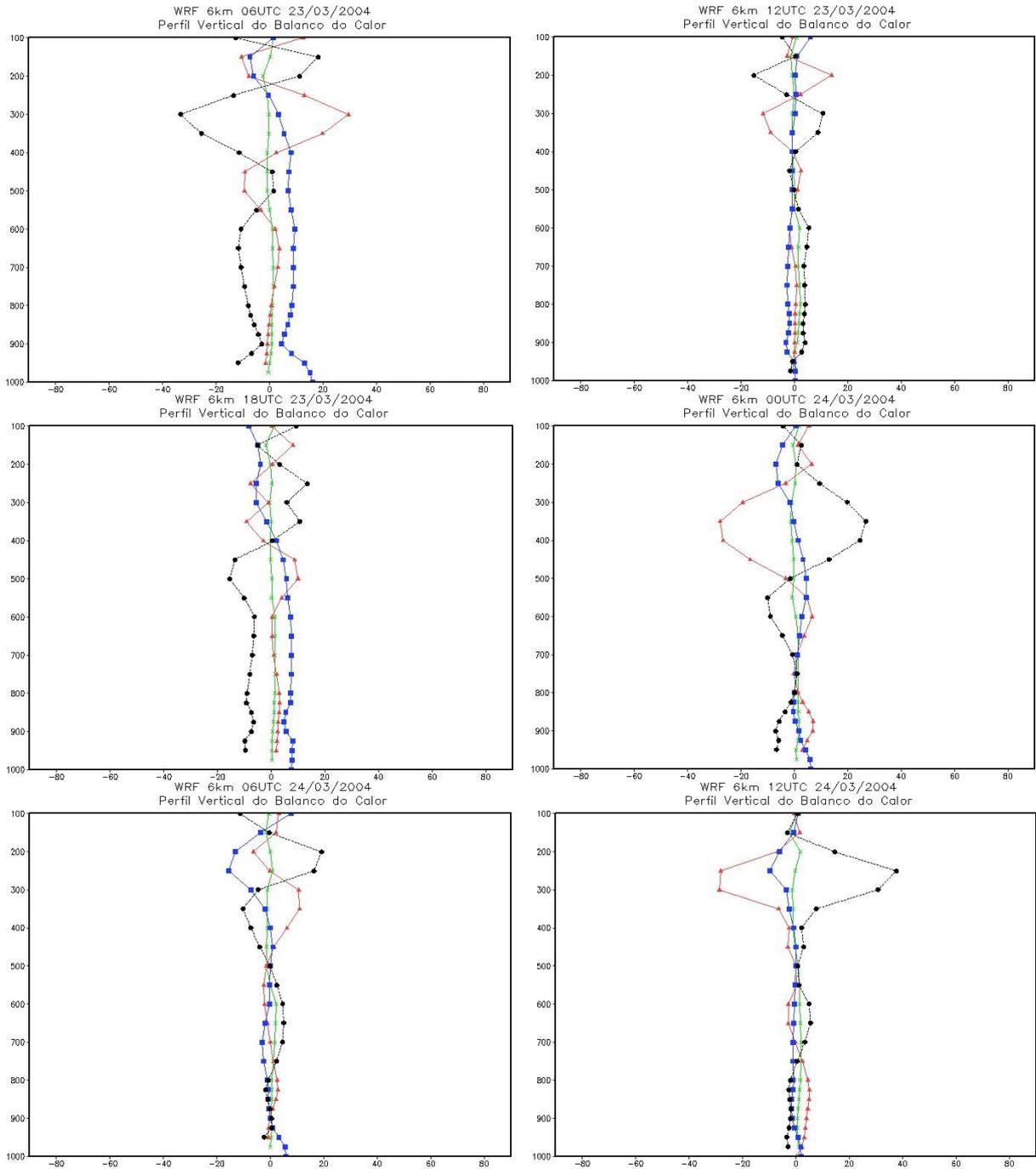
## ANEXO A



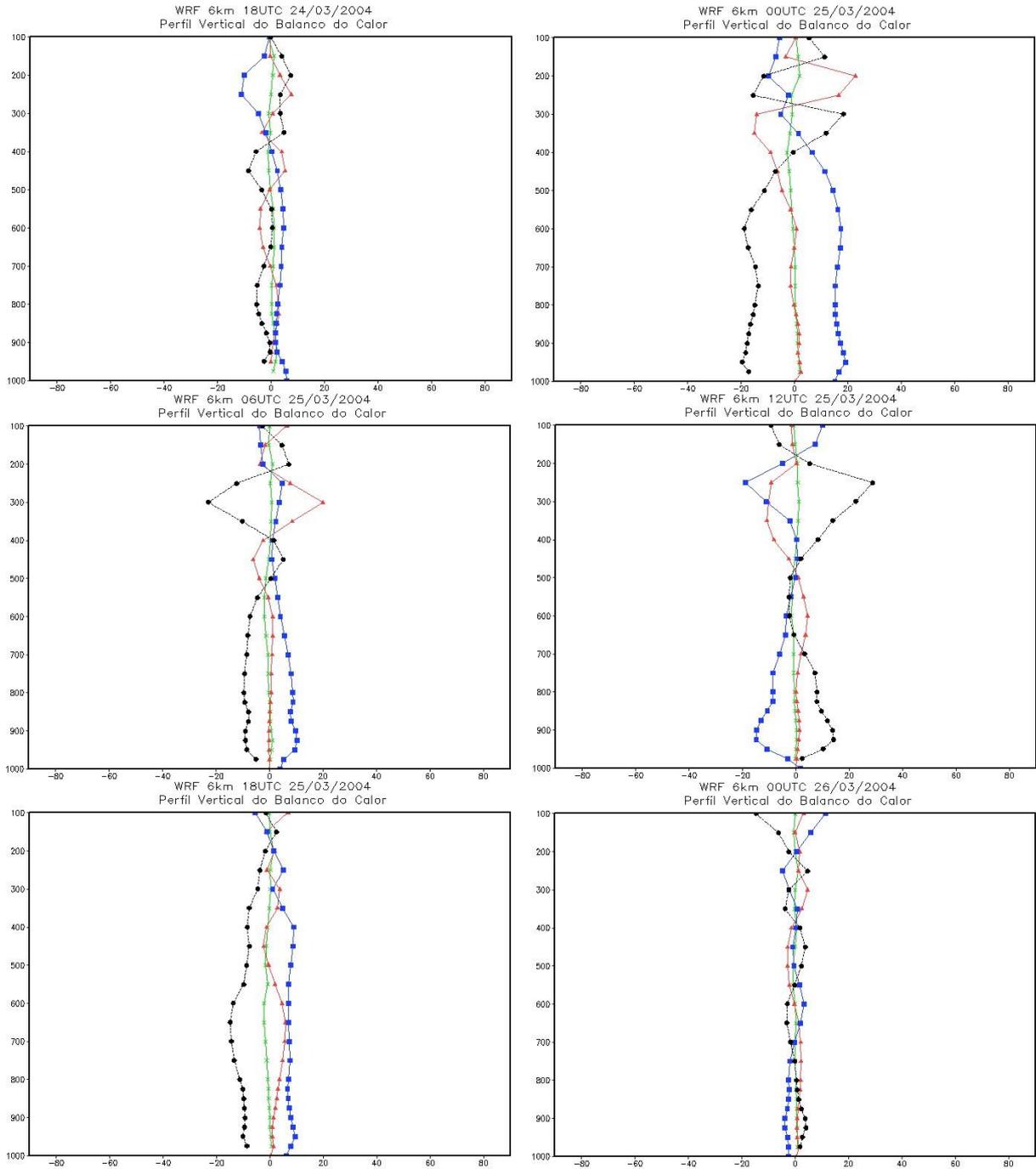
Perfil vertical médio na área em torno do ciclone em superfície para todos os tempos de simulação com o WRF: variação local (linha verde) advecção horizontal de temperatura em K/dia (linha azul),  $S_w$ : termo relacionado ao movimento vertical em K/dia (linha vermelha) e resíduo da equação da termodinâmica (linha preta).



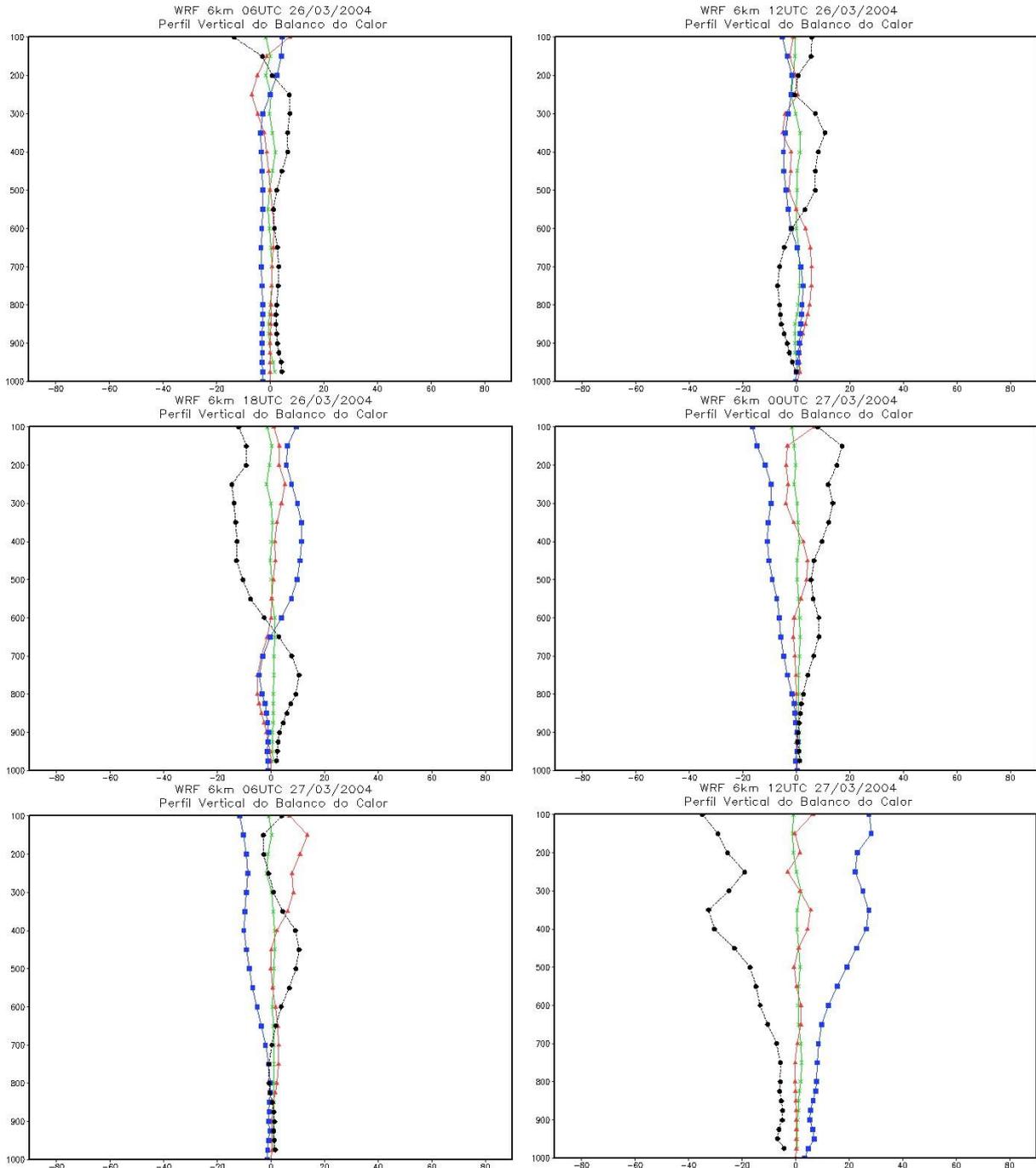
Perfil vertical médio na área em torno do ciclone em superfície para todos os tempos de simulação com o WRF: variação local (linha verde) advecção horizontal de temperatura em K/dia (linha azul), Sw: termo relacionado ao movimento vertical em K/dia (linha vermelha) e resíduo da equação da termodinâmica (linha preta).



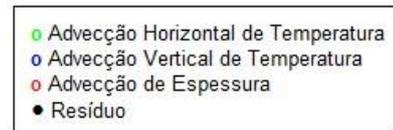
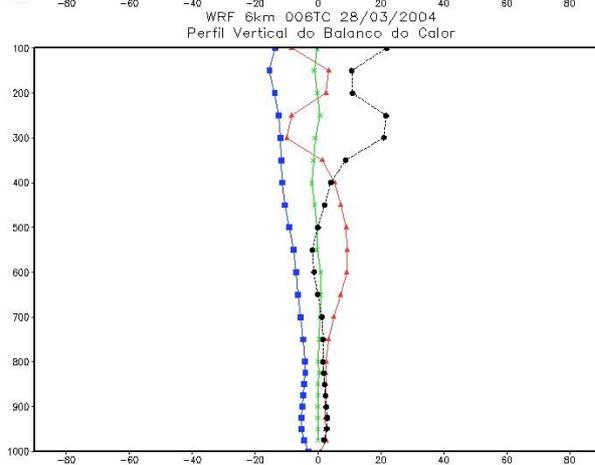
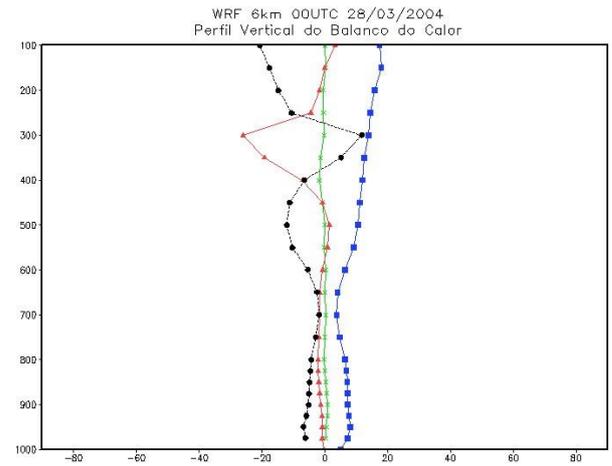
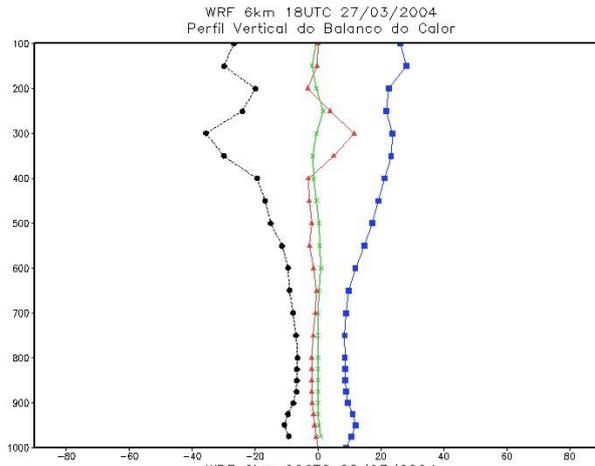
Perfil vertical médio na área em torno do ciclone em superfície para todos os tempos de simulação com o WRF: variação local (linha verde) advecção horizontal de temperatura em K/dia (linha azul), Sw: termo relacionado ao movimento vertical em K/dia (linha vermelha) e resíduo da equação da termodinâmica (linha preta).



Perfil vertical médio na área em torno do ciclone em superfície para todos os tempos de simulação com o WRF: variação local (linha verde) advecção horizontal de temperatura em K/dia (linha azul), Sw: termo relacionado ao movimento vertical em K/dia (linha vermelha) e resíduo da equação da termodinâmica (linha preta).

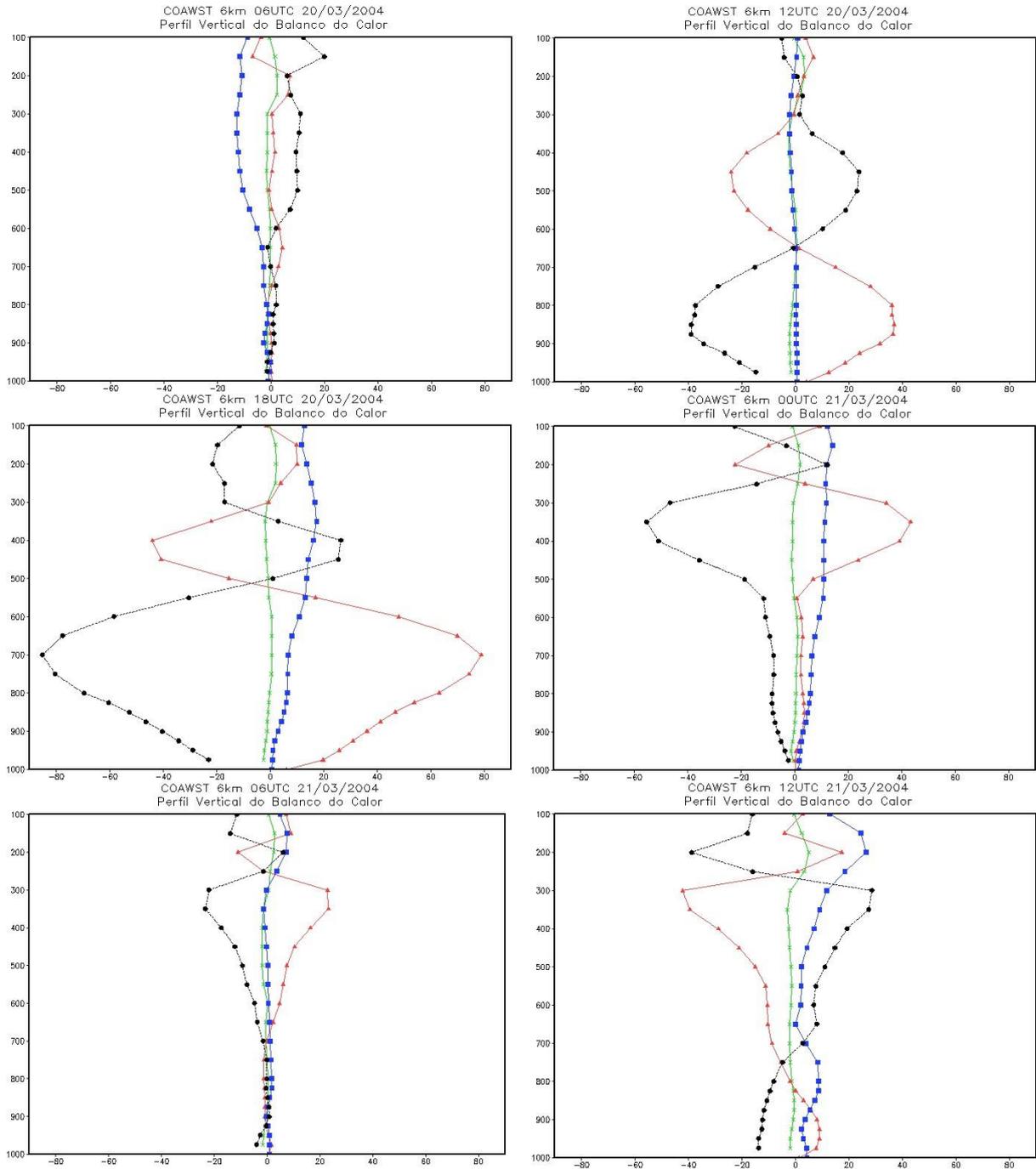


Perfil vertical médio na área em torno do ciclone em superfície para todos os tempos de simulação com o WRF: variação local (linha verde) advecção horizontal de temperatura em K/dia (linha azul),  $S_w$ : termo relacionado ao movimento vertical em K/dia (linha vermelha) e resíduo da equação da termodinâmica (linha preta).

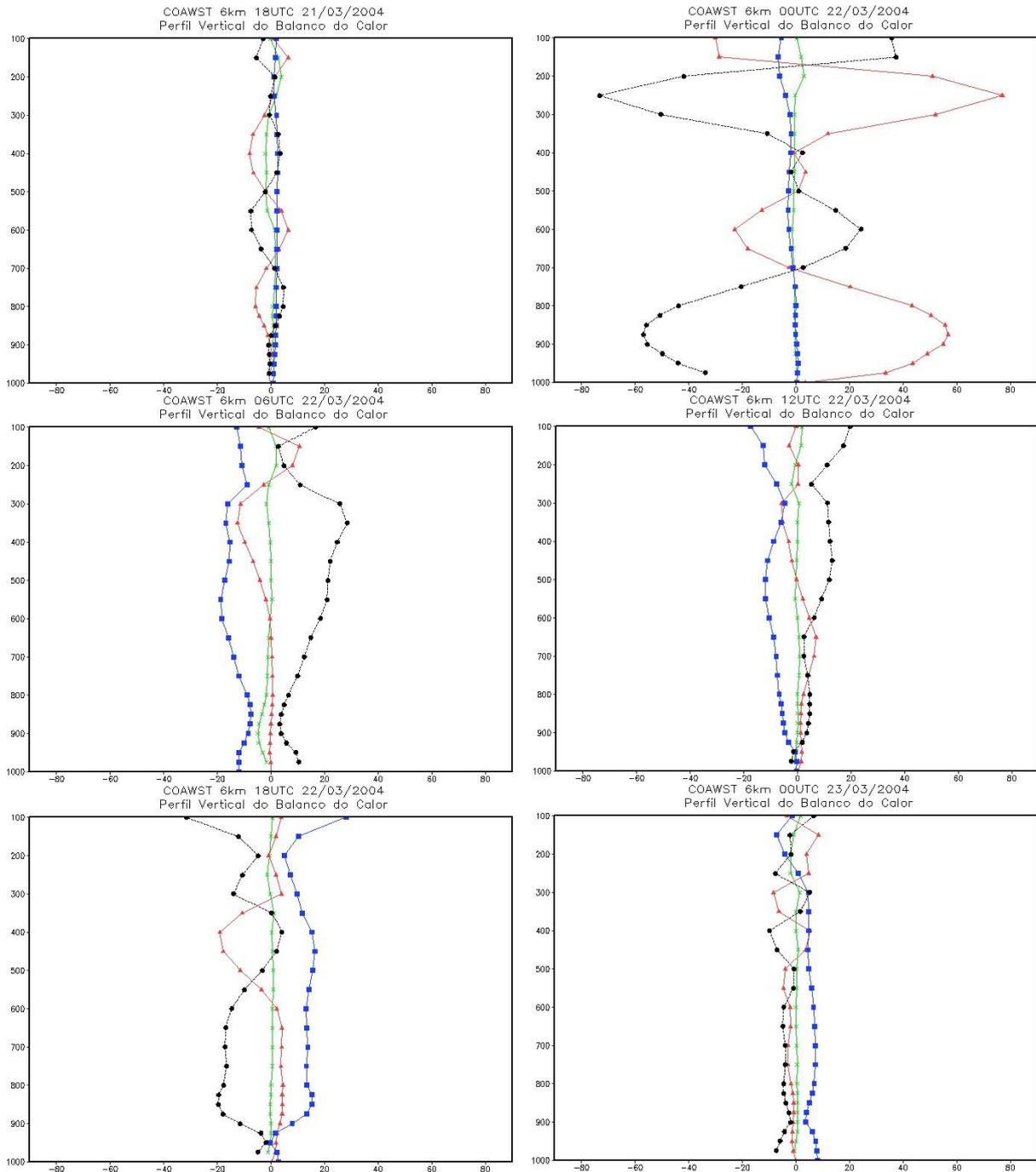


Perfil vertical médio na área em torno do ciclone em superfície para todos os tempos de simulação com o WRF: variação local (linha verde) advecção horizontal de temperatura em K/dia (linha azul), Sw: termo relacionado ao movimento vertical em K/dia (linha vermelha) e resíduo da equação da termodinâmica (linha preta).

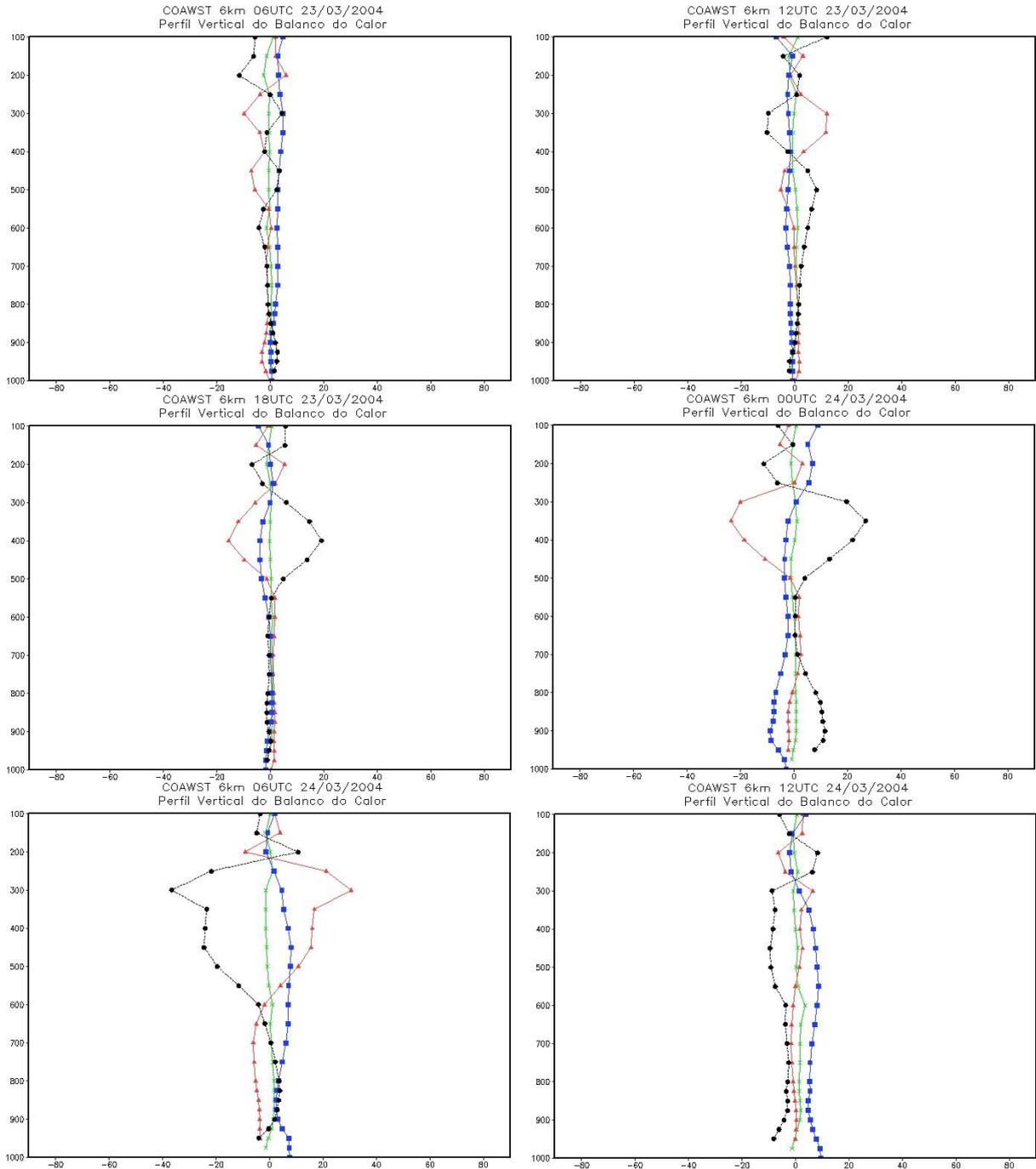
## ANEXO B



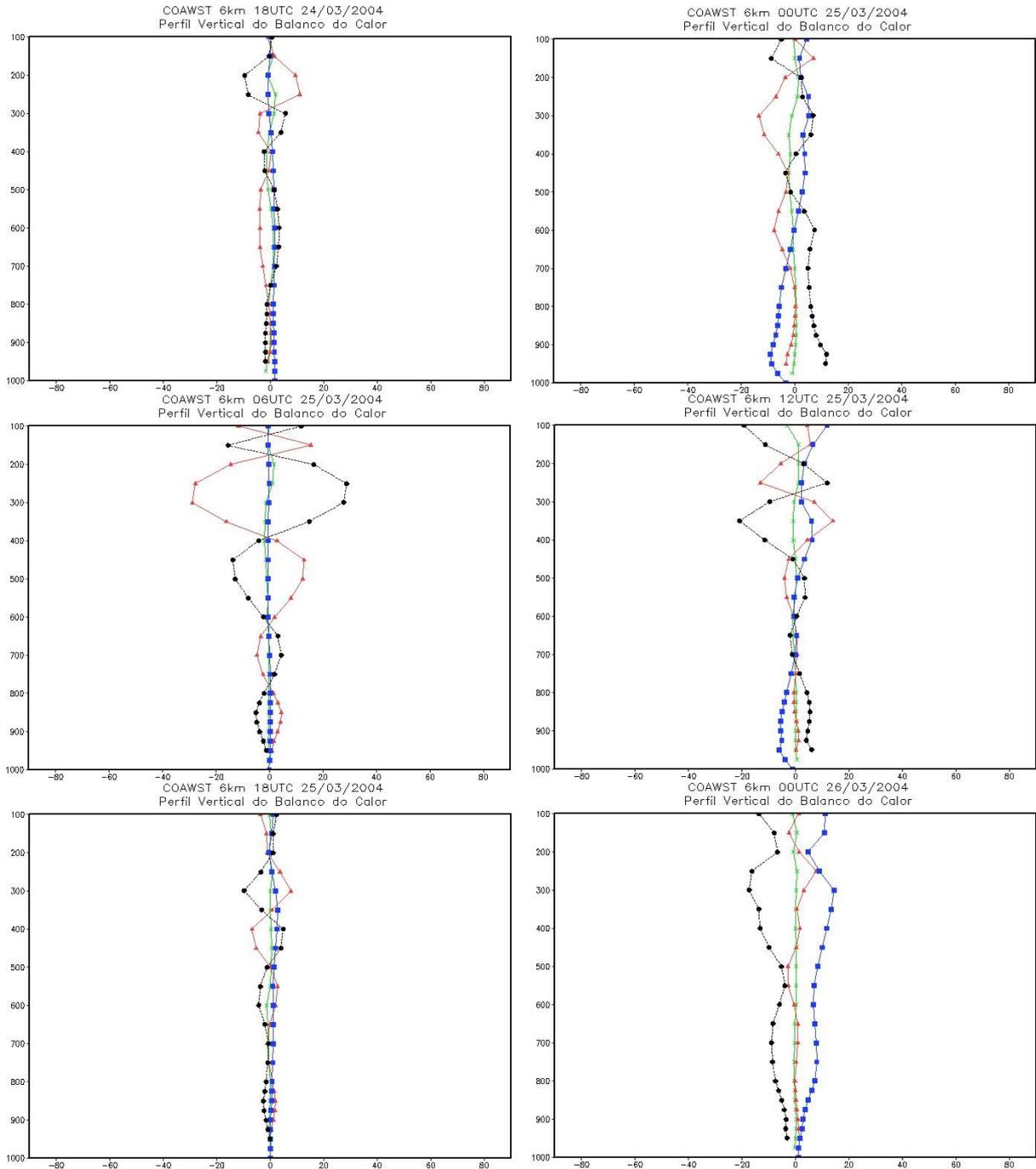
Perfil vertical médio na área em torno do ciclone em superfície para todos os tempos de simulação com o COAWST: variação local (linha verde) advecção horizontal de temperatura em K/dia (linha azul), Sw: termo relacionado ao movimento vertical em K/dia (linha vermelha) e resíduo da equação da termodinâmica (linha preta).



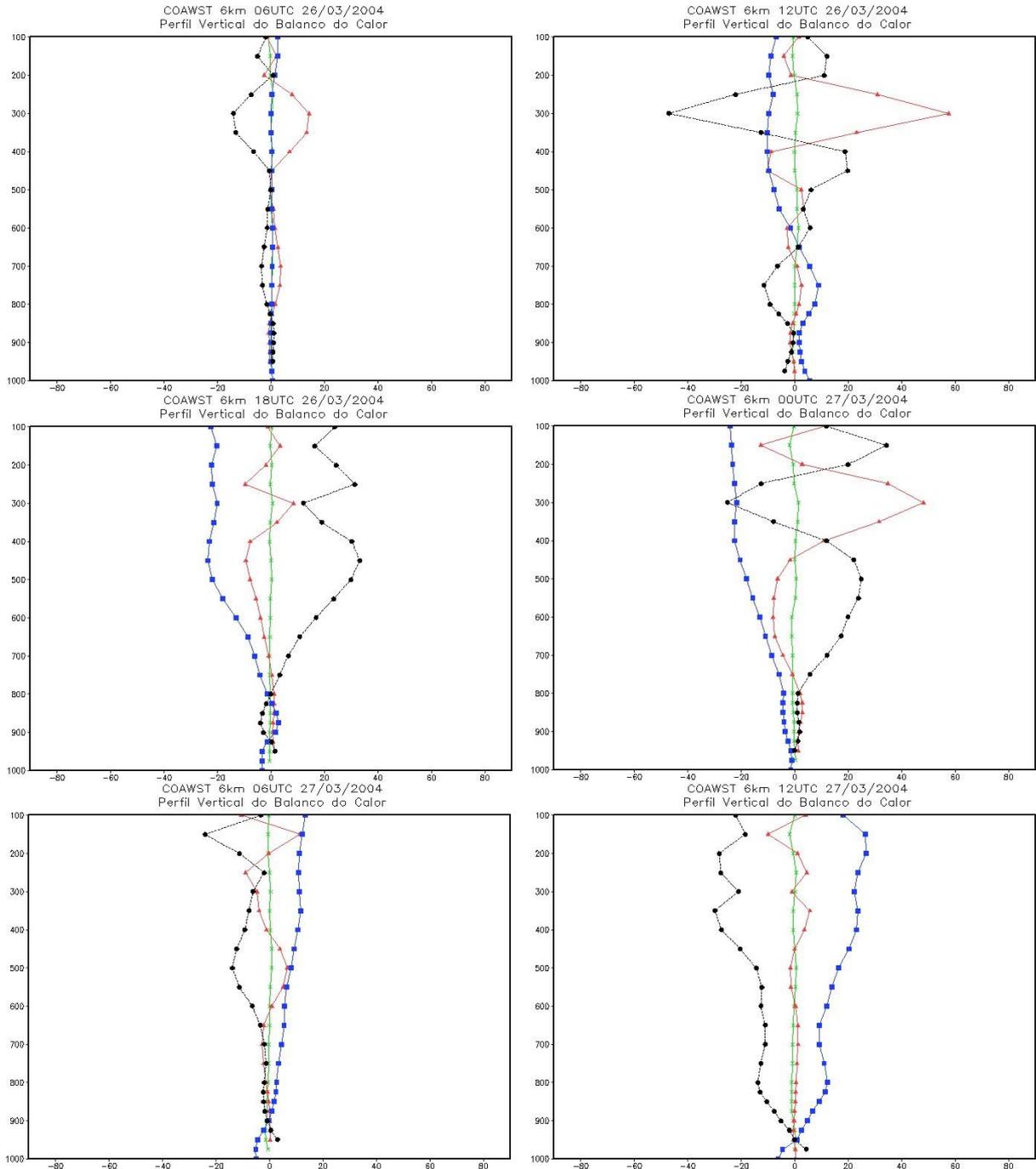
Perfil vertical médio na área em torno do ciclone em superfície para todos os tempos de simulação com o COAWST: variação local (linha verde) advecção horizontal de temperatura em K/dia (linha azul), Sw: termo relacionado ao movimento vertical em K/dia (linha vermelha) e resíduo da equação da termodinâmica (linha preta).



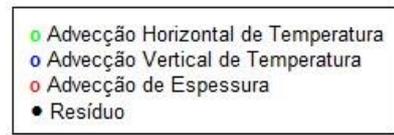
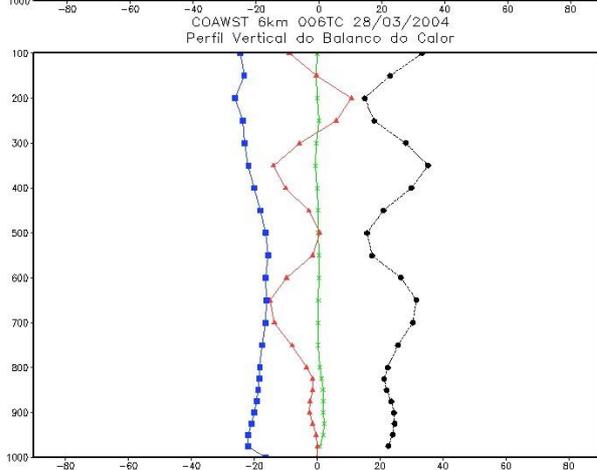
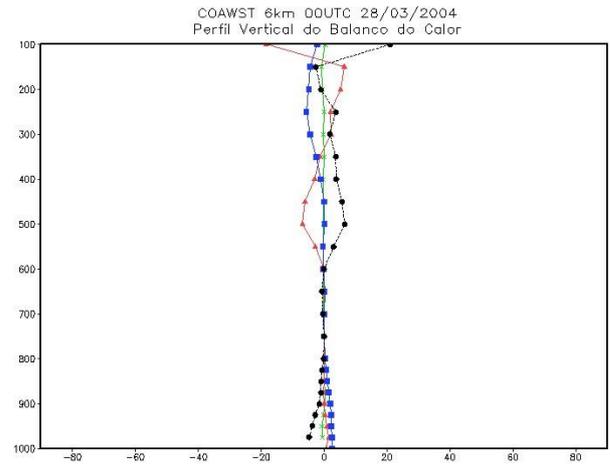
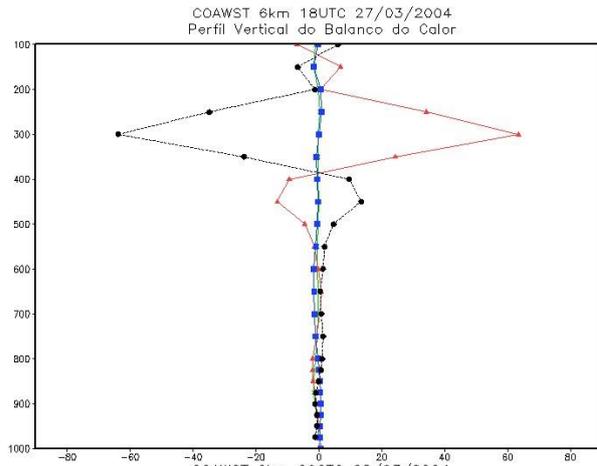
Perfil vertical médio na área em torno do ciclone em superfície para todos os tempos de simulação com o COAWST: variação local (linha verde) advecção horizontal de temperatura em K/dia (linha azul), Sw: termo relacionado ao movimento vertical em K/dia (linha vermelha) e resíduo da equação da termodinâmica (linha preta).



Perfil vertical médio na área em torno do ciclone em superfície para todos os tempos de simulação com o COAWST: variação local (linha verde) advecção horizontal de temperatura em K/dia (linha azul), Sw: termo relacionado ao movimento vertical em K/dia (linha vermelha) e resíduo da equação da termodinâmica (linha preta).



Perfil vertical médio na área em torno do ciclone em superfície para todos os tempos de simulação com o COAWST: variação local (linha verde) advecção horizontal de temperatura em K/dia (linha azul), Sw: termo relacionado ao movimento vertical em K/dia (linha vermelha) e resíduo da equação da termodinâmica (linha preta).



Perfil vertical médio na área em torno do ciclone em superfície para todos os tempos de simulação com o COAWST: variação local (linha verde) advecção horizontal de temperatura em K/dia (linha azul), Sw: termo relacionado ao movimento vertical em K/dia (linha vermelha) e resíduo da equação da termodinâmica (linha preta).