



**Universidade Federal do Rio de Janeiro
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
Instituto de Geociências
Departamento de Meteorologia**

**ESTUDO DE CASO DE TEMPESTADE SEVERA
NO RIO DE JANEIRO EM ABRIL DE 2010**

RENATA NOVAES CALADO

Orientadora: Prof^a. D^{ra}. Claudine Pereira Dereczynski

Monografia submetida ao corpo docente do Departamento de Meteorologia da UFRJ como requisito necessário à obtenção de grau de Bacharel em Meteorologia.

Rio de Janeiro, RJ

Maio, 2012

RENATA NOVAES CALADO

Monografia submetida ao corpo docente do Departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel

em Meteorologia

Aprovada por:

Prof^ª. D^{ra}. Claudine Pereira Dereczynski

Departamento de Meteorologia – IGEO – UFRJ

Prof^o. D^r. Isimar de Azevedo Santos

Departamento de Meteorologia – IGEO – UFRJ

Prof^o Alfredo Silveira da Silva

Departamento de Meteorologia – IGEO – UFRJ

Rio de Janeiro, RJ

Maio, 2012

Ficha Catalográfica:

Calado, Renata Novaes

**“ESTUDO DE CASO DE TEMPESTADE SEVERA NO
RIO DE JANEIRO EM ABRIL 2010”**

Rio de Janeiro, 2012, pp 72. Universidade Federal do Rio de Janeiro

Dissertação para obtenção do título de Bacharel em Meteorologia

“Há pessoas que desejam saber só por saber, e isso é curiosidade; outras, para alcançarem fama, e isso é vaidade; outras, para enriquecerem com a sua ciência, e isso é um negócio torpe; outras, para serem edificadas, e isso é prudência; outras, para edificarem os outros, e isso é caridade”

Santo Agostinho

AGRADECIMENTOS

Acima de todos agradeço primeiramente a Deus, que durante toda a minha vida me guiou e me fortaleceu, estando presente em todos os momentos e me ajudando a seguir sempre em frente. Agradeço aos meus pais que me ajudaram a ser a pessoa que hoje sou, e a todos os meus familiares, pois todos tem sua parcela na minha formação.

Aos amigos que fiz no CEFET, a todos os professores que plantaram a “sementinha da meteorologia” em mim, e agradeço em especial às amigas Jessica, Nathalia, Patricia, Beth, Lais e Thais, com a certeza de que nossa amizade será eterna e também ao amigo Daniel. Agradeço a todos da 3HMED pois todos juntos fizeram com que essa fase da minha vida fosse tão incrível.

Agradeço ao apoio de todos colegas de turma durante o curso na UFRJ, especialmente à Jessica, Leonardo e Christiane, que tornaram a faculdade um local para se ter amigos, e também a todos os outros com quem dividi histórias durante a Graduação. Agradeço também à Cithia Avellar por toda ajuda.

Agradeço ao pessoal do CHM, especialmente aos militares da divisão de previsões ambientais por toda amizade, “companheirismo” e por toda a “guerra”; principalmente por todo apoio que recebi durante o final da faculdade. Tenham certeza de que todos tem seu lugar em meu coração. Agradeço também a toda equipe do Alerta-Rio, pela ótima convivência.

Agradeço a todos os incontáveis amigos que fiz na Paróquia Nossa Senhora de Loreto, amigos que fizeram parte da etapa mais divertida da minha vida. Aos amigos Carol e Thiago, por todos os anos de amizade e aos compadres Aline e Douglas.

Faço um agradecimento especial ao meu marido, Marcelo, que sempre esteve ao meu lado apoiando minhas decisões, minha gratidão eterna.

Agradeço também à D^{ra}. Claudine Pereira Dereczynski por toda orientação e paciência, ao Luis Henrique Alves da Silva pela ajuda com as figuras. Agradeço a todos os professores que passaram pela minha vida estudantil, especialmente aos professores do Departamento de Meteorologia da UFRJ.

Agradeço a todos que fizeram parte da minha vida e me ajudaram a chegar até aqui.

RESUMO

Uma análise sinótica do evento de tempestade severa que atingiu a Região Metropolitana do Rio de Janeiro no dia 6 de abril de 2010 foi elaborada. O objetivo deste trabalho é contribuir para a previsão deste tipo de evento, com a expectativa de que a identificação do padrão sinótico deste evento possa servir de guia para os previsores. A análise foi feita utilizando-se dados da Reanálise ERA-Interim, dados convencionais (SYNOP, METAR, totais pluviométricos), além de imagens de satélite e radar. Os resultados mostraram que o evento foi causado por um Sistema Convectivo de Mesoescala (SCM) formado após a passagem de um Sistema Frontal (SF) que se deslocava pela Região Sudeste do Brasil. Tal SCM manteve-se ativo por várias horas fazendo com que chovesse forte e de forma contínua sobre a região, totalizando-se entre 12 Z do dia 05/04 até 12 Z do dia 06/04 acima de 100 mm em toda a cidade entre 05/04 – 12 Z e 06/04 – 12 Z, com máximo de 321,0 mm no Sumaré. A presença de um ciclone extratropical contribuiu para que houvesse um aporte de umidade do oceano em direção ao litoral. Tal ciclone esteve associado a um cavado que se estendeu pela média e alta troposfera, favorecendo a convergência de massa e umidade na superfície. A presença de forte componente dinâmica e do intenso padrão termodinâmico que prevaleciam na Região Sudeste foram os principais fatores que contribuíram para as fortes chuvas que atingiram a RMRJ.

Neste estudo foi incluído também um levantamento de chuvas históricas no Município do Rio de Janeiro, desde a fundação da cidade (1565) até os dias atuais. Tal levantamento foi feito com objetivo de comparar eventos passados com o caso estudado neste trabalho. Os resultados mostraram que de fato o evento de 06 de abril de 2010 representou um recorde com relação aos totais pluviométricos diários que começaram a ser registrados na cidade a partir de 1851.

Abstract

CASE STUDY OF SEVERE STORM IN RIO DE JANEIRO IN APRIL 2010

A synoptic analysis of an extreme storm that hit the Metropolitan Region of Rio de Janeiro (MRRJ) on April 6, 2010 was developed. The objective of this work is to improve the forecast of such phenomenon, hoping that the identification of the synoptic pattern of this event should provide guidance to forecasters. ERA-Interim reanalysis data, conventional data (SYNOP, METAR, total rainfall), and also satellite and radar images were used in this study. The results showed that the event was caused by a Mesoscale Convective System (MCS) formed after the passage of a Frontal System (FS) over Southeastern Brazil. This MCS remained active for several hours causing heavy persistent precipitation, accumulating more than 100 mm between 12 Z - Apr, 04 to 12 Z - Apr, 05, all over the city, achieving a maximum of 321.0 mm in Sumaré. Before the passage of FS, the atmosphere was warm and humid and became more unstable with the arrival of a dry and cold air that was in the rear of the FS. The presence of an extratropical cyclone was a significant feature in the inflow of moisture from the ocean toward the coast. This cyclone was associated with a trough that extended into the middle and upper troposphere, enhancing the surface's moisture convergence. The combination of a strong dynamic's component and a thermodynamic's intense pattern were the main contributions to the heavy rains that hit the MRRJ.

This study also included a survey of extreme precipitation events in the city of Rio de Janeiro, since the foundation of the city (in 1565) until these days. This survey was done in order to compare past events with the case studied in this work. The results showed that in fact the event of April 6, 2010 represented a record in relation to the total daily rainfall since 1851.

ÍNDICE

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xii
Lista de Siglas	xiii
Resumo	vi
1 – Introdução	1
2 – Revisão da Literatura	3
3 – Metodologia e Dados	11
3.1 Levantamento de Chuvas Históricas no Município do Rio de Janeiro	11
3.2 Estudo de Caso de Abril de 2010	11
3.2.1 Dados utilizados	12
a) Totais pluviométricos das Estações da Geo-Rio	12
b) Dados de METAR	13
c) Dados da Reanálise ERA-INTERIM	13
d) Imagens de Satélite	14
e) Imagens do Radar Meteorológico do Pico do Couto	14
f) Dados de Desastres da Secretaria Nacional de Defesa Civil	14
g) Previsões geradas pelo modelo Regional ETA	14
4 – Eventos históricos de chuvas intensas no Município do Rio de Janeiro	17
4.1 Eventos anteriores ao Século XX	17
4.2 Eventos no Século XX	19
5 – Análise do evento de chuva intensa de Abril de 2010	36
5.1 Apresentação do evento	36
5.2 Análise do evento	41
5.3 Análise das Previsões do Modelo Eta do CPTEC	62
6 – Conclusões e Recomendações finais	65
Referências Bibliográficas	67

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 – Modelo conceitual de uma frente fria desenhado sobre a imagem de satélite do dia 04/04/2010, durante o evento estudado neste trabalho. 4
- Figura 2.2 - Mapa da divisão da região de estudos por Bandas de acordo com Oliveira, 1986, com destaque para a RMRJ no círculo vermelho (Adaptado de Oliveira, 1986). 5
- Figura 2.3 – Frequência média mensal de ocorrência de frentes frias por faixas de latitudes (Adaptado de Oliveira, 1986). 6
- Figura 2.4 – Frequência média mensal de ocorrência de sistemas frontais na região entre 20°S e 25°S no litoral Leste da América do Sul (Adaptado de Andrade, 2007). 7
- Figura 2.5 - Sondagem atmosférica de um ambiente propício ao desenvolvimento de tempestades severas com ventos fortes (Fonte: Dereczynski e Menezes, 2011). 10
- Figura 4.1 – Fotos da tempestade de 29/01/1940 na Praça da Bandeira. Fonte: O Globo em www.g1.globo.com. 20
- Figura 4.2 – Fotos da tempestade do início de janeiro de 1942 na Praça da Bandeira. Fontes: a, b e c: Costa e Teuber (2001) e d: <http://aleosp2008.files.wordpress.com/2008/11/1942.jpg>. 21
- Figura 4.3 – Fotos da tempestade de 11/01/1966 no Rio de Janeiro. Fonte: Acervo do Jornal O Globo, publicado em 12/01/1966. 24
- Figura 4.4 – Capa do Jornal A Última Hora de 12/01/1966, com destaque para as chuvas do Rio de Janeiro. Fonte: <http://aleosp2008.files.wordpress.com/2008/11/1966c.jpg>. 25
- Figura 4.5 – Foto do desabamento na Rua General Glicério em 20/01/1967. Fonte: <http://www.rioquepassou.com.br/2010/01/02/rua-gal-glicerio-janeiro-de-1967/>. 26
- Figura 4.6 – Morte num ônibus tombado no rio Faria-Timbó e nas calçadas dos subúrbios. Em Caxias arquipélagos de telhados criados por um dia de chuva. Fonte: Revista VEJA. 27
- Figura 4.7 – Rua do Lavradio em 1976. Fonte: O Globo em www.g1.globo.com 28
- Figura 4.8 – Alagamentos causados pela chuva de fevereiro de 1988. Fonte: a) 30

g1.globo.com. b) www.terra.com.br

Figura 4.9 – Totais pluviométricos diários (mm) registrados em 36 eventos de chuvas intensas, em comparação ao evento de abril de 2010 (em vermelho). 34

Figura 4.10 – Frequência de ocorrência dos 37 eventos de chuvas intensas ao longo do ano. 35

Figura 5.1 – Fotos da destruição provocada pelas chuvas na cidade do Rio de Janeiro nos dias 06 a 07 de abril de 2010. (a) Carros alagados na Praça da Bandeira; (b) Carros foram arrastados pela correnteza na praça da Bandeira; (c) Rua totalmente alagada em Icaraí, Niterói; (d) Morador tenta limpar a sujeira deixada pela chuva em São Francisco, Niterói; (e) Lagoa Rodrigo de Freitas; (f) Deslizamento de terra em São Conrado; (g) Rua Francisco Bicalho, no centro do Rio, completamente tomada pelas águas da chuva e (h) Uma pedra deslizou da encosta e bloqueou completamente a circulação na Avenida Menezes Cortes. Fonte: oglobo.globo.com 37

Figura 5.2 – Fotos da ressaca após a passagem da frente em 09/04/2010. (a) pessoas que tiravam fotos do evento correm das águas que ultrapassaram a faixa de areia e atingiram a calçada e a rua na Avenida Atlântica. (b) As ondas atingiram o muro que separa a faixa de areia e a calçada em Icaraí – Niterói. (c) Ondas atingem a área do Aeroporto Santos Dummont e espalham areia na pista. (d) Com a ponte Rio-Niterói ao fundo surfista aproveita as ondas na Baía de Guanabara. Fonte: oglobo.globo.com. 39

Figura 5.3 – Fotos do Morro do Bumba em Niterói durante o evento de chuvas intensas nos dias 6 e 7 de abril de 2010. (a) Vista aérea do Morro do Bumba após o grande deslizamento de terra; (b) Rastro de lama deixado pela terra no Morro do Bumba; (c) Montanha de lama e terra que deslizou do Morro do Bumba, embaixo dessa lama havia várias residências soterradas; (d) Equipes de resgate tentam encontrar sobreviventes sob a terra no Morro do Bumba. Fonte: veja.abril.com.br 40

Figura 5.4 - Imagens de Satélite do evento no canal IR. (a) 04/04/10 - 12Z; (b) 05/04/10 - 00Z; (c) 05/04/10 - 12Z; (d) 06/04/10 - 00:00Z; (e) 06/04/10 - 12Z e (f) 07/04/10 - 00Z. 42

Figura 5.5 - Cartas Sinóticas do evento. (a) 04/04/2010 - 12Z; (b) 05/04/2010 - 00Z; (c) 05/04/2010 - 12Z; (d) 06/04/2010 - 00Z; (e) 06/04/2010 - 12Z e (f) 07/04/2010 - 00Z (Fonte: <http://www.mar.mil.br/dhn/chm/meteo/prev/cartas/cartas.htm>) 45

Figura 5.6 - Campo de pressão atmosférica (hPa) ao nível médio do Mar e divergência do vento em 850hPa (105s-1) (sombreado) para o período do evento. (a) 04/04/2010 - 12Z (b) 05/04/2010 - 00Z; (c) 05/04/2010 - 12Z; (d) 06/04/2010 - 00Z; (e) 06/04/2010 - 12Z; e (f) 07/04/2010 - 00Z. 47

Figura 5.7 - Campo de umidade específica (g/Kg) (sombreado) e linhas de corrente em 850 hPa para o período do evento. (a) 04/04/2010 - 12Z; (b) 49

05/04/2010 – 00Z; (c) 05/04/2010 – 12Z; (d) 06/04/2010 – 00Z; (e) 06/04/2010 – 12Z; e (f) 07/04/2010 – 00Z	
Figura 5.8 – Campo de Temperatura do ar (°C) à superfície para o período de estudo. (a) 04/04/2010 – 12Z; (b) 05/04/2010 – 00Z; (c) 05/04/2010 – 12Z; (d) 06/04/2010 – 00Z; (e) 06/04/2010 – 12Z; e (f) 07/04/2010 – 00Z	50
Figura 5.9 - Altura Geopotencial (m _g p) (linhas) e Ômega (Pa/s) (sombreado) em 500hPa. (a) 04/04/2010 – 12Z; (b) 05/04/2010 – 00Z; (c) 05/04/2010 – 12Z; (d) 06/04/2010 – 00Z; (e) 06/04/2010 – 12Z; e (f) 07/04/2010 – 00Z	52
Figura 5.10 - Altura Geopotencial (m _g p) (linhas) e Vorticidade Relativa (105s ⁻¹) (sombreado) em 300hPa. (a) 04/04/2010 – 12Z; (b) 05/04/2010 – 00Z; (c) 05/04/2010 – 12Z; (d) 06/04/2010 – 00Z; (e) 06/04/2010 – 12Z; e (f) 07/04/2010 – 00Z.	53
Figura 5.11 - Distribuição espacial do total pluviométrico, em mm, entre 12Z do dia 5 até 12 Z do dia 6 de abril de 2010 no município do Rio de Janeiro (Fonte: Geo-Rio).	56
Figura 5.12 - Totais pluviométricos acumulados, em mm, a cada 15 min durante o evento na estação Sumaré no período de 00:20 Z de 5 de abril até 22:20 Z de 7 de abril Ressalta-se o pico de precipitação de 18,2 mm em 15min às 18h05min.	58
Figura 5.13 – Imagens do radar do Pico do Couto para os dias 05 e 06/04/2010 mostrando o SCM que causou os elevados totais pluviométricos na RMRJ.	59
Figura 5.14 – Imagens de satélites no Canal infravermelho (IR) com realce de temperatura setorizadas na região Sudeste do Brasil. (a) 04/04/10 - 12Z; (b) 05/04/10 - 00Z; (c) 05/04/10 - 12Z; (d) 06/04/10 – 00:00Z; (e) 06/04/10 - 12Z e (f) 07/04/10 – 00 Z.	61
Figura 5.15 – Previsão de precipitação acumulada em 24 horas às 12Z do dia 06/04/2010 com modelo Eta integrado com 72 horas de antecedência.	62
Figura 5.16 – Previsão de precipitação acumulada em 24 horas às 12Z do dia 06/04/2010 com modelo Eta integrado com 48 horas de antecedência.	63
Figura 5.17 – Previsão de precipitação acumulada em 24 horas às 12Z do dia 06/04/2010 com modelo Eta integrado com 24 horas de antecedência.	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Sumário dos totais pluviométricos diários durante eventos de chuvas intensas, pesquisados até o final do século XIX	19
Tabela 4.2 – Sumário dos maiores totais pluviométricos diários registrados durante 21 eventos de chuvas intensas, no período de 1900 até 1996.	31
Tabela 4.3 – Seleção dos treze eventos de precipitação mais intensos ocorridos no município do Rio de Janeiro no período de janeiro de 1997 a dezembro de 2006, considerando-se os casos com totais pluviométricos diários superiores a 100 mm (Fonte: Adaptado de Dereczynski et al., 2009).	32
Tabela 5.1 – Dados da Defesa civil sobre prejuízos com o evento para a RMRJ.	41
Tabela 5.2 – Informações extraídas do METAR das estações do Galeão (SBGL) e Santos Dumont (SBRJ) do período entre a noite de 04/04/2010 e a manhã de 06/04/2010. (Fonte: www.redemet.aer.mil.br). Em retângulos vermelhos estão ressaltados os relatos de tempo severo.	43
Tabela 5.3 - Tabela com as maiores taxas de precipitação observadas durante o evento e o total acumulado no dia 06/04 – 12 Z. Destaca-se em amarelo as maiores taxas e em rosa as segundas maiores taxas.	57

LISTA DE SIGLAS

AF	Alta Fria
ASAS	Alta Subtropical do Atlântico Sul
BDMEP	Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa
Cb	Cumulonimbus
CBMERJ	Corpo de Bombeiro Militar do Estado do Rio de Janeiro
CCM	Complexo convectivo de Mesoescala
CPTEC	Centro de Previsão do tempo e Estudos Climáticos
DHN	Diretoria de Hidrografia da Marinha
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
DNOS	Departamento Nacional de Obras e Saneamento
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IR	Infra-vermelho
METAR	Meteorological Aerodrome Report
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
RMRJ	Região Metropolitana do Rio de Janeiro
SCM	Sistemas Convectivos de Mesoescala
SERLA	Superintendência Estadual de Rios e Lagoas
SF	Sistemas Frontais
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Eventos de precipitação intensa estão frequentemente atrelados a uma série de graves problemas, tais como ocorrência de deslizamentos e enchentes, provocando um grande número de mortes, acidentes e prejuízos materiais.

De acordo com Dereczynski et al. (2009), sistemas frontais (SFs) são os principais responsáveis por eventos de chuvas intensas na cidade do Rio de Janeiro, estando estes associados à SCMs nos casos de chuvas mais intensas. Com relação à variabilidade temporal, o verão e o outono são as estações de maior frequência de ocorrência de chuvas fortes, devido às elevadas temperaturas, elevado teor de umidade, ocasionando grande instabilidade atmosférica.

O Estado do Rio de Janeiro é alvo frequente de tormentas que afetam diretamente a vida cotidiana de seus habitantes. Casos de alagamentos e transtornos causados por intempéries meteorológicas afetam a região desde o início de sua ocupação. Com o passar dos anos e com o advento da tecnologia e da informação foi se tornando possível aprimorar o registro e a previsão dessas tempestades e cada vez com mais detalhes pode-se estudar os aspectos atmosféricos geradores de cada evento. Por outro lado, áreas de risco, antes desabitadas passaram a ser ocupadas pela população mais carente, aumentando a vulnerabilidade da população nos eventos de chuvas intensas.

Na noite do dia 5 de abril de 2010, a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) foi atingida por um sistema convectivo de mesoescala (SCM), associado à passagem de um sistema frontal. As chuvas intensas, que atingiram 321 mm em 24 horas, deflagraram diversos eventos de deslizamentos de terra. No Morro do Bumba, em Niterói, uma região em que viviam cerca de 150 famílias, a tragédia foi ainda maior, com total de 47 mortos ao mesmo tempo. Ao todo, foram mais de 250 mortes e milhares de desabrigados e desalojados no Estado do Rio de Janeiro. Outros transtornos, tais como enchentes, quedas de árvores, problemas de transmissão de energia elétrica, além de ressacas com ondas de até 5 metros, paralisaram a RMRJ nos dias 6 e 7.

O objetivo deste trabalho é identificar os principais mecanismos dinâmicos e termodinâmicos responsáveis pela ocorrência do evento ocorrido no Rio de Janeiro em 06 de abril de 2010. A partir do conhecimento dos padrões sinóticos associados ao evento, espera-se contribuir para a melhoria da previsão de tais fenômenos.

No Capítulo 2 é feita uma revisão da literatura sobre sistemas frontais e sistemas convectivos de mesoescala. No capítulo 3 são descritos os dados e a metodologia empregada no trabalho. Um breve histórico dos principais eventos de chuvas intensas que atingiram o município do Rio de Janeiro desde a fundação da cidade é feito no Capítulo 4. A análise do caso de abril de 2010 é apresentada no capítulo 5 e finalmente no capítulo 6 estão as conclusões e considerações finais.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é feita uma revisão bibliográfica sobre Sistemas Frontais (SFs) e Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs).

2.1 Sistemas Frontais

Quando duas massas de ar de densidades diferentes tornam-se vizinhas, tendem a se manter individualizadas, como fluidos não miscíveis e, portanto, a conservar suas características particulares. Há entre elas uma camada de transição, normalmente com vários quilômetros de espessura, onde se verifica mistura das duas massas presentes. Essa camada é conhecida como superfície frontal (Varejão, 2005).

Uma frente é dita fria quando sua passagem por um determinado local da superfície terrestre provoca a substituição do ar quente que ali existia por ar frio. Assim, a massa de ar pré-frontal é quente e a massa de ar pós-frontal é fria. Como o ar frio é mais denso, a superfície frontal fria se inclina para trás, por sobre o ar frio invasor (que tende a permanecer justaposto à superfície terrestre), apresentando-se com uma inclinação da ordem de 1:50 a 1:100 (Varejão, 2005).

Uma frente típica que evolui sobre a América do Sul (Figura 2.1), tem uma configuração atmosférica constituída da presença da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) em sua dianteira (linha grossa vermelha, denotada pela sigla ASAS) e um sistema de alta pressão frio, também conhecido como “Alta Migratória Fria” em sua retaguarda (linha grossa na cor azul – Alta Fria), avançando em direção a ASAS. Entre os dois sistemas de alta pressão, encontram-se regiões de pressões mais baixas, com a presença da frente fria (linha fina azul escura com triângulos em sua borda), e de um ciclone extratropical na retaguarda (denotado pela letra B) na região de oclusão do sistema frontal (linha lilás) (Dereczynski e Menezes, 2011).

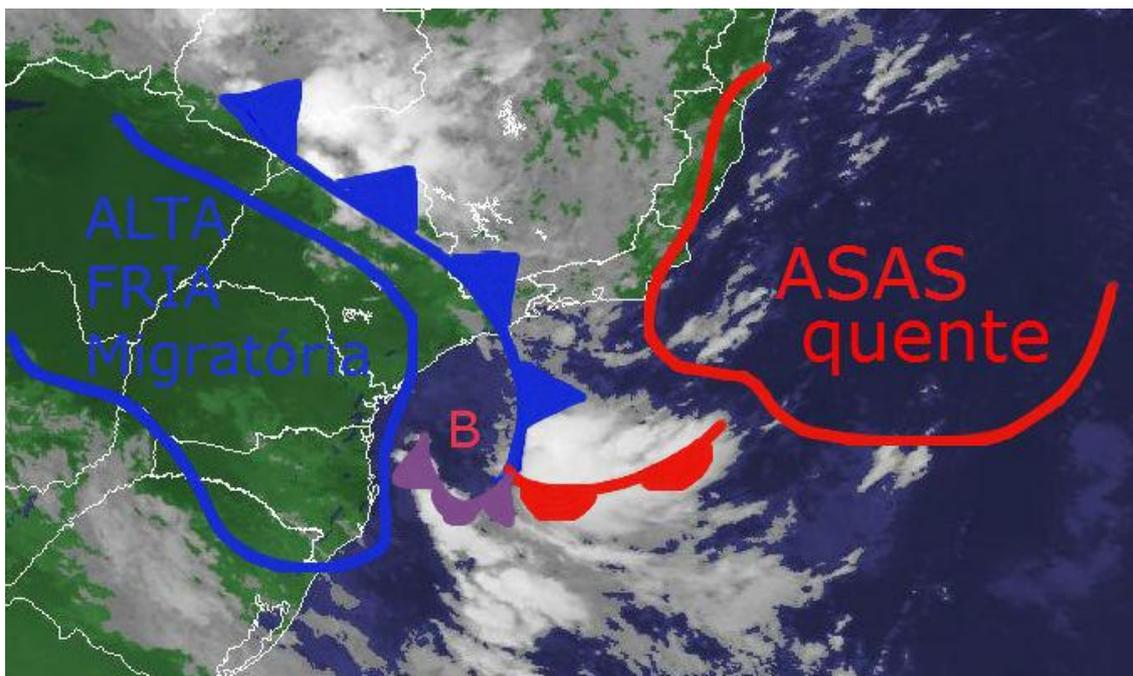


Figura 2.1 – Modelo conceitual de uma frente fria desenhado sobre a imagem de satélite do dia 04/04/2010, durante o evento estudado neste trabalho.

Os seguintes critérios s3o usados para localizar uma frente fria em uma carta de superf3cie: i) Forte mudan7a de temperatura em uma dist4ncia relativamente curta; ii) Varia76es no cont3ido de umidade; iii) Varia76es na dire76o do vento e iv) presen7a de nuvens e precipita76o.

De acordo com Dereczynski et al. (2009), SFs s3o os principais respons3veis por eventos de chuvas intensas na cidade do Rio de Janeiro, estando estes associados 3 SCMs nos casos de chuvas mais intensas. Com rela76o 3 variabilidade temporal, o ver3o e o outono s3o as esta76es de maior frequ4ncia de ocorr4ncia de chuvas fortes, devido 3s elevadas temperaturas, elevado teor de umidade, ocasionando grande instabilidade atmosf3rica.

Segundo Seluchi (2006) nas situa76es de frentes frias, 3 poss3vel identificar um padr3o de ondas curtas com caracter3sticas barocl3nica, em fun76o da defasagem com os campos de press3o ao n3vel do mar e 850 hPa, cujo eixo apresenta uma leve inclina76o SO-NE.

Oliveira (1986) e Lemos e Calbet (1996) mostraram que, embora a entrada de frentes no continente seja comum em todas as esta76es do ano, existe uma varia76o

sazonal na atividade convectiva a elas associadas, sendo extremamente baixa durante o inverno, principalmente nos meses de junho e julho, quando a entrada de tais sistemas no continente sul-americano não traz tanta chuva quanto no verão.

Oliveira (1986) apresentou um estudo de 10 anos (1975 – 1984) sobre frentes frias. Tal estudo dividiu a América do Sul em 4 bandas, ilustradas na Figura 2.2, e apresentou os resultados em histogramas estatísticos, como na Figura 2.3. Neste trabalho, a autora verificou que os períodos de primavera (SON) e inverno (JJA) são os períodos mais favoráveis à presença de frente frias na região do Rio de Janeiro (entre 25°S e 20°S), sendo a média de ocorrência de SF no período de 4,3 casos por mês na primavera e 4 casos no inverno. Foi verificado também baixa ocorrência de Sistemas Frontais na região durante o verão (DJF), tendo 3 casos por mês, em média.

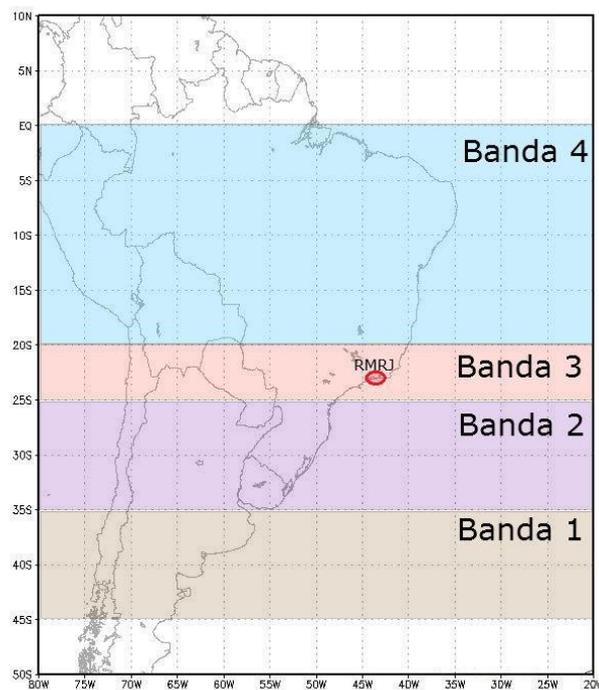


Figura 2.2 - Mapa da divisão da região de estudos por Bandas de acordo com Oliveira, 1986, com destaque para a RMRJ no círculo vermelho (Adaptado de Oliveira, 1986).

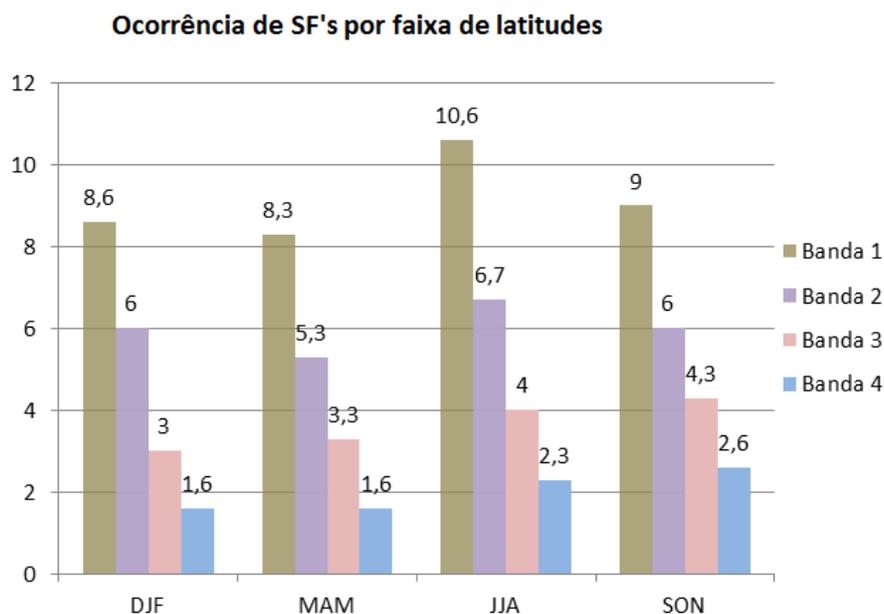


Figura 2.3 – Frequência média mensal de ocorrência de frentes frias por faixas de latitudes (Adaptado de Oliveira, 1986).

Andrade (2007) também apresentou um estudo abordando o mesmo tema, porém com um período de pesquisa mais recente (entre 1980 e 2002), tendo encontrado algumas discrepâncias em relação ao estudo de Oliveira (1986).

Com uma área de estudo igual a banda 3 do estudo de Oliveira (1986), Andrade (2007) verificou que a maior frequência de ocorrência de frentes frias em tal região seria o período da primavera e outono (enquanto que o trabalho de Oliveira, 1986; citou serem primavera e inverno). Assim como a outra autora, Andrade (2007) verificou que o verão é o período de menor frequência de ocorrência de sistemas frontais. Um gráfico explicitando as frequências encontradas em Andrade (2007) é mostrado na Figura 2.4.

Apesar de tal discrepância entre os trabalhos, ambos as autoras citaram a primavera como estação com maior número de sistemas frontais atingindo a região. Andrade (2007) verificou a frequência média 5,3 casos no período e Oliveira (1986), 4,3 casos. Outro ponto em comum entre os trabalhos aponta o verão como sendo o período de menor ocorrência desses eventos.

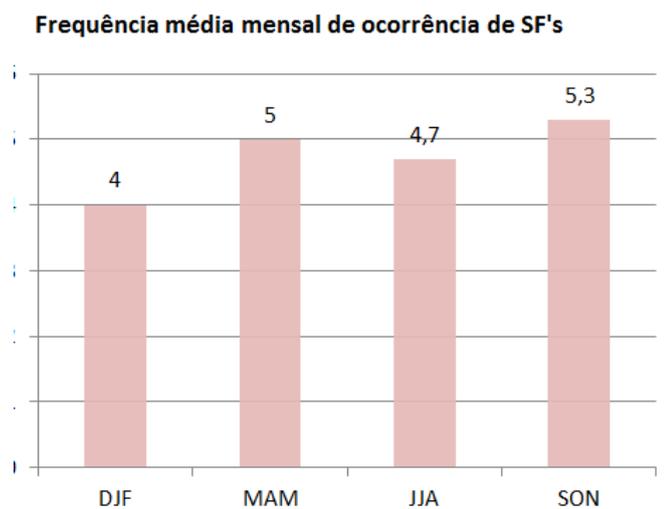


Figura 2.4 – Frequência média mensal de ocorrência de sistemas frontais na região entre 20°S e 25°S no litoral Leste da América do Sul (Adaptado de Andrade, 2007).

Cavalcanti e Kousky (2009) estudaram de forma mais ampla a ocorrência de sistemas frontais sobre o Brasil, selecionando no período de 1979 a 2005 os 50 casos mais extremos.

Os autores chamam o momento inicial de formação do sistema de “t-1” e mostram que o escoamento sobre a região continental do Brasil, neste instante, é de Norte, havendo confluência com o escoamento de Sudoeste vindo do sul da Argentina. O instante da formação da frente, quando ela se organiza, é dito tempo “t”, e neste instante, notou-se a presença da alta subtropical quente (ASAS). Ao mesmo tempo há uma confluência notória sobre o Oceano, com um escoamento de Noroeste proveniente do Sul do Brasil que gera uma confluência com o escoamento de sudoeste do sul a Argentina, porém há um pequeno deslocamento para Nordeste da posição anterior do escoamento.

Quando o sistema frontal atinge a região sul do Brasil é dito o tempo “t+1”; o escoamento de Sudoeste que cada vez mais se desloca para Norte já atinge a região Sul do Brasil, e há uma convergência sobre o Sudeste brasileiro. Nesse instante é possível observar a alta migratória fria sobre a Argentina, na retaguarda do sistema.

Nos tempos a seguir, “t+2” e “t+3”, o sistema evolui e chega a atingir a região Sudeste do Brasil, e dessa forma os ventos sobre essa região passam a ser de Sudoeste. Diversos estudos já mostraram que a passagem de uma frente fria, pode estar associada

com ventos intensos, tanto no período pré-frontal (com a aproximação do sistema), como no de sua passagem.

Depois da passagem do sistema, com a chegada da alta pressão migratória fria, nas latitudes mais baixas, a alta já não se encontra tão frio como inicialmente. Após isso, geralmente há uma fusão entre essa alta migratória e a ASAS, predominando os ventos de Leste sobre a região.

2.2 Sistemas Convectivos de Mesoescala

De acordo com a classificação de Orlanski (1975) sistemas de tempo de Mesoescala, tais como linhas de instabilidade e aglomerados convectivos possuem dimensão espacial de cerca 20 quilômetros até 200 quilômetros e dimensão temporal variando de algumas horas até um dia, estando compreendidos na escala meso- β . Sabe-se que a ocorrência de eventos que provoquem situações adversas de tempo, como ventos de caráter intenso (ou extremo) está, muitas vezes, associada a sistemas meteorológicos com nuvens de convecção profunda em sua composição. Estas nuvens são as chamadas nuvens cumulonimbus (Cb), também denominadas por muitos autores células convectivas ou nuvens de tempestade. Sabe-se também que os sistemas meteorológicos convectivos em mesoescala são formados predominantemente, por nuvens deste padrão.

Os sistemas de mesoescala formados por nuvens Cb tem uma denominação usual que é o termo “tempestades convectivas”, sendo que existem diversos tipos de tempestades, cada uma com sua denominação específica, como “Linhas de Instabilidade” (Hane, 1986), “Tempestades Isoladas” (Weisman e Klemp, 1986), “Tempestades em Supercélulas” (Weisman e Klemp, 1986), “Nuvens Vírgula” (Reed, 1979, Dereczynski, 1995), entre outros. Quando uma tempestade convectiva produz grandes pedras de granizo, rajadas de vento muito intensas, ou qualquer tipo de destruição substancial (prejuízos materiais e humanos) no local onde ela atinge, ela recebe a denominação de “Tempestade Severa” (Doswell, 2001). Grande parte dos eventos observados (ou estimados) de ventanias muito intensas está associada às tempestades severas (Doswell, 2001).

Um detalhe importante de se ressaltar é o fato dos ventos produzidos por estas nuvens de tempestade não terem um padrão definido de direcionamento. Tais ventos são gerados a partir das correntes descendentes provenientes das células convectivas, quando estas atingem o solo. Os ventos fortes produzidos pelos sistemas convectivos de mesoescala ocorrem, principalmente, devido a fatores relacionados às trocas de energia na atmosfera durante processos de formação, amadurecimento e dissipação das nuvens convectivas. As principais trocas de energia são devidas a processos de aquecimento ligados à liberação de calor latente na condensação (formação das nuvens) e processos de resfriamento intenso relacionados à absorção de calor latente na evaporação (gotas de chuva e de nuvens evaporando na atmosfera seca em níveis médios e, algumas vezes até, baixos).

Cotton e Anthes (1989), Byers e Braham (1949) identificaram três estágios de evolução de uma nuvem cumulonimbus ou tempestade convectiva, o estágio cúmulos, o estágio maduro e o estágio dissipativo. Aos autores citam que durante o estágio cúmulos, as nuvens são alimentadas pela convergência de umidade nos baixos níveis que está associada a movimentos ascendentes. Dessa forma, nesse instante predominam correntes ascendentes.

Os ventos junto à superfície são gerados pelos movimentos descendentes, que caracterizam a transição entre as fases cúmulos e madura. Quando já há predominância de ventos descendentes, a nuvem encontra-se no estágio dissipativo.

As tempestades de caráter mais severo, que podem provocar ventanias, geralmente se formam em ambientes que possuem um forte gradiente vertical de umidade, ou seja, ar bastante úmido em níveis baixos e uma camada de ar bastante seco situada imediatamente acima do ar úmido de baixos níveis (Hane, 1986). A Figura 2.5 ilustra uma sondagem atmosférica de um ambiente propício a tempestades severas e ventanias. Nesta sondagem pode-se perceber a presença de ar úmido em baixos níveis e uma camada com grande subsaturação (ilustrada dentro da elipse azul) imediatamente acima da camada úmida. Tal configuração é indicativa de grande instabilidade convectiva mostrando um ambiente bastante favorável à ocorrência de tempestades.

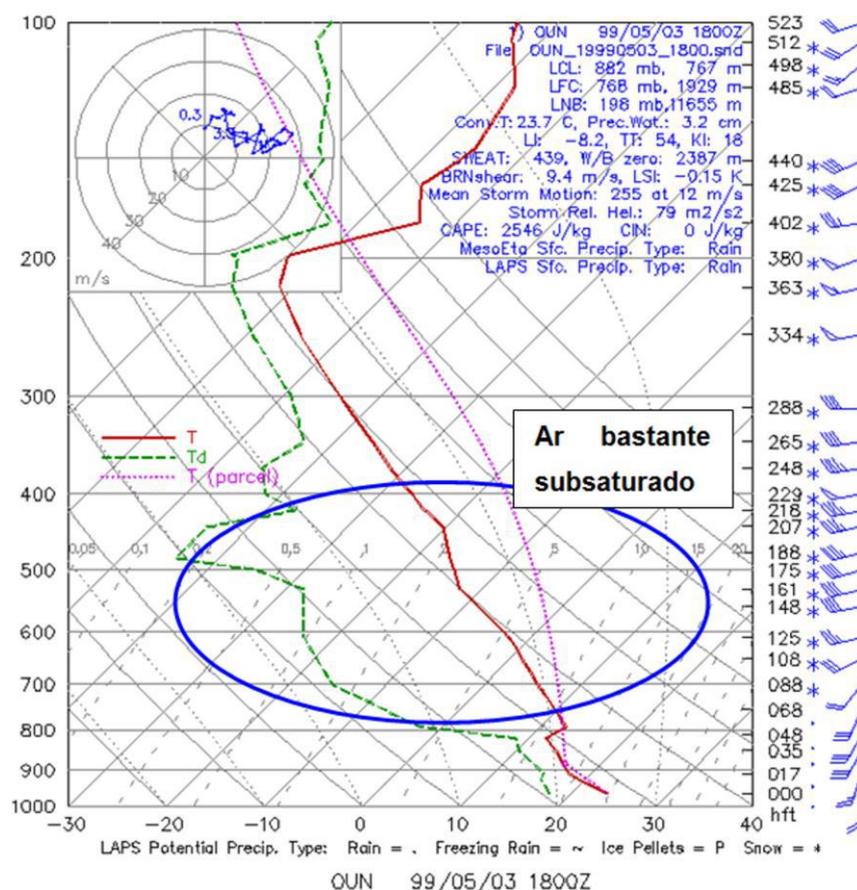


Figura 2.5 - Sondagem atmosférica de um ambiente propício ao desenvolvimento de tempestades severas com ventos fortes (Fonte: Dereczynski e Menezes, 2011).

Os complexos convectivos de Mesoescala (CCM) são conjuntos de cumulonimbus cobertos por uma densa camada de cirrus que podem ser facilmente identificados em imagens de satélite como sendo sistemas de nuvens aproximadamente circulares e com um crescimento explosivo num intervalo de tempo de 6 a 12 horas. (Silva Dias, 1987).

Segundo Velasco e Fritsch (1987), as primeiras tempestades tipicamente se desenvolvem durante o começo da noite (19HL) e a transição para um grande sistema de mesoescala altamente organizado usualmente ocorre algumas horas depois (tipicamente 21:30HL); a maioria dos sistemas atingiram máxima extensão após meia noite (cerca de 00:30 HL) e persistem até as primeiras horas da manhã (09HL). Esse resultado é coerente com o caso aqui estudado onde se documentou o início da chuva aproximadamente às 18:00 HL durando até cerca de 08:30 HL.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA E DADOS

No presente capítulo são apresentadas a metodologia e dados utilizados para elaboração do estudo de caso de abril de 2010 e também para realizar o levantamento das chuvas históricas no Município do Rio de Janeiro.

3.1 Levantamento de Chuvas Históricas no Município do Rio de Janeiro

Para realização do levantamento histórico de eventos de chuvas intensas foram utilizadas, além da bibliografia citada no capítulo 4, as seguintes séries de totais pluviométricos diários das estações do INMET, obtidas do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP): Alto da Boa Vista (83007) no período de 02/06/1966 a 31/12/2011; Realengo (83801), no período de 02/04/1971 a 31/12/2011; Rio de Janeiro (83743) no período de 02/01/1961 a 31/12/2011 e Santa Cruz (83789), no período de 02/10/1963 a 31/12/2011. Para a estação Bangu, infelizmente só tivemos acesso aos maiores totais pluviométricos diários a cada ano no período de 1930 a 1998.

3.2 Estudo de Caso de Abril de 2010

Na primeira fase do trabalho, foi feita uma coleta de dados sobre o evento de abril de 2010 com o objetivo de constituir um banco de informações sobre o evento, possibilitando analisar diversos aspectos que culminaram com o episódio estudado. Os dados incluem:

- 1) Dados observacionais convencionais tais como: Totais pluviométricos das estações da Geo-Rio; mensagens METAR dos aeródromos do Rio de Janeiro: i) Campo Délio Jardim de Mattos (Afonso) – SBAF; ii) Antônio Carlos Jobim (Galeão) – SBGL; iii) Jacarepaguá – SBJR; iv) Santos Dumont – SBRJ, e v) Santa Cruz – SBSC e mensagens SYNOP das estações meteorológicas do INMET no forte de Copacabana;
- 2) Imagens de satélites
- 3) Imagens do radar do Pico do Couto;
- 4) Cartas sinóticas provenientes da DHN;

- 5) Dados gerados por modelagem numérica, incluindo dados de Reanálise ERA-INTERIM e previsões geradas com modelo Eta do CPTEC;
- 6) Notícias veiculadas na mídia.

Posteriormente, com base nos dados de pluviometria da Geo-Rio, definiu-se o período crítico das chuvas, e procedeu-se a análise em escala sinótica para o período compreendido entre 3 dias antes e 1 dia após o evento.

Por último foi feita uma análise das previsões do modelo ETA para avaliar a capacidade do modelo em prever tal evento. Foram utilizadas rodadas de alta resolução tendo em vista que o evento estudado é de mesoescala.

3.2.1 Dados Utilizados

No presente item são apresentadas em detalhes algumas das fontes de dados utilizados listados anteriormente.

a) Totais pluviométricos das Estações da Geo-Rio

O Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro, hoje Fundação Geo-Rio, órgão da Secretaria Municipal de Obras da Prefeitura, é um instituto que tem por objetivo a elaboração de planos emergenciais e de longo prazo para a proteção das encostas. A Geo-Rio possui uma rede de estações pluviométricas distribuídas em todo município e uma equipe de monitoramento das chuvas. Na época do evento a rede da Geo-Rio contava com 32 estações que registram o acumulado de chuva a cada 15min. Foram utilizados dados do período de 04 a 07 de abril de 2010.

Segundo a Fundação Geo-Rio, temos a seguinte classificação:

Chuva fraca: entre 0 e 5 mm/h

Chuva moderada: entre 5 e 40 mm/h

Chuva forte: acima de 40 mm/h

b) Dados METAR

A palavra METAR é um acrônimo para METeorological Aerodrome Report (Relatório Meteorológico de Aeródromo). É um relatório codificado, associado às observações meteorológicas e utilizado para fornecer informações sobre condições do tempo na superfície. Geralmente é composto pelos seguintes itens: vento, visibilidade, alcance visual, tempo presente na pista, nebulosidade, temperatura do ar e do ponto de orvalho e pressão ao nível do mar (ajuste de altímetro). (Fonte: REDEMET).

Foram utilizados dados de METAR dos seguintes aeroportos: Aeroporto Internacional Tom Jobim - Galeão (SBGL), Aeroporto Santos Dumont (SBRJ), Base aérea Campo dos Afonsos (SBAF), Base aérea de Santa Cruz (SBSC) e Campo Délio Jardim de Mattos - Afonsos- (SBAF), sendo todos localizados no Município do Rio de Janeiro.

c) Dados da Reanálise ERA-INTERIM

As Reanálises do projeto Era Interim do ECMWF (Dee et al., 2011) são uma extensão do projeto Era-40 (Uppala et al. 2005) com alguns avanços na assimilação de dados, no uso de observações e na física do modelo. Os dados estão disponíveis no sítio http://data-portal.ecmwf.int/data/d/interim_daily/ a cada $1,5^\circ \times 1,5^\circ$ de latitude e longitude, para o período de 1 de janeiro de 1979 até os dias atuais. A resolução espacial horizontal do modelo atmosférico corresponde a aproximadamente 79 km (resolução espectral horizontal T255). Com relação à resolução vertical, o modelo tem 60 camadas com o topo localizado a 0,1 hPa. Diversas variáveis de superfície são disponibilizadas a cada 3 Z, sendo que nos horários de 00, 06, 12 e 18 Z estão disponíveis os campos analisados e para os demais horários (03, 09, 15 e 21 Z) estão os campos previstos a partir de 00 e 12 Z.

Neste trabalho foram utilizados campos atmosféricos nos horários de 0, 6, 12 e 18 Z nos Baixos (850 hPa), médios (500 hPa) e altos (300 hPa) níveis da troposfera das seguintes variáveis: componentes zonal e meridional do vento, movimento ascendente do ar (ω), temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho, divergência de massa a superfície, umidade específica e altura geopotencial, bem como a pressão ao

nível médio do mar. Os dados de reanálise foram utilizados como representativos do estado real da atmosfera, porém são uma combinação entre modelagem numérica e dados observados.

d) Imagens de Satélite

Imagens do satélite GOES-12: Imagens do canal infravermelho foram utilizadas a fim de identificar e posicionar os SCM's e os SF's através da nebulosidade, Foram utilizadas imagens com a ferramenta de realce que destaca as temperaturas mais baixas e permite identificar sistemas mais profundos.

e) Imagens do Radar Meteorológico do Pico do Couto:

Imagens de radar foram utilizadas para melhor identificar o período de chuva, seu início e seu término e eventuais interrupções durante o evento. O radar do Pico do Couto está localizado em Petrópolis/RJ. O Radar do Pico do Couto encontra-se a uma altura de cerca de 1700m.

f) Dados de Desastres da Secretaria Nacional de Defesa Civil

Dados que quantificam as perdas em diversos pontos do Estado do Rio de Janeiro decorrentes dos desastres notificados à Defesa Civil. Foram consultados os dados de Abril /2010.

g) Previsões geradas pelo Modelo Regional Eta

O modelo de área limitada Eta, foi desenvolvido pela Universidade de Belgrado em conjunto com o Instituto de Hidrometeorologia da Iugoslávia, e se tornou operacional no National Centers for Environmental Prediction (NCEP) (Mesinger et al., 1988; Black, 1994).

O modelo Eta é um modelo atmosférico utilizado operacionalmente e para fins de pesquisa, e em suas diversas versões o modelo vem sendo utilizado em diversos

países. O nome do modelo tem origem na letra grega η , que denota a coordenada vertical (Messinger, 1984).

As variáveis prognósticas do modelo são; pressão à superfície, componente zonal e meridional do vento, temperatura do ar, umidade específica, energia cinética turbulenta e hidrometeoros tipo nuvem.

O modelo ETA é um modelo em ponto de grade. Na horizontal, as variáveis são distribuídas na grade E de Arakawa (Arakawa e Lamb, 1977), e a coordenada vertical é a coordenada η (Mesinger, 1984). A coordenada vertical se baseia em pressão, o que torna a superfície da coordenada aproximadamente horizontal. Esta característica reduz consideravelmente os problemas nos cálculos das derivadas horizontais próxima de região de declividade das montanhas, problema comum na coordenada sigma e, conseqüentemente, reduz os problemas relacionados com o termo importante da força do gradiente horizontal de pressão.

O modelo possui complexa representação dos processos físicos que são tratados através de esquemas de parametrizações. As misturas turbulentas na vertical são resolvidas pelo esquema de Mellor-Yamada (1982) no nível de fechamento 2.5, em que a energia cinética turbulenta é prevista. As trocas de energia à superfície se baseiam na teoria de similaridade de Monin-Obukhov e utilizam as funções de estabilidade de Paulson. O tratamento dos fluxos radiativos na atmosfera foi desenvolvido pelo Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, sendo que radiação de onda curta se baseia no esquema de Lacis e Hansen (1974) e a radiação de onda longa se baseia no esquema de Fels e Schwarzkopf (1975). As taxas de aquecimento ou resfriamento devido aos processos radiativos são recalculados a cada hora de integração. As distribuições de dióxido de carbono, ozônio e do albedo iniciais são provenientes de valores climatológicos. O conteúdo de água no solo é previsto pelo esquema de Chen et al (1997).

O modelo tem sido avaliado para diferentes situações meteorológicas (Chou e Justo da Silva, 1999; Tippet e da Silva, 1999, Betts et al., 1997). Na América do Sul, o Eta do INPE/CPTEC tem sido utilizado para estudos de fenômenos como jatos de baixos níveis (Saulo et al., 2000); trocas de massas de ar (Seluchi e Chou, 1999), vento

zonal (Chou, 1998 e Seluchi et al., 2003), chuvas tropicais (Chou et al., 2004) e estudos de processos de superfície (Chou et al., 2003). O modelo tem sido extensivamente avaliado para prazos de previsão de 3 a 5 dias. A qualidade da precipitação prevista de 36 horas pelo modelo mostrou-se comparável, geralmente superior, aos produtos de chuva estimados por sensoriamento remoto na avaliação realizada por Gonçalves et al. (2006). Previsões no prazo sazonal apresentam limitação na representação da variabilidade intra-sazonal, estas previsões podem ser melhor aproveitadas na forma de médias sazonais (Chou et al., 2005).

CAPÍTULO 4

EVENTOS HISTÓRICOS DE CHUVAS INTENSAS NO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO

Neste capítulo elabora-se um levantamento dos principais eventos históricos de chuvas intensas que atingiram a cidade do Rio de Janeiro desde sua fundação. O termo “chuvas históricas” está sendo utilizado aqui para designar eventos de chuvas intensas que provocaram danos demasiados a um certo local, com grandes prejuízos econômicos e/ou com perda de vidas, permanecendo tal evento presente na memória da população.

De acordo com Brandão (1997) na cidade do Rio de Janeiro só há registros pluviométricos a partir de 1851, com a instalação de uma Estação Climatológica Principal, sendo que a densidade da rede de pluviômetros aumentou muito lentamente até 1996. A partir deste ano (1996), com a criação do Sistema Alerta Rio pela Fundação Instituto de Geotécnica (Geo-Rio) da Prefeitura do Rio de Janeiro, os eventos de chuvas intensas passaram a ser monitorados automaticamente, através de uma rede de pluviômetros (atualmente 32) que exibem totais pluviométricos a cada 15 minutos. O objetivo principal deste levantamento preliminar é, a partir de uma perspectiva histórica, comparar eventos passados com o caso estudado neste trabalho, ocorrido em 06/04/2010. Espera-se também que tal levantamento preliminar possa servir como etapa prévia para trabalhos futuros que visem analisar eventos de chuvas intensas na cidade do Rio de Janeiro.

4.1 Eventos anteriores ao século XX

O primeiro registro de informações sobre enchentes na recém-fundada cidade do Rio de Janeiro data de crônicas do século XVII que abordam uma tempestade ocorrida ainda no século XVI (Costa e Teuber, 2001). Não há uma data exata, mas os registros destacam uma ressaca em um período de maré alta com fortes chuvas. O cômodo (morro) da Rua Direita (atual Rua Primeiro de Março) cedeu ao avanço das águas que chegaram até as lagoas de Santo Antônio (atual Largo da Carioca), do Boqueirão (Passeio Público) e do Outeiro (Rua do Lavradio), alagando toda a região baixa da cidade. Tal alagamento estendeu-se até a Prainha (Praça Mauá) e à Lagoa da Sentinela

(Frei Caneca) de forma que os morros habitados do Castelo (Rua Graça Aranha e México), de São Bento e de Pedro Dias (Rua do Senado) viraram ilhas.

Na madrugada de 21 para 22 de setembro de 1711, uma tempestade que reduziu significativamente a visibilidade na Baía de Guanabara serviu de aliada para o bucaneiro francês Duguay-Trouin. Ele pegou os portugueses de surpresa e tomou a ilha das cobras sob intenso temporal (Costa e Teuber, 2001).

Em abril de 1756 um grande temporal, precedido por ventos fortes, começou a atingir o Rio de Janeiro a partir de 1 hora da tarde do dia 04/04. Foram três dias consecutivos de fortes chuvas, que provocaram inundações em toda cidade e desabamentos de casas, fazendo inúmeras vítimas. As águas se elevaram de tal forma que inundaram a Rua Miguel Couto (Rua do Ouvidor) e invadiram várias residências. No dia 06/04, canoas navegavam do Valongo até a Sé (Brandão, 1997).

Em fevereiro de 1811 a catástrofe que castigou o Rio de Janeiro entre os dias 10 e 17 de fevereiro ficou conhecida como “águas do monte”, em virtude da grande violência com que a enxurrada descia dos morros que cercavam a cidade. Grande parte do Morro do Castelo desmoronou, provocando o desabamento de muitas casas. Fala-se em muitas vítimas e enormes prejuízos materiais, mas os verdadeiros números são desconhecidos, não havendo registros no jornal da época (Gazeta do Rio), segundo o Bibliotecário do Instituto Histórico e Geográfico Brasileiro, Dr. José Vieira Fazenda. Tal foi a magnitude deste temporal que o príncipe regente, D. João VI, ordenou que as igrejas ficassem abertas para acolher os desabrigados e encomendou estudos sobre as causas da catástrofe. A construção da muralha do Castelo-Fortaleza de São Sebastião foi a solução encontrada para evitar novos desabamentos de casas e mais mortes. D. João VI apurou como causas da enchente, a falta de conservação das valas e drenos “pelos entulhos e demais imundícies jogadas nelas” (Brandão, 1997).

Houve outras enchentes no século XIX, ressaltando-se as de 26 de abril de 1883 (239 mm em 24 horas); dezembro de 1884; fevereiro de 1886 e abril de 1888, esta com total de 97 mm de chuva em 24 horas (Brandão, 1997). Durante a tempestade ocorrida em 1864 teve ocorrência de granizo que destelhou toda a cidade e ficou popularmente conhecida como “chuva de pedra” (Costa e Teuber, 2001).

Neste primeiro período da pesquisa, que se estende até o final século XIX, a única informação sobre total pluviométrico diário encontra-se listado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Sumário dos totais pluviométricos diários durante eventos de chuvas intensas, pesquisados até o final do século XIX

Data	Total pluviométrico diário (mm)
26/04/1883	239

4.2 Eventos no Século XX

Em 17/03/1906, registrou-se uma precipitação de 165 mm em 24 horas. Devido ao grande volume de chuva o canal do Mangue transbordou e alagou quase toda a cidade. Houve desmoronamento com vítimas nos morros de Santa Tereza, Santo Antônio e Gamboa (Brandão, 1997).

Em 23/03/1911, houve registro de 150 mm em 24 horas, o que novamente inundou a região da Praça da Bandeira e suas imediações (Brandão, 1997).

No período entre 7 e 9 de março e em 17 de junho de 1916, registrou-se a ocorrência de chuvas intensas com transbordamento do canal do Mangue, totalizando-se 141 mm em 48 h entre 7 e 9 de março (Brandão, 1997).

Em 03/04/1924 fortes chuvas (172 mm) provocaram o transbordamento do canal do Mangue, inundação em vários bairros, incluindo a Praça da Bandeira, e desabamentos de barracos, com vítimas, no Morro de São Carlos (Brandão, 1997).

De acordo com Brandão (1997), em 26/02/1928 novamente as chuvas alagaram a região da Praça da Bandeira, havendo também desabamento nos Morros de São Carlos, Salgueiro, Mangueira e Santo Antônio, causando a perda de diversas vidas. Em 09/02/1938 os pluviômetros mediram 136 mm em 24 horas, com isso mais uma vez

houve alagamento na região da Praça da Bandeira havendo ainda desabamento de alguns prédios com vítimas fatais.

Em 29/01/1940 as chuvas intensas (Figura 4.1), causaram mortes por desabamentos no bairro de Santo Cristo e alagamentos em quase toda a cidade (Brandão, 1997). Na estação Bangu do INMET foi registrado 112,4 mm em 24 horas.



Figura 4.1 – Fotos da tempestade de 29/01/1940 na Praça da Bandeira. Fonte: O Globo em www.g1.globo.com.

Nos dias 6 e 7 de janeiro de 1942 as chuvas fortes (132 mm) causaram desabamentos no morro do Salgueiro, ocasionando 5 mortes (Brandão, 1997). Na estação Bangu foi registrado no dia 07/01 86,2 mm. Algumas fotos desse evento são apresentadas na Figura 4.2.

(a)



(b)



Figura 4.2 – Fotos da tempestade do início de janeiro de 1942 na Praça da Bandeira.

Fontes: a, b e c: Costa e Teuber (2001) e d:
<http://aleosp2008.files.wordpress.com/2008/11/1942.jpg>.

(c)



(d)



Figura 4.2 – Final.

Segundo Brandão (1997), em 17/01/1944 houve mais uma enchente na Praça da Bandeira, com o transbordamento do canal do mangue além de inundações no Catete e Botafogo, totalizando-se 172 mm de chuva em 24 horas.

Em 06/12/1950 e durante o mês de março de 1959 ocorreram alagamentos na Praça da Bandeira (Brandão, 1997). A estação do INMET em Bangu registrou 40,0 mm em 06/12/1950 e 147,2 mm no dia 10/03/1959.

Marques et al. (2001) analisaram temporais intensos no Município do Rio de Janeiro no período de 1960 a 1996, descrevendo em detalhes alguns dos maiores eventos ocorridos no período. Os autores procuram associar os mecanismos atmosféricos de grande escala e de mesoescala a eles associados. Dados das estações do Galeão, Nilópolis, São Bento, além das estações do INMET, LIGHT, DNAEE e SERLA foram utilizados para descrever minuciosamente o evento de 1988. Os autores realizaram também uma extensa revisão da literatura sobre fenômenos de chuvas intensas históricas.

De acordo com Marques et al. (2001), em 15/01/1962 iniciou-se um evento chuvoso que se estendeu até o dia 23/01/1962, tendo sido estudado por Strang (1962), apud Marques et al. (2001). Tal evento teve seu período crítico entre os dias 16 e 18. Houve registro de precipitação média para o mês de janeiro de 458,8 mm, bem acima da climatologia do período que era de 156,6 mm. Tal evento foi causado por um sistema frontal conjugado a uma massa de ar tropical úmida que associada a efeito de topografia, instabilidade e convergência deflagraram as chuvas. Ainda neste mesmo evento (16 e 18), segundo Jones (1973), observou-se fortes tormentas com intensa atividade elétrica com um acumulado de cerca de 250 mm em 3h30min, com intensidade média de 100 mm/h. No dia 15/01/1962 o total pluviométrico atingiu 242 mm, deflagrando inundações que deixaram 25 mortos, centenas de desabrigados, transbordamento do Canal do Mangue e do Rio Maracanã e deslizamentos em vários pontos da cidade (Brandão, 1997). Na estação Rio de Janeiro do INMET no dia 16/01/1962 observou-se o segundo maior total pluviométrico diário de toda série histórica, atingindo 167,4 mm. Nesta estação meteorológica o maior valor de toda série, que se estende de 02/01/1961 até 31/12/2010, ocorreu durante o evento de abril de 2010 (dia 06/04/2010 - 178,5 mm).

Em janeiro de 1966 ocorreu outro temporal histórico no Rio de Janeiro. Enchentes e deslizamentos deixaram 250 mortos e 50 mil desabrigados (Figuras 4.3 e 4.4). Serra (1970) afirma que tal tempestade ocorrida entre os dias 11 e 12 de janeiro de 1966, com acúmulo de 245 mm de chuva em 24 horas foi causada pela chegada de uma frente fria na cidade. Choveu forte por diversos dias seguidos o que causou colapso no sistema de transporte e na distribuição de energia elétrica na cidade. Na época, uma epidemia de leptospirose infectou mais de 70 pessoas.



Figura 4.3 – Fotos da tempestade de 11/01/1966 no Rio de Janeiro. Fonte: Acervo do Jornal O Globo, publicado em 12/01/1966.



Figura 4.4 – Capa do Jornal A Última Hora de 12/01/1966, com destaque para as chuvas do Rio de Janeiro. Fonte: <http://aleosp2008.files.wordpress.com/2008/11/1966c.jpg>.

No dia 20/01/1967 um temporal acarretou deslizamentos em Laranjeiras, com soterramento de uma casa e dois edifícios entre as ruas Belizário Távora e General Glicério (Figura 4.5), deixando 200 mortos e 300 feridos (defesacivil.rj.org.br). Em todo o Estado do Rio de Janeiro houve um total de 300 mortos e 25000 feridos. Na estação Bangu do INMET a chuva atingiu 124,8 mm em 20/01/1967.



Figura 4.5 – Foto do desabamento na Rua General Glicério em 20/01/1967 (Fonte: <http://www.rioquepassou.com.br/2010/01/02/rua-gal-glicerio-janeiro-de-1967/>).

Em 19 e 20/02/1967 outro temporal causado por sistema frontal atingiu a cidade tendo sido estudado por Serra (1970). O autor ressalta a importância da extinta rede de balões piloto. De acordo com Brandão (1997) em apenas 1 dia de fevereiro foram registrados 160 mm de precipitação. Na estação Santa Cruz do INMET destaca-se o maior total pluviométrico diário de toda a série de dados (01/10/1963 a 31/12/2009) no dia 20/02/1967, com 180,6 mm. Em Bangu (INMET), neste mesmo dia, o total foi de 124,8 mm.

A Empresa Engenharia Gallioti Ltda elaborou para o Departamento Nacional de Obras e Saneamento (DNOS) em 1975 um projeto de estudo das obras de proteção

contra enchentes na Bacia do Rio Iguaçu, que apresentou, entre outros, um estudo sobre as chuvas ocorridas entre os dias 13 e 14 de janeiro e 25 e 26 de fevereiro de 1971 na Baixada da Guanabara. Em ambos os casos houve a passagem de sistemas frontais sobre a região. O pluviômetro da Penha registrou 290 mm em 24 horas no dia 26 de fevereiro de 1971 (DNOS, 1975). A estação de Bangu do INMET registrou 243,0 mm de chuva em 24 horas nesse mesmo dia (26/02/1971), sendo este o maior total pluviométrico nesta localidade, desde janeiro de 1930 até dezembro de 1998. A Figura 4.6 apresenta uma página da revista VEJA com reportagem sobre os estragos da chuva de 26/02/1971.



Figura 4.6 – Morte num ônibus tombado no rio Faria-Timbó e nas calçadas dos subúrbios. Em Caxias arquipélagos de telhados criados por um dia de chuva. Fonte: Revista VEJA.

Em 1º de Maio de 1976 (Figura 4.7) novamente enchentes atingiram a Cidade prejudicando a circulação viária (CBMERJ , 2012).



Figura 4.7 – Rua do Lavradio em 1976. Fonte: O Globo em www.g1.globo.com

Em 08/12/1981 uma forte tempestade produziu em um só dia 15% do total médio anual, com deslizamentos em toda a Cidade e transbordamentos de rios em Jacarepaguá (Brandão, 1997).

Em 03/12/1982, uma inundação deixou 6 mortos e causou deslizamentos no Morro Pau da Bandeira, inundando várias ruas com o transbordamento do Rio Faria-Timbó (defesacivil.rj.org.br).

Em 1983 ocorreram outras duas inundações. A primeira em 20/03/1983, provocou o desabamento de casas e a morte de 5 pessoas em Santa Teresa, onde a chuva atingiu 189 mm (defesacivil.rj.org.br). A segunda, em 24/10/1983 deixou 13 mortos, pois o forte temporal ocasionou deslizamento de terra no Morro do Pavãozinho (defesacivil.rj.org.br). Houve desabamentos também em Santa Tereza e em Jacarepaguá (Brandão, 1997)

Em 03/03/1985, as enchentes provocaram 23 mortes e 200 desabrigados e em 12/04/1985 registrou-se 144 mm em 24 horas em Jacarepaguá, provocando o transbordamento de rios e canais e a morte de 2 pessoas. Em consequência das enchentes foram registrados 119 casos de leptospirose, com 31 óbitos (Brandão, 1997).

Entre os dias 6 e 7/03/1986 totalizaram-se 121 mm de chuva no Rio de Janeiro, o que provocou desabamento de barracos e a morte de 12 pessoas nos morros do Salgueiro, Estácio, Catumbi e Rio Comprido. Neste mesmo ano (1986) em 29 de

dezembro um temporal de 3 horas acumulou 64 mm e fez transbordar o Rio Maracanã e o desabamento de barracos, com vítimas fatais. Foram registrados 91 casos de leptospirose, com 26 mortos (Brandão, 1997).

Em 26/02/1987 fortes chuvas atingiram Petrópolis, Teresópolis e o Rio de Janeiro totalizando 292 mortos e 20.000 desabrigados. Em razão destas chuvas que registraram 171 vítimas fatais em Petrópolis e 94 no município do Rio de Janeiro foi decretado no Rio de Janeiro, Estado de Emergência e com o agravamento da situação no dia 22, Estado de Calamidade Pública (CBMERJ, 2012).

Em 1988, houve sucessivos episódios de chuvas no decorrer do mês de fevereiro, culminando em um alto número de vítimas. O período crítico deste longo evento se deu entre os dias 1º e 5º daquele mês, destacando-se o dia 03/02 quando a estação do INMET em Bangu registrou 184 mm em 24 horas. Porém além deste período (01 a 05/02/1988) ressaltam-se também outros dois de chuvas fortes: entre 10 e 13 e entre 19 e 22 de fevereiro (Lemos e Calbet, 1996). Segundo a Geo-Rio, entre os dias 18 e 21 houve um máximo de 171 mm em 24 horas. O fato de ter ocorrido tantos eventos extremos fez com que o número de vítimas fosse bastante alto e a anomalia de precipitação para aquele mês também fosse bem elevada, conforme citado em Silva et al. (2010). Em 12/02/1988 houve deslizamento no Morro Dona Marta, deixando 6 mortos, 40 feridos e 300 desabrigados. Uma tela usada em uma obra de contenção de encosta rompeu-se sob o peso do lixo e da lama, acumulados durante uma semana de fortes chuvas. A enxurrada destruiu cerca de 30 barracos (defesacivil.rj.org.br). Particularmente no dia 18/02/1988 um temporal de meia hora alagou vias importantes do Rio, como a Avenida Brasil, e provocou deslizamentos em morros. No bairro de Santa Teresa, a clínica para idosos Santa Genoveva foi parcialmente soterrada: 18 pessoas morreram (defesacivil.rj.org.br). Como consequências, centenas de acidentes geológicos ocorreram nas encostas cariocas e 58 vítimas fatais foram contabilizadas. Dentre os acidentes mais graves com vítimas fatais, destacaram-se as ocorrências no Morro da Formiga no bairro da Tijuca, no Morro Santa Marta, em Botafogo e em Santa Tereza. No Estado, as chuvas de fevereiro mataram cerca de 300 pessoas. No total do evento, entre os dias 18 e 21 de fevereiro houve um total de 430 mm de chuva. Imagens das chuvas de 1988 são mostradas na Figura 4.8.

(a)

(b)



Figura 4.8 – Alagamentos causados pela chuva de fevereiro de 1988. Fonte: a) g1.globo.com. b) www.terra.com.br

Em 18/04/1990 uma tempestade no Rio de Janeiro provocou chuvas de 165 mm em 24 horas e posteriormente em 7/05/1990 outra tempestade ocasionou chuvas que chegaram a 103 mm em 24 horas, provocando estragos e mortes na Glória e no Maracanã (Lemos e Calbet, 1996).

Em 17/01/1991 houve uma enchente que deixou 25 mortos e 8 feridos (defesacivil.rj.org.br). Araújo et al. (1994), estudaram tal evento, constatando um bloqueio de Frente Fria no oceano Atlântico próximo à Região Sudeste do Brasil acompanhada de uma acentuada atividade convectiva.

Em janeiro de 1992 dois episódios de chuvas intensas, foram estudados por Marques et al. (2001). O primeiro no dia 5/01/1992, o segundo entre os dias 17 e 18/01/1992 onde os valores chegaram a 200 mm em 24 h na Região da Serra do Mar. No evento de 05/01/1992 a estação do INMET em Bangu registrou 135 mm em 24 horas.

Araújo et al. (1996) documentaram as chuvas ocorridas entre 13 e 15 de fevereiro de 1996. A precipitação no período, registrada no aeroporto de Jacarepaguá foi de 301,4 mm quando a média mensal climatológica era de 476,4 mm e registros de precipitações superiores a 190 mm em 7 horas foram observados nos bairros do Alto da Boa Vista e do Jardim Botânico. Corridas de massa - que constituem o tipo de escorregamento com maior potencial destrutivo (Chorley et al., 1984) – ocorreram em vários trechos dos maciços montanhosos da Tijuca e da Pedra Branca, destruindo

centenas de moradias e ceifando a vida de 52 pessoas. Segundo Araujo et al. (1996) as chuvas foram causadas pela lenta passagem de um SF pela região associada a efeitos de relevo. No total, as chuvas de fevereiro de 1996 provocaram uma série de desabamentos que deixaram 55 mortos na capital e quatro no interior, além de 2.500 desabrigados. Na estação de Bangu do INMET o total pluviométrico em 14/02/1996 foi de 151,6 mm.

Na Tabela 4.2 estão reunidos os maiores totais pluviométricos diários para cada evento ocorrido entre o início do século XX até o ano de 1996, com total de 21 eventos.

Tabela 4.2 – Sumário dos maiores totais pluviométricos diários registrados durante 21 eventos de chuvas intensas, no período de 1900 até 1996.

Data	Total Pluviométrico diário (mm)	Data	Total Pluviométrico diário (mm)
17/03/1906	165	20/02/1967	180,6
23/03/1911	150	26/02/1971	290
03/04/1924	172	20/03/1983	189
09/02/1928	136	12/04/1985	144
29/01/1940	112,4	07/03/1986	121
07/01/1942	132	03/02/1988	184
17/01/1944	172	18/04/1990	165
10/03/1959	147,2	07/05/1990	103
15/01/1962	242	05/01/1992	135
12/01/1966	245	14/02/1996	151,6
20/01/1967	124,8		

A partir de 1997, através dos dados da rede pluviométrica da Geo-Rio, foi possível identificar os principais eventos de chuvas intensas na cidade. Em Dereczynski et al. (2009) foram listados os quinze eventos de precipitação mais intensos ocorridos na cidade no período de janeiro de 1997 a dezembro de 2006. Seus resultados indicam que os totais pluviométricos diários variaram de 93,0 mm no evento de 26/11/2005 até 272,8 mm no dia 09/01/1998 e os sistemas frontais foram os principais responsáveis pelas chuvas intensas. Os casos com total pluviométrico diário superior a 100 mm (13 casos) estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4. 3 – Seleção dos treze eventos de precipitação mais intensos ocorridos no município do Rio de Janeiro no período de janeiro de 1997 a dezembro de 2006, considerando-se os casos com totais pluviométricos diários superiores a 100 mm (Fonte: Adaptado de Dereczynski et al., 2009).

Data	Precipitação Média no Município	Número de estações com chuva intensa	Maior Total Pluviométrico diário (mm) - Localidade	Fenômeno meteorológico
08 e 09/01/98	144,5	30	272,8 - Tijuca	Aproximação e passagem de SF, promovendo formação de diversos SCMs desde o dia 06 até o dia 10/01/98.
24/12/01	125,6	29	252,8 - Sumaré	Passagem de SF, com formação de SCMs.
18/03/03	109,9	30	186,6 - Sepetiba	Passagem de SF, com formação de alguns SCMs.
12/02/98	97,8	30	263,6 - Tijuca	Passagem de SF, com formação de alguns SCMs. A partir do evento, ZCAS ficou configurada até dia 16/02/98.
02 e 03/01/00	72,7	28	180,9 - Guaratiba	ZCAS configurada de 01 a 08/01/00
24/05/06	69,0	26	199,0 - Sumaré	Passagem de SF, aparentemente sem ocorrência de SCMs na região
28/01/06	68,8	28	113,8 - Saúde	ZCAS configurada entre 27/01 e 02/02/06
17/02/00	67,1	29	132,9 - Riocentro	Passagem de SF, com formação de alguns SCMs.
25/01/03	64,4	19	235,4 - Copacabana	Passagem de SF, com formação de alguns SCMs. Após o evento ZCAS configurada até dia 01/02/03.
12/10/03	62,8	29	137,2 - Sumaré	Passagem de SF
18/04/06	61,8	27	256,8 - Sumaré	Passagem de SF
07/04/03	58,6	22	101,4 – Rio Centro	Passagem de SF
19/03/00	52,0	17	269,4 – Campo Grande	Passagem de SF, com formação de alguns SCMs.

No período de janeiro de 2007 até dezembro de 2011, ocorreram alguns eventos de chuvas intensas, incluindo o caso em estudo. No sítio do Alerta Rio (<http://www0.rio.rj.gov.br/alertario/>) estão listados os dez maiores totais pluviométricos em 24 horas. A metade deles estão associados ao evento de abr/2010. Aparecem

também nesta tabela o evento de 26/04/2011 e os eventos de 09/01/1998, 19/03/2000 e 12/02/1998, estes três últimos já citados no trabalho de Dereczynski et al. (2009).

De acordo com o CPTEC/INPE o evento de 26/04/2011 foi provocado pela chegada de um sistema frontal que se deslocou pelo oceano, atingindo o Rio de Janeiro no dia 24/04 e associado a um cavado em níveis médios, provocou fortes chuvas no litoral do Estado. Na capital um forte temporal na tarde do dia 24 provocou muitos transtornos a população e prosseguindo, a convergência de umidade gerada pela chegada de ar úmido oceânico manteve a instabilidade no Rio de Janeiro nos dias 25 e 26/04. Neste evento o total pluviométrico acumulado entre 12:15 Z do dia 25/04/2011 até 12:00 Z do dia 26/04/2011 foi de 276,0 mm na estação Tijuca/Muda.

3.3 Síntese

A partir do levantamento anterior de eventos de chuvas históricas registradas no Rio de Janeiro, fica claro que ocorrências de deslizamentos, enchentes, perdas de vidas, destruições e uma série de transtornos são bastante antigos e não raros na cidade. Ao mesmo tempo em que atualmente existem tecnologias mais modernas e sofisticadas para monitorar e prever eventos de chuvas intensas, os riscos aumentam, a medida que a população cresce e ocupa áreas de risco, que não eram habitadas no passado.

A Figura 4. 9 apresenta a precipitação dos eventos citados anteriormente, para os quais se conhece a data exata e o total pluviométrico acumulado em 24 horas (total de 37 eventos): 1 evento apresentado na Tabela 4.1; 21 eventos contidos na Tabela 4.2; 13 eventos da Tabela 4.3, o evento estudado neste trabalho (06/04/2010) e finalmente o evento ocorrido em 26/04/2011, totalizando-se 37 casos.

Ressalta-se que tanto a frequência de ocorrência dos eventos quanto sua distribuição temporal devem ser analisadas com cautela, pois tal levantamento de dados está baseado estritamente na reduzida bibliografia consultada. Nenhum tipo de teste estatístico ou critério de seleção de eventos extremos foi aplicado neste trabalho às series de totais pluviométricos diários. Desta forma, apesar do gráfico da Figura 4.9 mostrar uma maior frequência de ocorrência de eventos extremos nas últimas décadas em relação ao início do século XX, não se pode afirmar que está havendo tendência de aumento na frequência de tais eventos. Este levantamento de casos é preliminar e além

disso os poucos trabalhos consultados apresentam diferentes metodologias para classificar um evento como extremo.

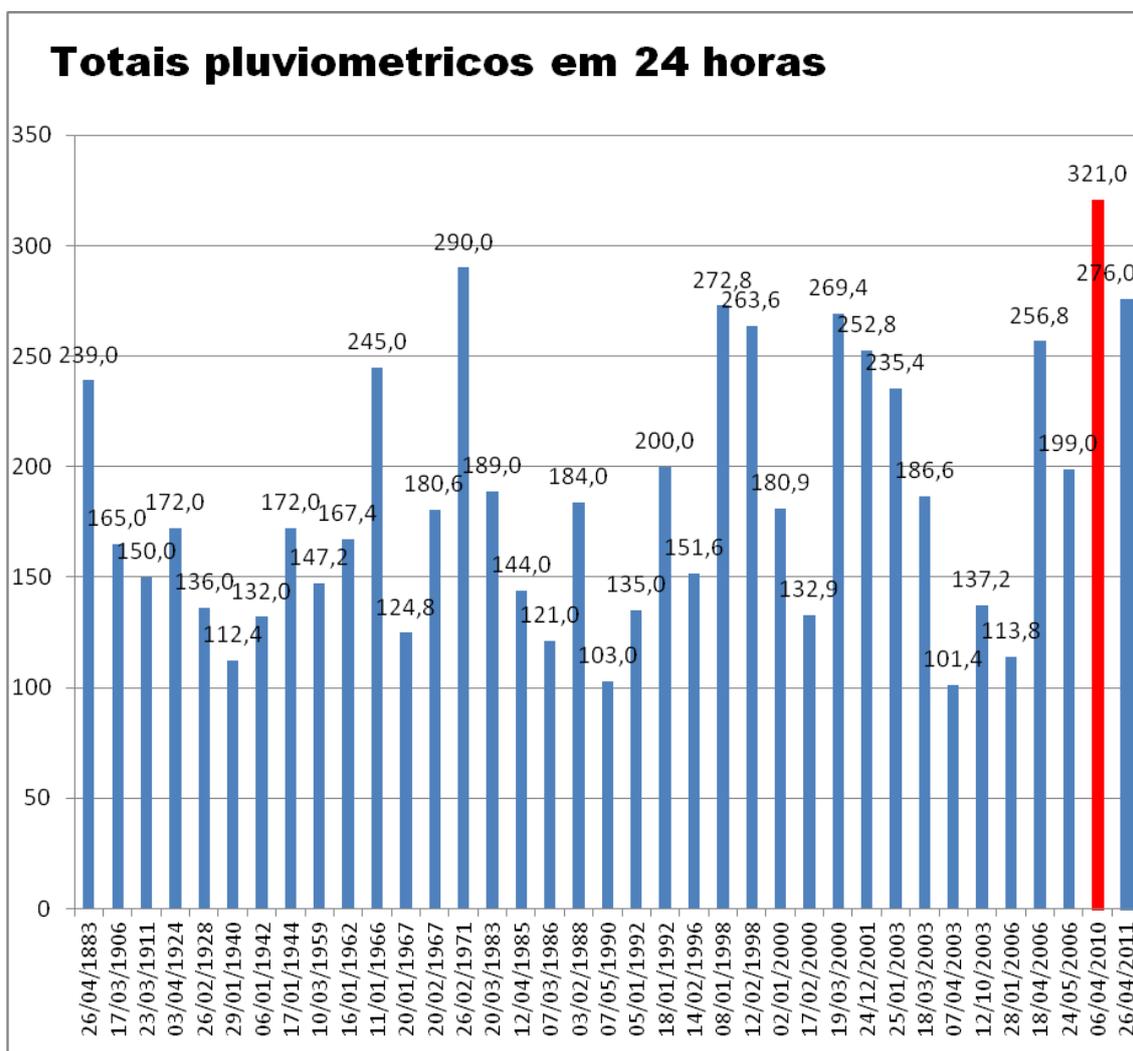


Figura 4.9 – Totais pluviométricos diários (mm) registrados em 36 eventos de chuvas intensas, em comparação ao evento de abril de 2010 (em vermelho).

A análise da Figura 4.9 destaca o evento de 6 de abril de 2010 como um caso recorde de chuvas intensas. Neste evento, a chuva acumulada entre 12:15 Z do dia 05/04 e 12 Z do dia 06/04 atingiu 321,0 mm, como será apresentado no capítulo 5. Os máximos em 24 horas consecutivas (acumulados em distintos períodos durante o evento), conforme apresentados no sítio do Alerta Rio (<http://www0.rio.rj.gov.br/alertario/>) também foram extremamente elevados em várias estações, como por exemplo: 304,6 mm na Rocinha; 303,0 mm no Jardim Botânico; 280,2 mm na Tijuca; 264,6 mm no Vidigal e 257,8 mm no Grande Méier.

Apesar de destacarmos aqui o evento de abril de 2010 como o mais extremo desde o início das medições instrumentais, é importante levar em conta que a rede pluviométrica na cidade do Rio de Janeiro no passado não era tão densa como a atual. Desta forma, por exemplo, eventos como o ocorrido em 26/02/1971, podem ter atingido valores mais elevados do que os registrados na Zona Norte da cidade (290,0 mm na Penha) e na Zona Oeste (243,0 mm em Bangu). Caso, na época do evento de 26/02/1971, a rede de pluviômetros fosse mais densa e cobrisse áreas como o Maciço da Tijuca, onde as chuvas em geral são mais intensas do que nas demais localidades do município, (Dereczynski et al., 2009), valores maiores poderiam ter sido registrados.

Analisando-se a época de ocorrência dos 37 eventos (Figura 4.10), nota-se que a maior parte dos casos (32%) ocorreram em janeiro (12 casos). Contudo, os meses de fevereiro, março e abril, apresentam a mesma frequência de ocorrência (7 eventos em cada um dos meses), totalizando-se 89% dos eventos no período de janeiro a abril. Os 11% restantes ocorreram em maio (2 eventos), outubro (1 evento) e dezembro (1 evento). Duas observações importantes devem ser destacadas da análise da Figura 4.10: A primeira é a grande diferença na frequência de ocorrência de eventos extremos em dezembro (1 caso) em relação à janeiro (12 casos) e a segunda é a elevada frequência de ocorrência de eventos extremos em abril. A climatologia para o mês de abril sobre a Região Sudeste do Brasil indica condições típicas de outono, com redução da atividade convectiva, redução nas temperaturas continentais e aumento da pressão atmosférica sobre o continente. Isto mostra que a cautela popular relativa às “águas de março” deveriam ser estendidas também para o mês de abril.

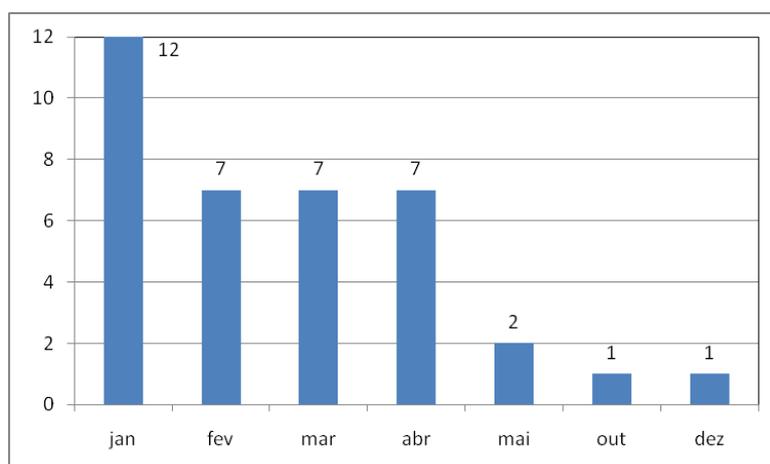


Figura 4.10 – Frequência de ocorrência dos 37 eventos de chuvas intensas ao longo do ano.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE DO EVENTO DE CHUVAS INTENSAS DE ABRIL DE 2010

Neste capítulo elabora-se uma análise das condições sinóticas associadas ao evento de chuvas intensas ocorrido no Rio de Janeiro em 6 de abril de 2010, e também é feita uma breve avaliação das previsões do Modelo Eta do CPTEC/INPE para o caso em estudo.

5.1 Apresentação do Evento

No final da tarde do dia 5 de abril de 2010 a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) foi atingida por uma tempestade que provocou chuvas inicialmente moderadas, passando a fortes e a seguir muito intensas, acompanhadas por ventos fortes, que atingiram 75 km/h no Forte de Copacabana. Na noite do dia 5 as principais avenidas da cidade (Avenida Brasil, Linha Vermelha, Aterro do Flamengo) já estavam alagadas e o trânsito ficou completamente paralisado. No dia 06/04 a RMRJ amanheceu completamente paralisada, com vários pontos de deslizamentos e inundações, árvores caídas e problemas de transmissão na rede elétrica (Figura 5.1). De acordo com a Defesa Civil, apenas no município do Rio de Janeiro ocorreram 43 mortes, 544 desabrigados e 1410 desalojados.

Uma forte ressaca atingiu o litoral do Rio de Janeiro e de Niterói após a passagem do sistema (Figura 5.2). Houve ressaca desde o litoral de Santa Catarina até a cidade de Cabo Frio. No Rio de Janeiro, as ondas chegaram a 5 m de altura em Copacabana, segundo a Marinha. Diversas ruas tanto no Município do Rio de Janeiro quanto em Niterói foram atingidas pelas águas; o Aterro do Flamengo passou parte do dia 09/04/2010 em meia pista devido ao fenômeno enquanto que na Avenida Atlântica, a pista junto à orla teve que ser interditada. A operação das barcas que faziam o trajeto Rio – Niterói teve que ser interrompido.

(a)



(b)



(c)



(d)



Figura 5.1 – Fotos da destruição provocada pelas chuvas na cidade do Rio de Janeiro nos dias 06 a 07 de abril de 2010. (a) Carros alagados na Praça da Bandeira; (b) Carros foram arrastados pela correnteza na praça da Bandeira; (c) Rua totalmente alagada em Icaraí, Niterói; (d) Morador tenta limpar a sujeira deixada pela chuva em São Francisco, Niterói; (e) Lagoa Rodrigo de Freitas; (f) Deslizamento de terra em São Conrado; (g) Rua Francisco Bicalho, no centro do Rio, completamente tomada pelas águas da chuva e (h) Uma pedra deslizou da encosta e bloqueou completamente a circulação na Avenida Menezes Cortes. Fonte: oglobo.globo.com

(e)



(f)



(g)



(h)



Figura 5.1 – Final

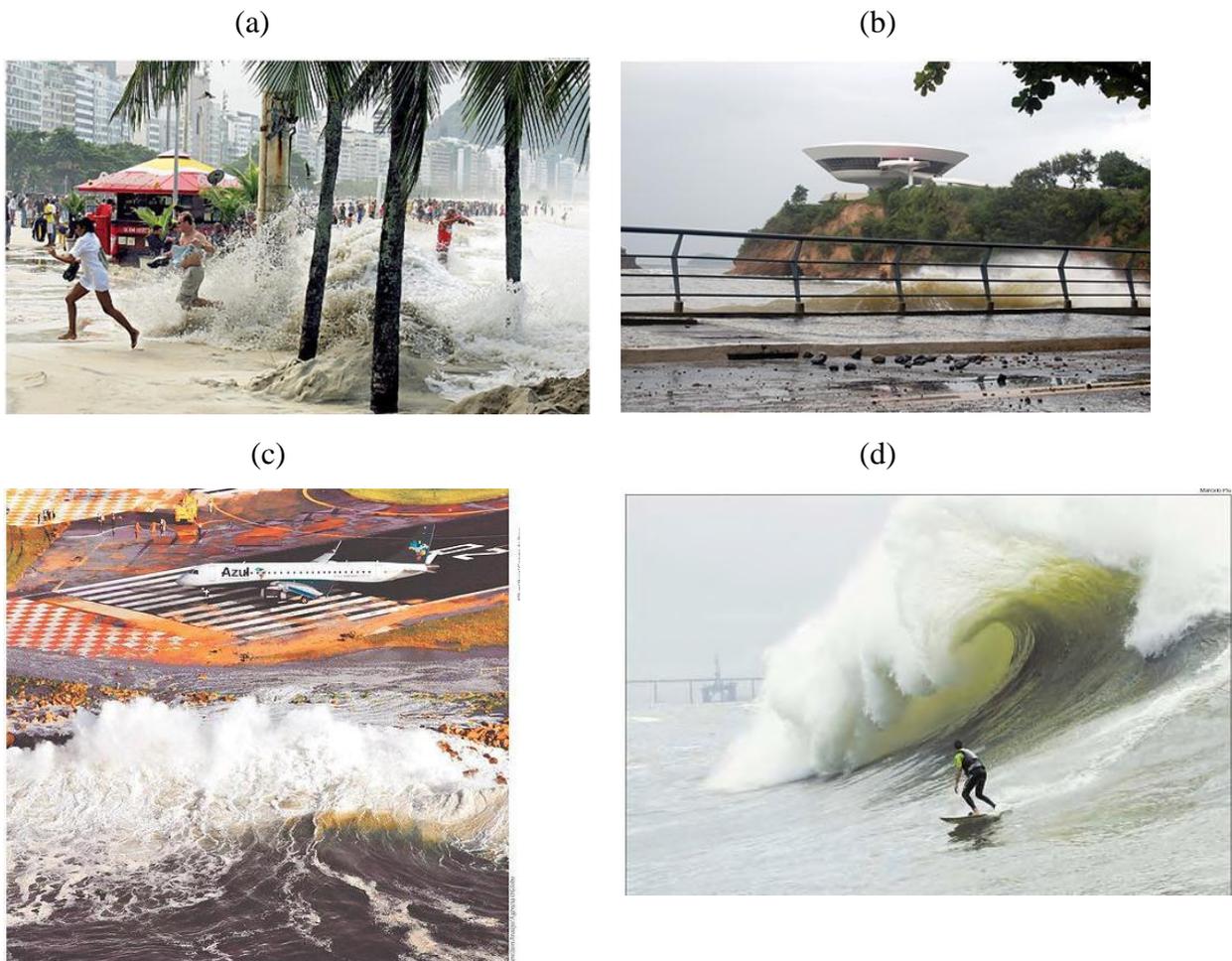


Figura 5.2 – Fotos da ressaca após a passagem da frente em 09/04/2010. (a) pessoas que tiravam fotos do evento correm das águas que ultrapassaram a faixa de areia e atingiram a calçada e a rua na Avenida Atlântica. (b) As ondas atingiram o muro que separa a faixa de areia e a calçada em Icaraí – Niterói. (c) Ondas atingem a área do Aeroporto Santos Dummont e espalham areia na pista. (d) Com a ponte Rio-Niterói ao fundo surfista aproveita as ondas na Baía de Guanabara. Fonte: oglobo.globo.com.

No dia 7 de abril as 22 h um deslizamento em Niterói, no Morro do Bumba, provocou a morte de 50 pessoas. A região que estava sendo ocupada pela favela já havia sido um depósito de lixo (lixão) que funcionou por 15 anos até ser desativado em 1981. Após o encerramento das atividades do lixão, foram se acumulando resíduos de terra sobre o montante e assim foram sendo construídas habitações. No evento do deslizamento, cerca de 40 casas ficaram soterradas (Figura 5.3).



Figura 5.3 – Fotos do Morro do Bumba em Niterói durante o evento de chuvas intensas nos dias 6 e 7 de abril de 2010. (a) Vista aérea do Morro do Bumba após o grande deslizamento de terra; (b) Rastro de lama deixado pela terra no Morro do Bumba; (c) Montanha de lama e terra que deslizou do Morro do Bumba, embaixo dessa lama havia várias residências soterradas; (d) Equipes de resgate tentam encontrar sobreviventes sob a terra no Morro do Bumba. Fonte: veja.abril.com.br

Ao final do mês de Abril de 2010, a Defesa Civil do Estado do Rio de Janeiro contabilizou na RMRJ, 46.166 desalojados, 12.570 desabrigados, 84 mortos, 6.042.825 pessoas afetadas, 2.553 residências danificadas e 510 residências destruídas. A região do Morro do Bumba, que antes era o centro da rotina de cerca de 150 famílias, somou 50 mortos e se tornou uma grande área de lixo, terra, escombros, esgoto e silêncio. A Tabela 5.1 apresenta um resumo dos valores apresentados pela Defesa Civil para o período do evento.

O prefeito da Cidade do Rio de Janeiro declarou que as obras para reparar os danos causados à cidade custariam 370 milhões de reais (entre reconstruções, reparações, indenizações, etc), enquanto que o prefeito de Niterói orçou os danos à sua cidade entre 15 e 20 milhões de reais. As secretarias de Obras e do Ambiente do Estado do Rio de Janeiro concluíram a recuperação e contenção nos morros do Céu e do Bumba, em março de 2011. As reparações custaram R\$ 35 milhões (www.folha.com).

Tabela 5.1 – Dados da Defesa civil sobre prejuízos com o evento para a RMRJ.

Local	Desalojados	Desabrigados	Mortos	Afetados	Residências Danificadas	Residências Destruídas
Duque de Caxias	500	808	0	6.128	1.000	100
Itaboraí	397	1.182	-	1.697	253	-
Magé	34	0	1	0	12	-
Mangaratiba	60	-	-	20.000	6	-
Niterói	1.069	1.272	40	3.000	827	312
Rio de Janeiro	1.410	544	43	6.000.000	347	92
São Gonçalo	42.576	8.718	-	-	95	-
Tanguá	120	46	-	12.000	13	6
Total	46166	12570	84	6042825	2553	510

5.2 Análise do Evento

A análise das condições sinóticas do período permite revelar importantes características que favoreceram a ocorrência do distúrbio. Na Figura 5.4 verifica-se através de imagens de satélites no canal infravermelho (IR) que uma frente fria iniciou seu deslocamento pelo Estado do Rio de Janeiro em 04/04 – 12Z, causando apenas aumento de nebulosidade e chuva leve no município do Rio de Janeiro. Essa frente fria estava posicionada entre o Norte do Rio Grande do Sul e o Sul de Santa Catarina no dia 04 às 00Z e deslocou-se rapidamente para a Região Sudeste, atingindo o Estado do Rio de Janeiro no dia 05 de abril às 00Z. De acordo com as observações do METAR dos aeródromos da região (Tabela 5.2) nota-se que já na manhã do dia 05 as condições de tempo passaram a ser influenciadas por esse sistema frontal (SF), sendo observada chuva leve e céu encoberto. Quando a maior parte da nebulosidade associada ao sistema frontal já se encontrava sobre o Espírito Santo (dia 05/04 – 18 Z), sistemas convectivos de mesoescala começaram a se formar sobre o Rio de Janeiro, produzindo a seguir

chuvas fortes que totalizaram 321,0 mm entre 05/04 – 12 Z e 06/04 – 12 Z na estação do Sumaré.

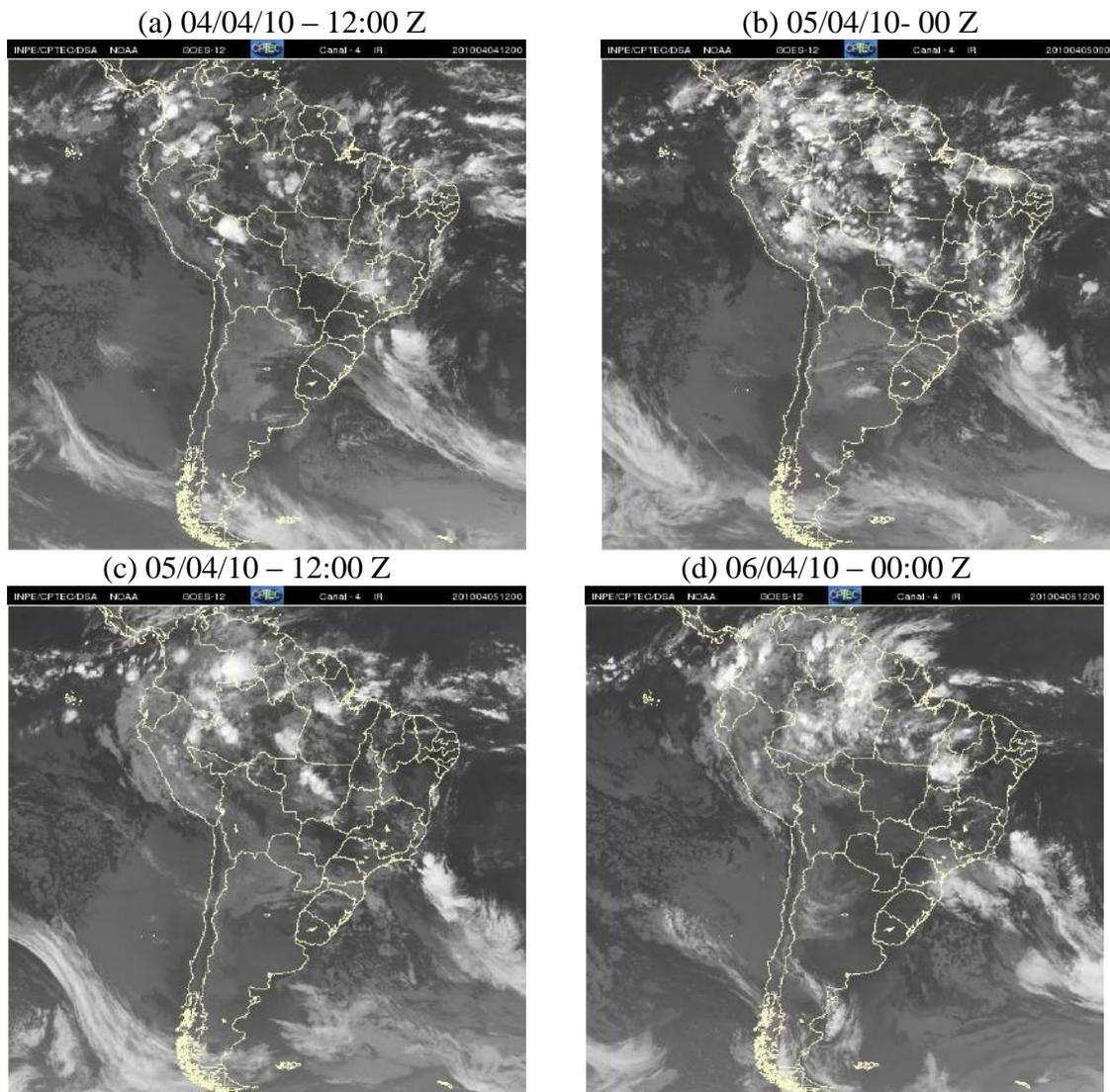


Figura 5.4 - Imagens de Satélite do evento no canal IR. (a) 04/04/10 - 12Z; (b) 05/04/10 - 00Z; (c) 05/04/10 - 12Z; (d) 06/04/10 - 00:00Z; (e) 06/04/10 - 12Z e (f) 07/04/10 - 00Z.

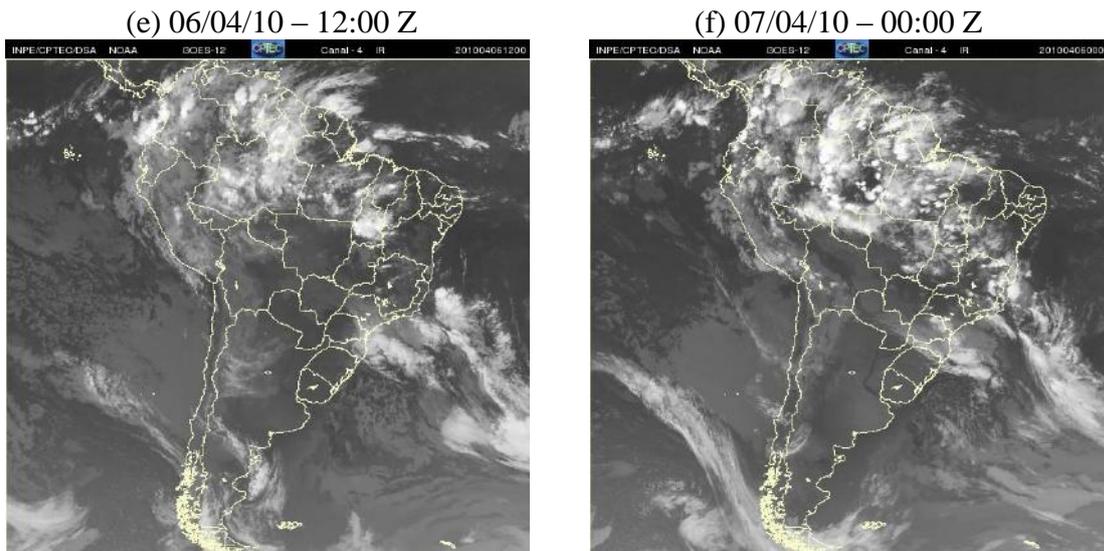


Figura 5.4 - Final

Tabela 5.2 – Informações extraídas do METAR das estações do Galeão (SBGL) e Santos Dumont (SBRJ) do período entre a noite de 04/04/2010 e a manhã de 06/04/2010. (Fonte: www.redemet.aer.mil.br). Em retângulos vermelhos estão ressaltados os relatos de tempo severo.

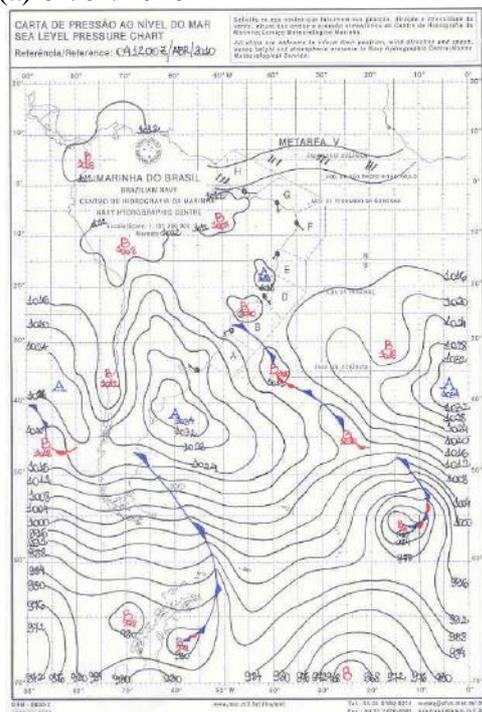
Data	Hora	Santos Dummont				
		ventos	tempo presente	Nebulosidade	temperatura	pressão
04/04/2010	00Z	32001KT	CAVOK		27	1013
04/04/2010	12Z	33004KT	CAVOK		28	1012
04/04/2010	18Z	00000KT		FEW030 SCT050 BKN090	30	1009
05/04/2010	00Z	34005KT	-RA	BKN015 OVC080	25	1012
05/04/2010	12Z	04040KT		FEW008 SCT020 BKN070	26	1013
05/04/2010	2120Z	17016KT	+TSRA BR	BKN004 BKN008 FEW025CB OVC070	24	1010
05/04/2010	2235Z	13010KT	+TSRA BR	BKN004 BKN008 FEW025CB OVC070	25	1011
05/04/2010	18Z	19006KT		SCT015 SCT070	28	1010
06/04/2010	00Z	21011G23KT	RA BR	BKN004 BKN008 OVC070	25	1012
06/04/2010	0148Z	17011KT	+RA BR	BKN008 SCT015 OVC070	24	1012
06/04/2010	12Z	20012KT	RA BR	BKN002 BKN008 OVC070	23	1012
06/04/2010	18Z	201007KT	-RA BR	SCT004 BKN006 OVC070	22	1010
06/04/2010	1845Z	21010G30KT	+RA BR	BKN004 BKN007 OVC070	21	1011
07/04/2010	00Z	29010KT		BKN010 OVC070	21	1012
07/04/2010	0040Z	27004KT	-RA BR	BKN010 OVC070	20	1012

Tabela 5.2 – Final

Data	Hora	Galeão				
		ventos	tempo presente	Nebulosidade	temperatura	pressão
04/04/2010	00Z	12005KT		FEW020 BKN100	26	1013
04/04/2010	06Z	15003KT		FEW012 BKN100	25	1011
04/04/2010	12Z	10003KT		FEW020 BKN090	28	1012
04/04/2010	18Z	15003KT		FEW020 BKN090	29	1009
04/04/2010	1842Z	34005KT	TS	FEW020 FEW025CB BKN080	29	1010
05/04/2010	00Z	34007KT	-RA	BKN009 OVC080	24	1013
05/04/2010	06Z	34003KT		FEW006 SCT015 BKN080	24	1011
05/04/2010	12Z	26006KT		BKN015 BKN050	27	1013
05/04/2010	18Z	25010KT		SCT020 BKN070	28	1010
06/04/2010	00Z	26004KT	-RA	BKN005 OVC010	23	1013
06/04/2010	0020Z	31009KT	+RA BR	BKN004 OVC010	23	1013
06/04/2010	06Z	31003KT	-RA BR	SCT004 BKN008 OVC070	23	1011
06/04/2010	12Z	30011KT	-RA BR	BKN010 OVC030	23	1012
06/04/2010	18Z	24008KT	-RA	SCT006 BKN010 OVC050	22	1010
07/04/2010	00Z	31005KT		SCT008 BKN012 OVC070	20	1013

As cartas sinóticas produzidas pela DHN (Figura 5.5) mostram a evolução do SF, que às 12Z do dia 04/04/2010 estava aproximadamente em 27°S, e na carta de 05/04/2010 às 12Z é representada sobre a cidade do Rio de Janeiro. A carta de 07/04/2010 às 00Z já mostra que a frente se deslocou, localizando-se em 17°S.

(a) 04/04/2010 – 12 Z



(b) 05/04/2010 – 00 Z

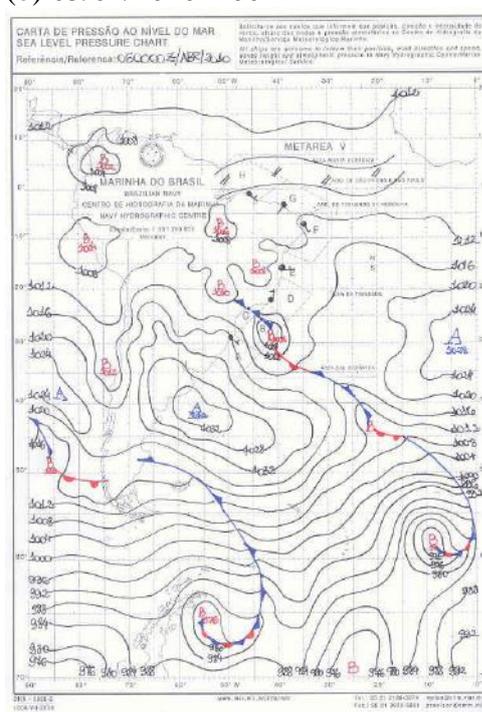
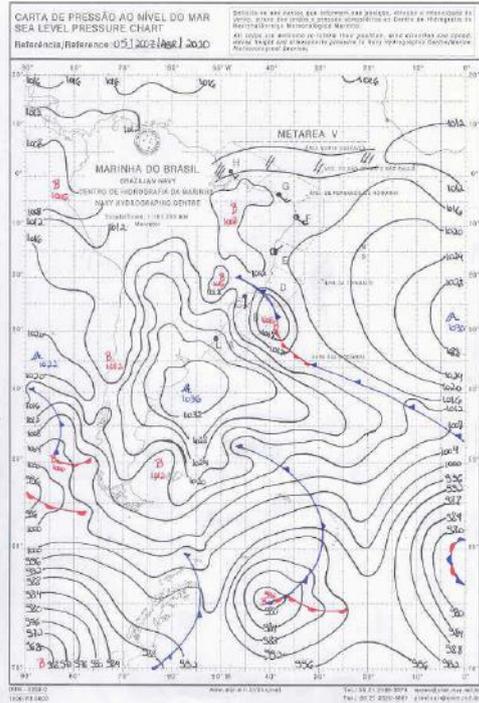
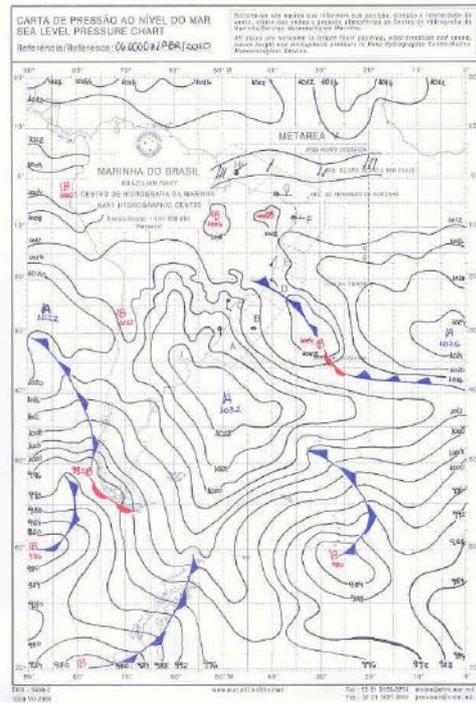


Figura 5.5 - Cartas Sinóticas do evento. (a) 04/04/2010 - 12Z; (b) 05/04/2010 - 00Z; (c) 05/04/2010 - 12Z; (d) 06/04/2010 - 00Z; (e) 06/04/2010 – 12Z e (f) 07/04/2010 – 00Z (Fonte: <http://www.mar.mil.br/dhn/chm/meteo/prev/cartas/cartas.htm>)

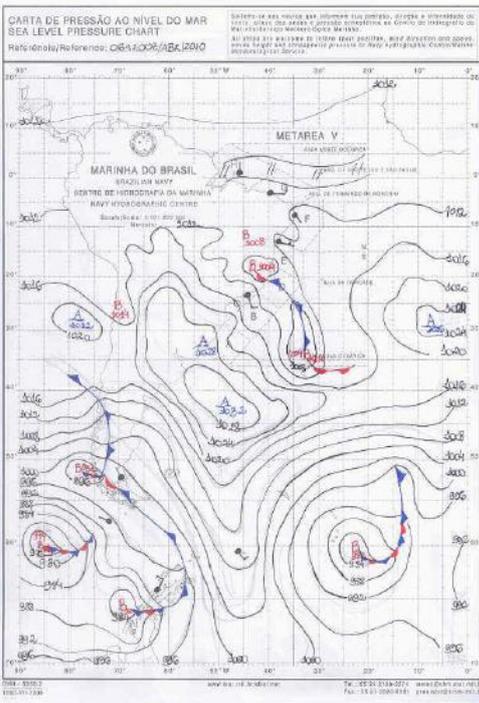
(c) 05/04/2010 – 12 Z



(d) 06/04/2010 – 00 Z



(e) 06/04/2010 – 12 Z



(f) 07/04/2010 – 00 Z

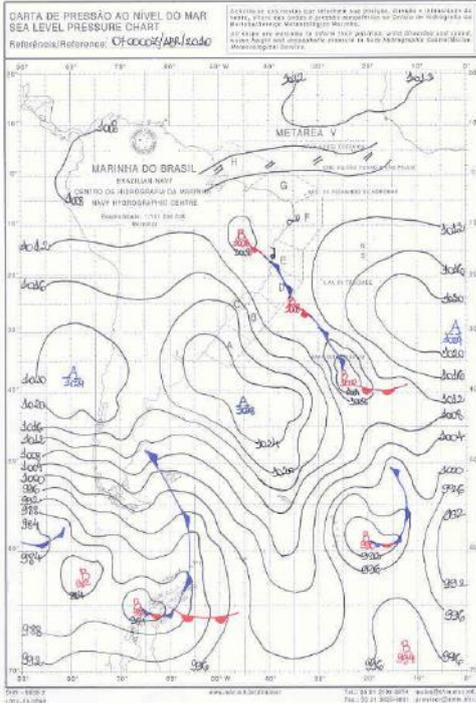


Figura 5.5 – Final.

Na Figura 5.6 podemos ver a evolução do SF desde o dia 04/04/2010 até o dia 07/04/2010. O sistema se formou sobre o sul do Rio Grande do Sul por volta de 03/04/2010 as 12 Z e alcança a região do Rio de Janeiro em aproximadamente 05/04/2010 00Z. Nota-se também na mesma figura, a presença do sistema de alta

pressão na retaguarda da frente, com centro superior a 1028 hPa, que com a passagem da frente sobre a Região Sudeste, passou a atuar gerando ventos de quadrante sul, vindos do oceano, transportando ar frio e úmido para o continente. Dessa forma foi observado um forte gradiente de umidade e de temperatura do ar na região frontal: Antes da chegada do SF predominavam valores de umidade específica entre 12 e 14 g/kg e temperatura do ar em torno de 27°C sobre a RMRJ, enquanto a massa de ar na retaguarda do SF apresentava umidade em torno de 2 g/kg e temperatura do ar em 1000 hPa chegando a 7°C. Esta advecção de ar úmido persistiu durante toda a madrugada do dia 05 e durante o dia 06. Neste período começou a ser observada chuva forte/muito forte em toda cidade.

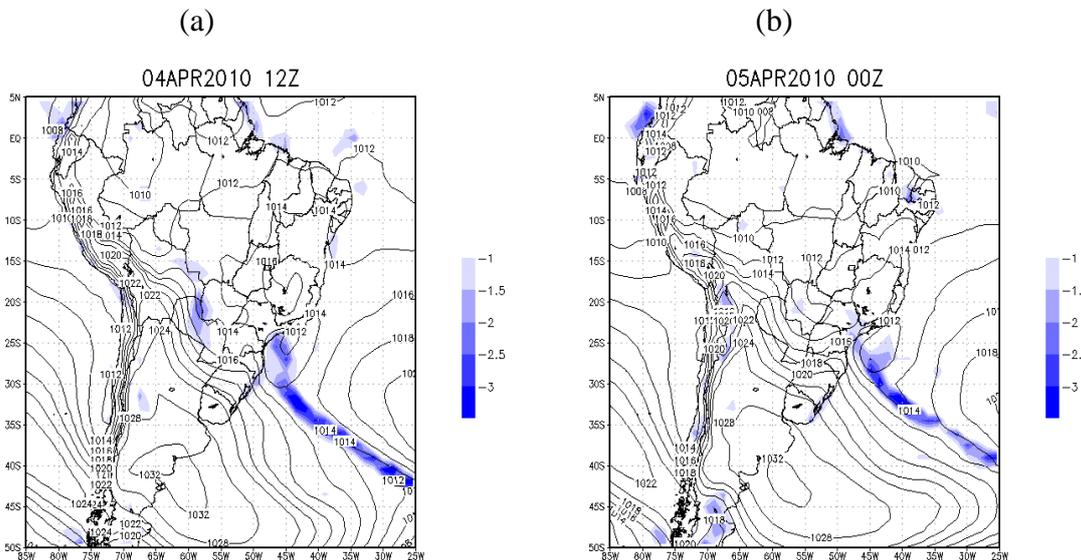


Figura 5.6 - Campo de pressão atmosférica (hPa) ao nível médio do Mar e divergência do vento em 850hPa ($10^5 s^{-1}$) (sombreado) para o período do evento. (a) 04/04/2010 – 12Z (b) 05/04/2010 – 00Z; (c) 05/04/2010 – 12Z; (d) 06/04/2010 – 00Z; (e) 06/04/2010 – 12Z; e (f) 07/04/2010 – 00Z.

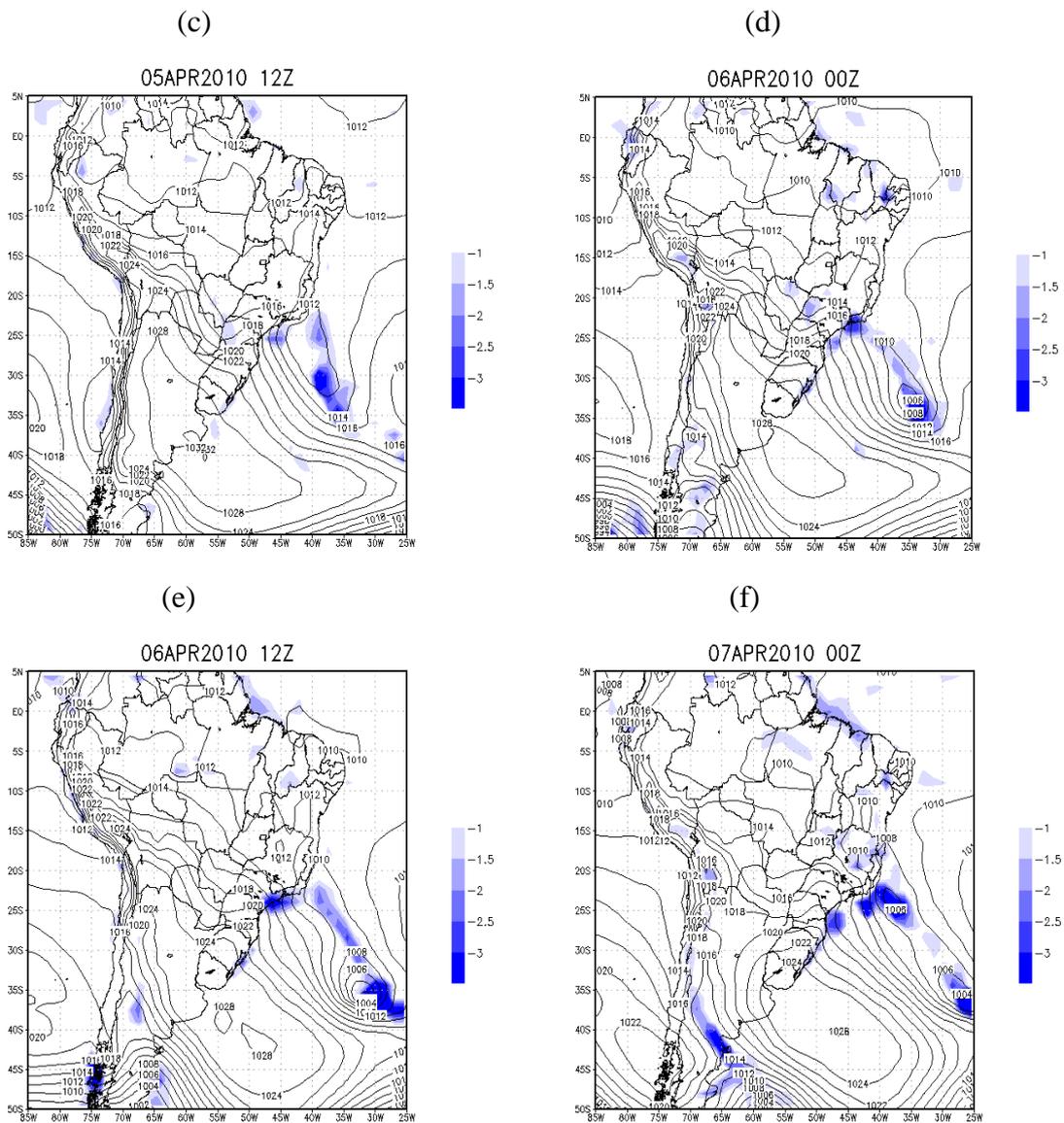


Figura 5.6 - Final

Na Figura 5.7 observamos que no dia 04 às 12 Z a região do oceano estava com valores de umidade específica inferiores a 10 g/kg, porém com o passar das horas, vemos um aumento na quantidade de umidade na região do oceano que está na vanguarda de frente fria. No dia 07 às 00 Z a região do Rio de Janeiro já apresenta valores inferiores a 10 g/Kg.

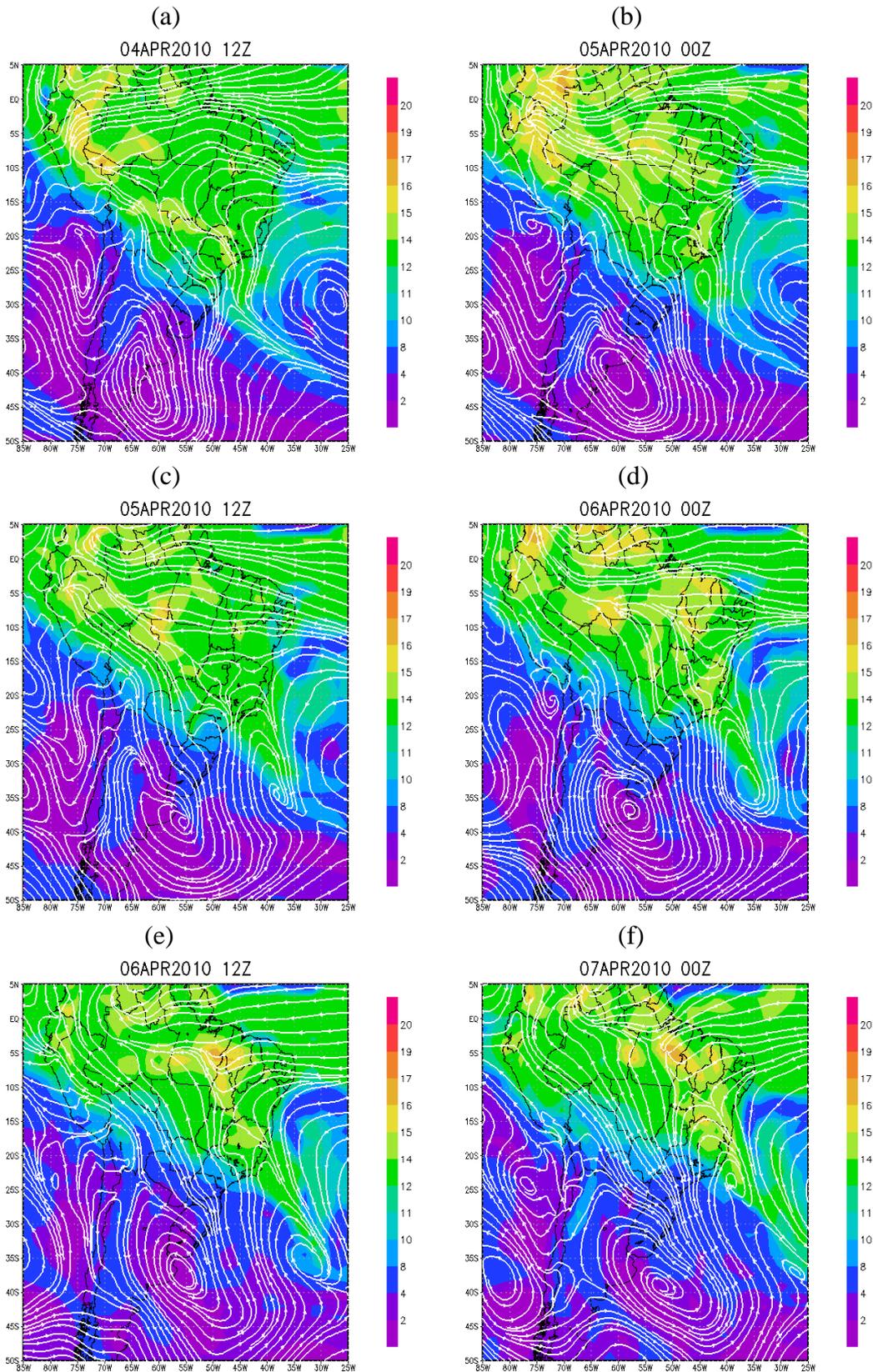


Figura 5.7 - Campo de umidade específica (g/Kg) (sombreado) e linhas de corrente em 850 hPa para o período do evento. (a) 04/04/2010 – 12Z; (b) 05/04/2010 – 00Z; (c) 05/04/2010 – 12Z; (d) 06/04/2010 – 00Z; (e) 06/04/2010 – 12Z; e (f) 07/04/2010 – 00Z

Na Figura 5.8 notamos um ligeiro aumento de temperatura antes da passagem da frente fria, notamos que durante a passagem desta, o padrão das isotermas é perturbado e passa a ser influenciado pelo sistema.

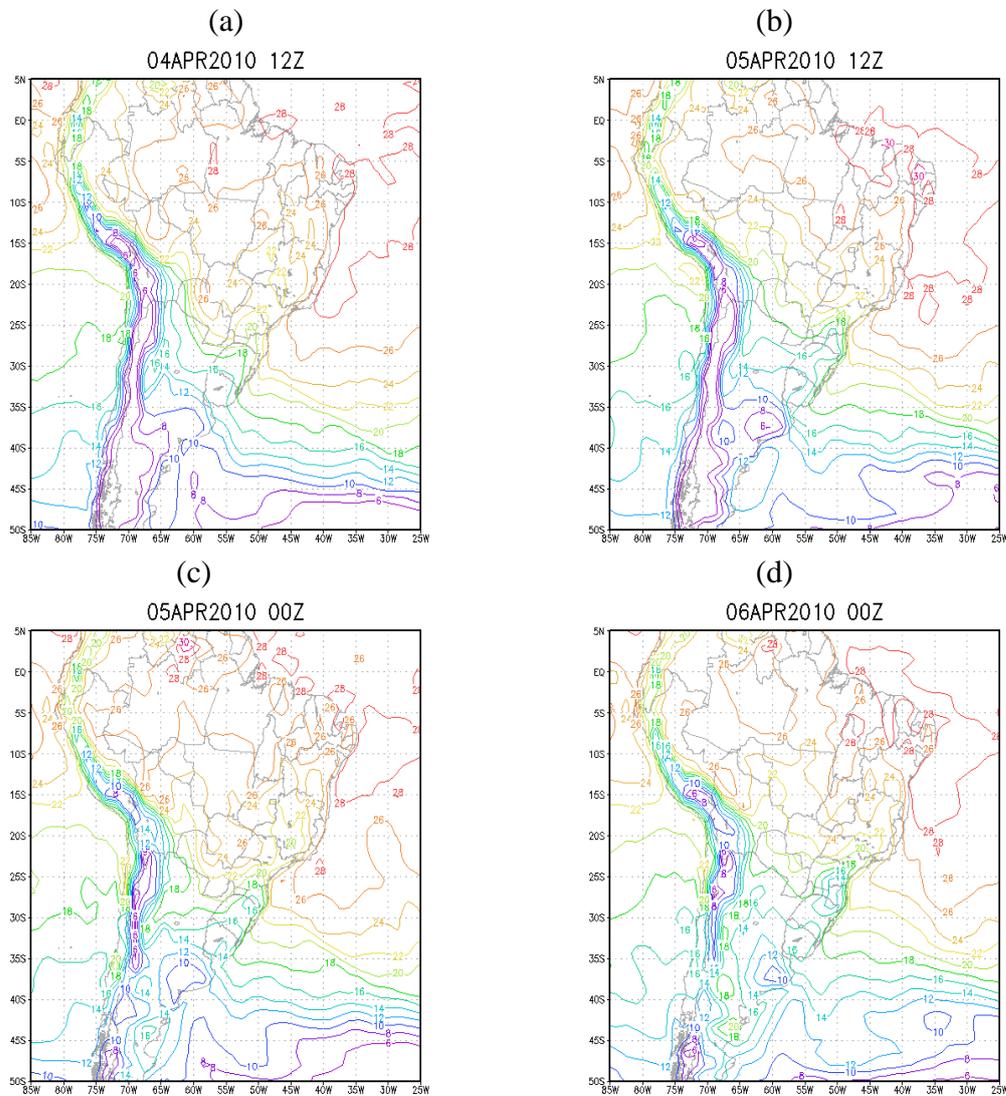


Figura 5.8 – Campo de Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) à superfície para o período de estudo.

(a) 04/04/2010 – 12Z; (b) 05/04/2010 – 00Z; (c) 05/04/2010 – 12Z; (d) 06/04/2010 – 00Z; (e) 06/04/2010 – 12Z; e (f) 07/04/2010 – 00Z

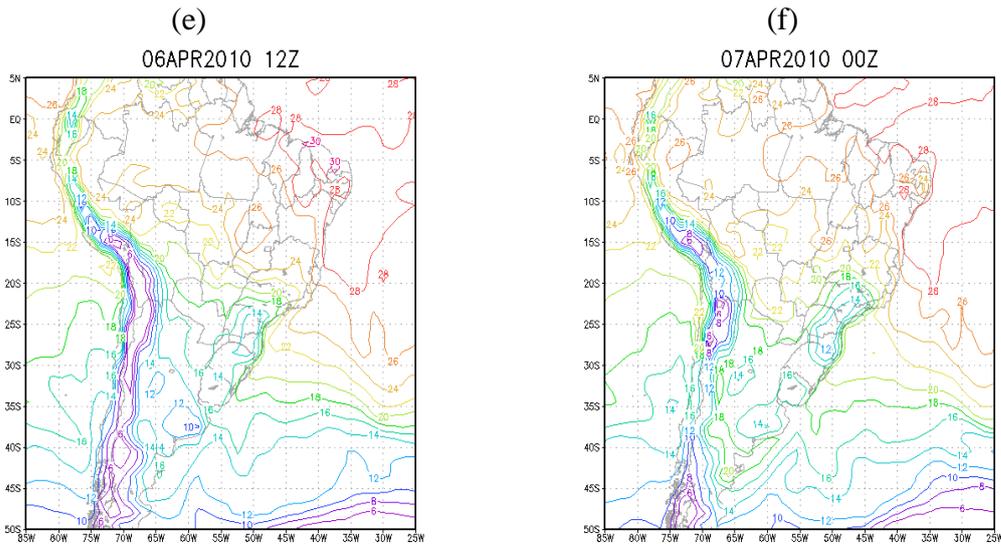


Figura 5.8 – Final.

Na Figura 5.9 estão os campos de altura geopotencial e o campo de movimento vertical em 500 hPa. A partir da análise da Figura 5.9 nota-se que a posição do cavado favorece a formação de sistemas convectivos. Tal cavado se projetou desde a Região Sul do País, em médios e altos níveis e começou a se amplificar sobre a Região Sul conforme ocorria o avanço do SF, projetando-se em direção a Região Sudeste do País. A característica principal dos cavados baroclínicos em médios e altos níveis é a capacidade de provocar divergência de massa em sua dianteira e, conseqüentemente, forçar o levantamento do ar em níveis mais baixos (Holton, 2004), ou seja, este cavado corroborou com a instabilização da atmosfera e com a convergência de massa e umidade na superfície. Associado a este cavado nota-se na Figura 5.9 o deslocamento de uma grande área com forte divergência em altitude sobre a RMRJ.

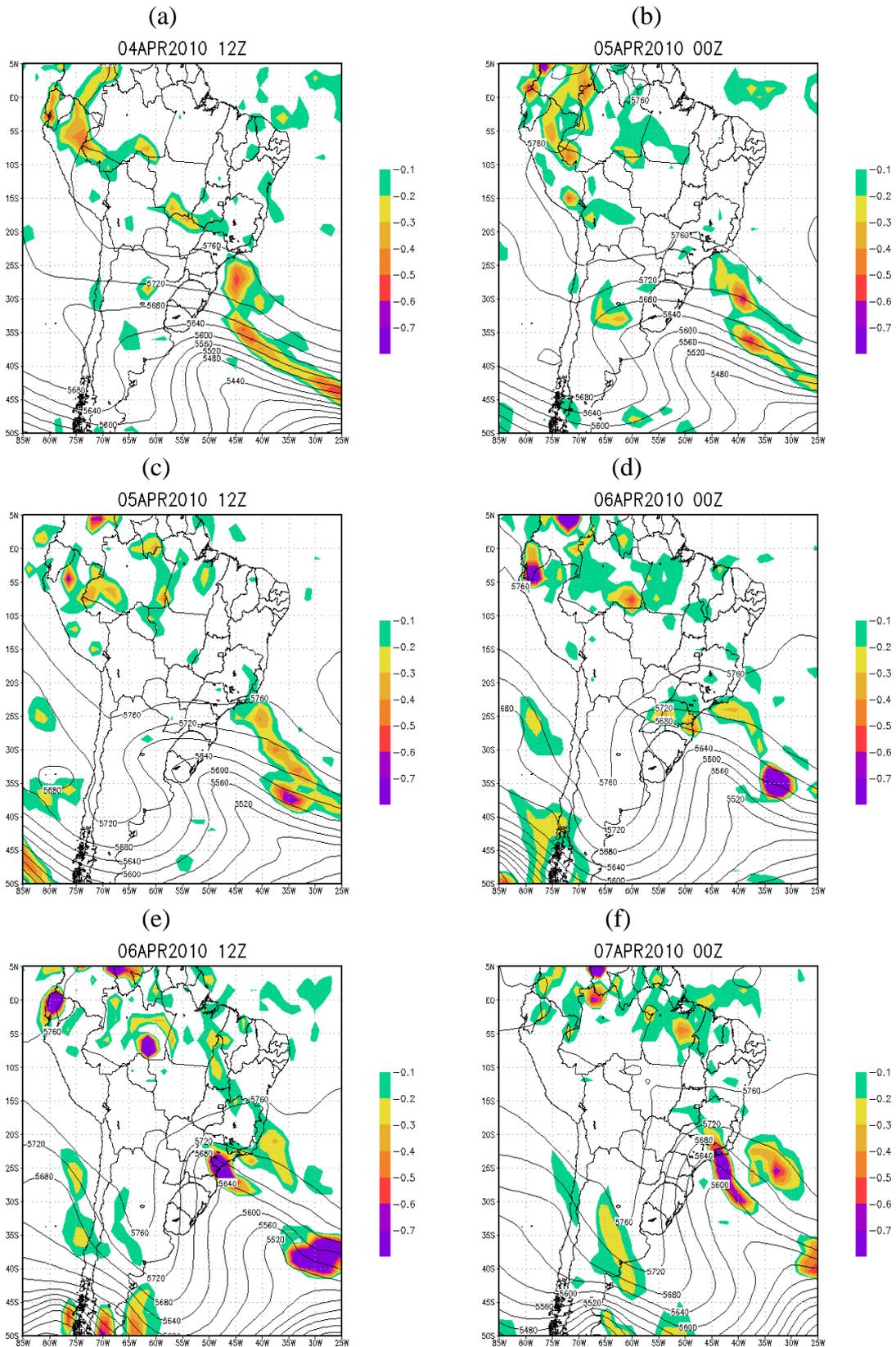


Figura 5.9 - Altura Geopotencial (mgp) (linhas) e $\hat{\Omega}$ (Pa/s) (sombreado) em 500hPa. (a) 04/04/2010 – 12Z; (b) 05/04/2010 – 00Z; (c) 05/04/2010 – 12Z; (d) 06/04/2010 – 00Z; (e) 06/04/2010 – 12Z; e (f) 07/04/2010 – 00Z

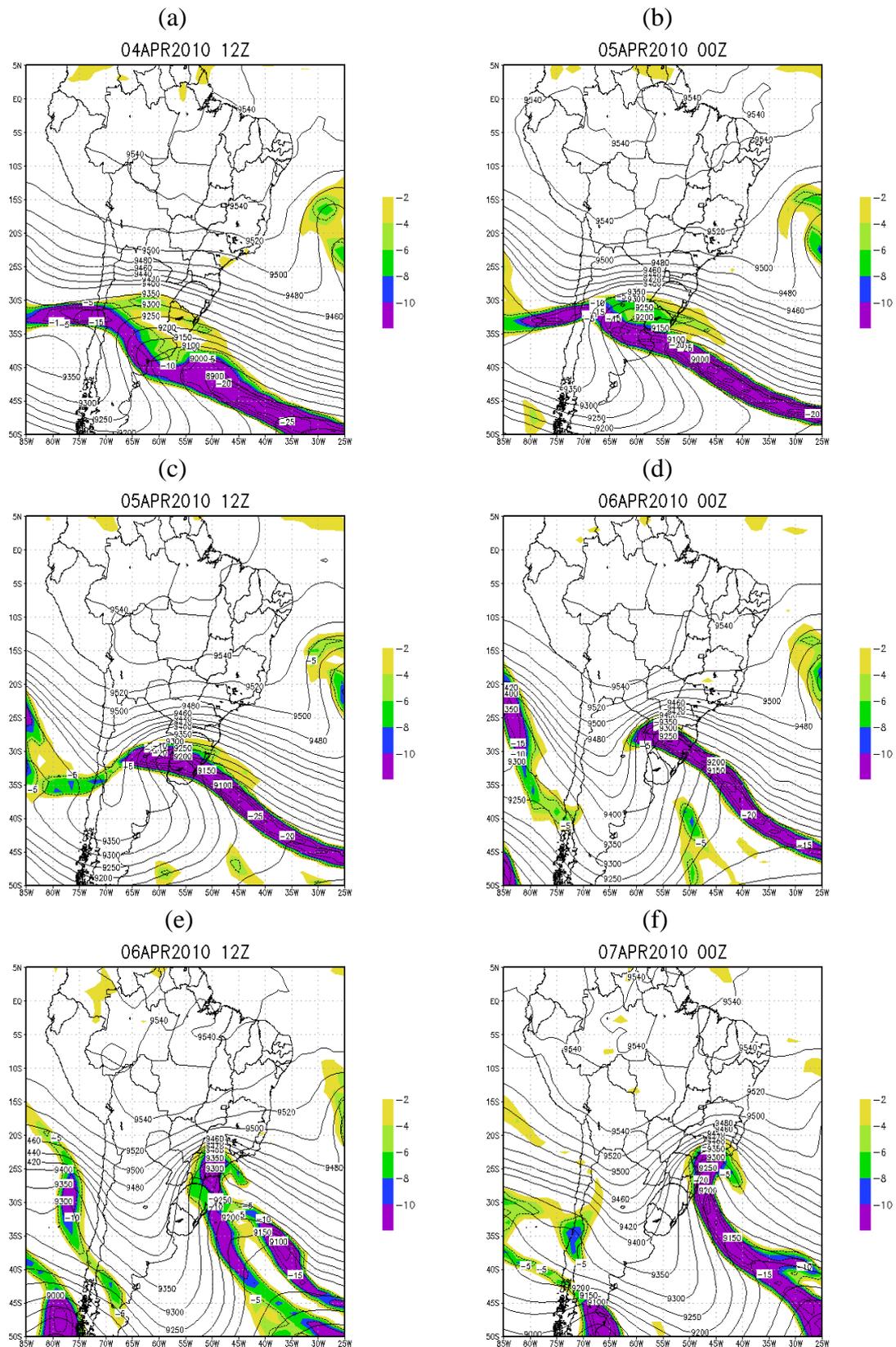


Figura 5.10 - Altura Geopotencial (m_gp) (linhas) e Vorticidade Relativa (10^5s^{-1}) (sombreado) em 300hPa. (a) 04/04/2010 – 12Z; (b) 05/04/2010 – 00Z; (c) 05/04/2010 – 12Z; (d) 06/04/2010 – 00Z; (e) 06/04/2010 – 12Z; e (f) 07/04/2010 – 00Z.

Nota-se, que a posição deste cavado também favoreceu a formação de sistemas convectivos, gerando movimento ascendente do ar sobre a região, com valores inferiores a $-0,1 \text{ Pa/s}$ (Figura 5.9). No campo de altura geopotencial em 300 hPa (Figura 5.10) pode ser observado a presença do mesmo cavado frontal praticamente na mesma posição ao nível de 500 hPa. Tal padrão de difluência significativa nestes níveis posicionado sobre o Estado promoveu a incursão de ar mais frio nestes níveis atmosféricos. O vórtice ciclônico associado ao SF se fechou tanto em 500 hPa como em 300 hPa, formando um acoplamento que fomenta a intensificação do padrão de divergência em altos níveis.

No campo de divergência de massa em 1000 hPa, os valores sobre o Rio de Janeiro são da ordem de $-10 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, favorecendo a ocorrência de movimentos ascendentes do ar na região. Além do intenso movimento ascendente observado no litoral do Rio de Janeiro, o posicionamento do ciclone extratropical no oceano Atlântico, favoreceu o aporte de advecção de umidade do oceano para o litoral do Estado do Rio de Janeiro.

Dessa forma houve uma conexão entre o comportamento da atmosfera em altos, médios e baixos níveis sobre o Rio de Janeiro durante este evento, de forma que notamos o acoplamento construtivo de diversos mecanismos que foram favoráveis à ocorrência de tal quantidade de precipitação. Em superfície houve uma intensa convergência de massa e de umidade, havendo também o levantamento de parcelas de ar na região do litoral do Rio de Janeiro, enquanto que o cavado em médios e altos níveis intensificou tal comportamento atmosférico, conforme foi avançando pelo Sudeste, forçando movimentos ascendentes. Com essa soma de fatores que corroboram com a formação de precipitação, a tempestade pode se manter ativa por diversas horas, elevando os totais pluviométricos de toda a região.

Analisando a região afetada, percebemos que, principalmente o litoral sul fluminense e o litoral do Município do Rio de Janeiro são áreas bastante expostas a eventos de precipitação ligados a ventos de quadrante sul, com associação de sistemas de alta pressão pós-frontal. Nessas regiões o escoamento vindo do oceano interage com a complexa topografia local. Dessa forma a umidade proveniente do oceano é advectada em direção aos maciços litorâneos que assim assumem o papel de uma barreira topográfica, fomentando a convergência de massa e umidade em baixos níveis e,

consequentemente, gerando levantamento e condensação das parcelas de ar. Juntando todos esses ingredientes, temos os maiores volumes de chuva justamente nas regiões litorâneas do Estado do Rio de Janeiro.

Na Figura 5.11 encontra-se a distribuição espacial da precipitação acumulada entre 12 Z de 05/04 até 12 Z de 06/04, onde se notam os maiores valores próximo ao maciço da Tijuca (superior a 300 mm), reduzindo-se em direção a Zona Oeste e ao litoral, com valores superiores a 100 mm em todas as localidades. A chuva ocorreu de maneira forte e contínua, principalmente, durante a noite do dia 5/4 (a partir de 21HL) e a madrugada do dia 6/4/2010 (até 9 HL). Nota-se a partir da Tabela 5.3 que a precipitação máxima no período de 15 minutos foi registrada na estação de Irajá com 24,6 mm e na estação de Madureira com 22,8 mm. Os máximos no intervalo de 30 minutos foram observados nas estações do Sumaré (36,2 mm) e Gericinó (35,4 mm). No período de uma hora, os maiores totais pluviométricos foram registrados no Cachambi (52,2 mm) e Madureira (52,0 mm). Com relação aos totais diários, os valores máximos foram registrados no Sumaré (321 mm) e em São Conrado (282,4 mm), ultrapassando para o intervalo de 24 h os maiores totais pluviométricos já registrados no período de 1997 a 2006, que de acordo com Dereczynski et al., 2009, ocorreu no eventos dos dias 8 e 9 de janeiro de 1998, totalizando-se 272,8 mm na Tijuca no dia 9 de janeiro de 1998.

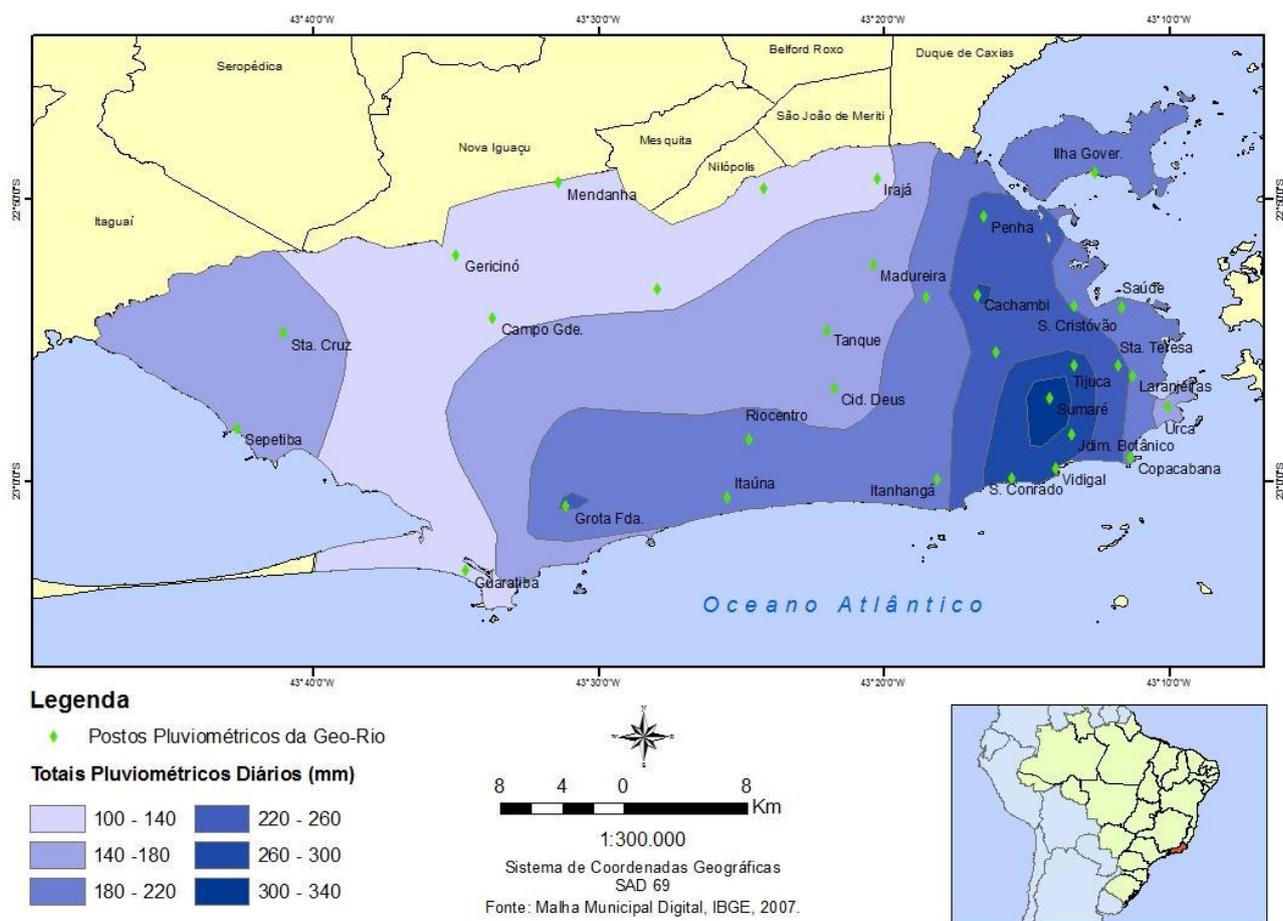


Figura 5.11 - Distribuição espacial do total pluviométrico, em mm, entre 12Z do dia 5 até 12 Z do dia 6 de abril de 2010 no município do Rio de Janeiro (Fonte: Geo-Rio).

Tabela 5.3 - Tabela com as maiores taxas de precipitação observadas durante o evento e o total acumulado no dia 06/04 – 12 Z. Destaca-se em amarelo as maiores taxas e em rosa as segundas maiores taxas.

Estação	Max em 15 min			Máx em 30 Min			Max em 1 h			Total 0512Z - 0612Z (24h)
	mm	dia	hora	mm	dia	hora	mm	dia	hora	mm
Georio	21,2	5/4	18:15	33,2	5/4	18:30	46,6	5/4	18:45	207,2
Laranjeiras	12,4	5/4	18:19	19,8	6/4	01:49	30,2	6/4	01:49	204,6
Irajá	24,6	5/4	18:39	29,0	5/4	18:39	41,2	5/4	19:09	121,0
Vidigal	15,8	6/6	00:48	26,0	6/6	00:48	40,8	6/6	01:33	244,6
Tanque	19,0	5/4	17:57	32,2	5/4	17:57	42,4	5/4	18:27	159,4
Itanhangá	12,4	5/4	18:27	23,8	5/4	17:57	43,0	5/4	18:27	196,4
Grota Funda	14,2	5/4	17:26	23,2	5/4	17:41	33,6	5/4	17:41	216,4
Riocentro	16,0	5/4	18:42	19,2	5/4	17:57	27,8	5/4	18:42	184,2
Tijuca	17,2	5/4	18:00	27,2	6/4	01:45	40,4	6/4	02:00	262,8
Cidade de Deus	18,2	5/4	17:56	29,6	5/4	17:56	40,2	5/4	18:26	158,2
Itaúna	14,2	5/4	18:43	21,6	5/4	18:43	32,4	6/4	04:28	178,4
Bangú	11,2	5/4	17:23	20,6	5/4	17:38	32,6	5/4	17:53	128,4
Gericoínó	19,6	4/4	18:22	35,4	4/4	18:37	39,0	4/4	18:52	122,8
Anchieta	10,4	5/4	19:08	20,6	5/4	19:08	27,6	5/4	19:08	125,4
Campo Grande	16,8	4/4	18:23	28,2	4/4	18:23	34,8	5/4	23:08	129,8
Sepetiba	11,0	5/4	22:06	15,8	5/4	22:21	25,6	5/4	21:36	155,2
Guaratiba	6,2	6/4	02:37	9,2	6/4	02:37	17,4	6/4	03:07	100,2
Santa Cruz	16,2	5/4	21:37	25,0	5/4	21:37	39,6	5/4	21:37	142,0
Mendanha	10,4	7/4	07:30	17,6	7/4	07:45	25,2	7/4	22:30	120,0
Grajaú	16,0	6/4	01:46	28,4	6/4	02:01	49,2	6/4	02:01	222,4
Iha do Governador	18,6	5/4	18:15	30,2	5/4	18:15	48,0	5/4	18:30	196,6
Penha	14,8	5/4	20:02	24,2	5/4	20:02	38,8	5/4	02:47	226,2
Maureira	22,8	5/4	18:32	29,2	5/4	18:02	52,0	5/4	18:32	160,4
Saúde	10,0	5/4	18:16	19,8	5/4	18:16	30,2	5/4	18:46	178,0
Cachambi	18,6	5/4	18:02	29,0	5/4	18:02	52,2	6/4	02:02	255,2
Santa Teresa	16,4	5/4	18:15	26,2	5/4	18:30	32,4	6/4	02:00	222,2
Piedade	11,8	5/4	18:46	18,8	5/4	18:01	33,0	5/4	18:46	176,4
Urca	9,4	6/4	01:48	14,8	6/4	01:48	23,6	6/4	01:48	151,8
Copacabana	13,8	6/4	03:04	20,6	6/4	01:34	32,4	6/4	02:04	200,6
São Conrado	16,2	5/4	20:48	26,2	5/4	21:03	40,4	6/4	01:48	282,4
Jardim Botânico	18,2	5/4	18:19	29,8	6/4	01:19	49,4	6/4	01:34	272,4
Sumaré	18,2	5/4	18:05	36,2	5/4	18:20	46,2	5/4	18:50	321,0

Os máximos em 24 horas consecutivas (acumulados em distintos períodos durante o evento), conforme apresentados no sítio do Alerta Rio (<http://www0.rio.rj.gov.br/alertario/>) também foram extremamente elevados em várias estações, como por exemplo: 304,6 mm na Rocinha; 303,0 mm no Jardim Botânico; 280,2 mm na Tijuca; 264,6 mm no Vidigal e 257,8 mm no Grande Méier.

A Figura 5.12 apresenta as imagens do radar meteorológico do Pico do Couto, onde pode ser observada a tempestade de caráter intenso que atingiu o Rio de Janeiro. Através das imagens, pode ser visto que, a chuva que teve início no fim da tarde do dia 05/04 e se prolongou durante a noite e madrugada, se estendeu até a manhã do dia seguinte, devido à atuação do SCM e da instabilidade frontal. As imagens revelam também que a RMRJ foi uma das mais castigadas pela forte chuva que atingiu grande parte do Estado, ocasionado os graves transtornos já descritos neste trabalho. Através da

sequencia de imagens é possível notar o momento que começa a chover sobre a RMRJ, e o comportamento da mesma.

Para a estação Sumaré apresenta-se na Figura 5.12 a série temporal dos totais pluviométricos acumulados a cada 15 minutos, no período de 5 a 7 de abril de 2010. Nota-se que durante a passagem do SF, do início do dia 05/04, até 12 Z a precipitação foi leve, com máximo de 4 mm acumulados em 15 minutos, no entanto a partir de 18:05 Z do dia 05/04 as chuvas se intensificaram, permanecendo fortes no dia seguinte (06/04) e reduzindo-se apenas dois dias após a passagem do sistema frontal (07/04).



Figura 5.12 - Totais pluviométricos acumulados, em mm, a cada 15 min durante o evento na estação Sumaré no período de 00:20 Z de 5 de abril até 22:20 Z de 7 de abril. Ressalta-se o pico de precipitação de 18,2 mm em 15min às 18h05min.

Na Figura 5.13 nota-se que o sistema começou a atingir o município, provocando chuva detectada no radar por volta das 20Z do dia 05/04/2010 permanecendo com chuvas de caráter moderado até por volta de 08Z do dia 06/04/2010. A partir das 20Z do dia 05 até as 07Z do dia 06, observa-se valores de refletividade entre 35 e 45 dBz sobre a RMRJ. As refletividades observadas indicavam a ocorrência de precipitação apenas moderada, o que não correspondeu ao observado, pois as condições meteorológicas que foram descritas se manifestam em nuvens de baixa

altitude, que não são corretamente monitoradas pelo radar. Como uma parcela significativa da precipitação foi gerada em nuvens de altitude inferior os valores de refletividade fornecidos pelo radar não foram condizentes com os valores de precipitação observada.

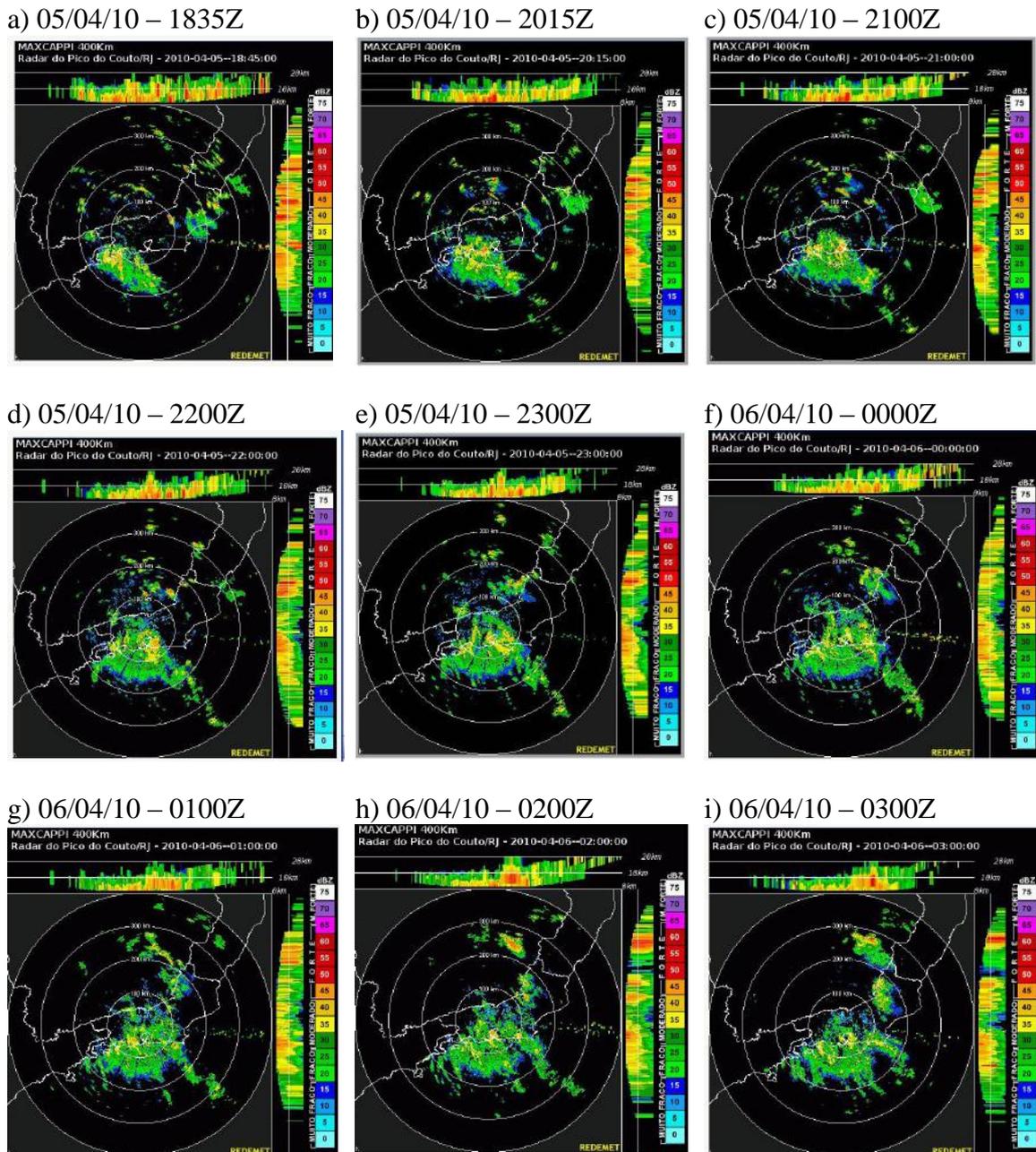


Figura 5.13 – Imagens do radar do Pico do Couto para os dias 05 e 06/04/2010 mostrando o SCM que causou os elevados totais pluviométricos na RMRJ.

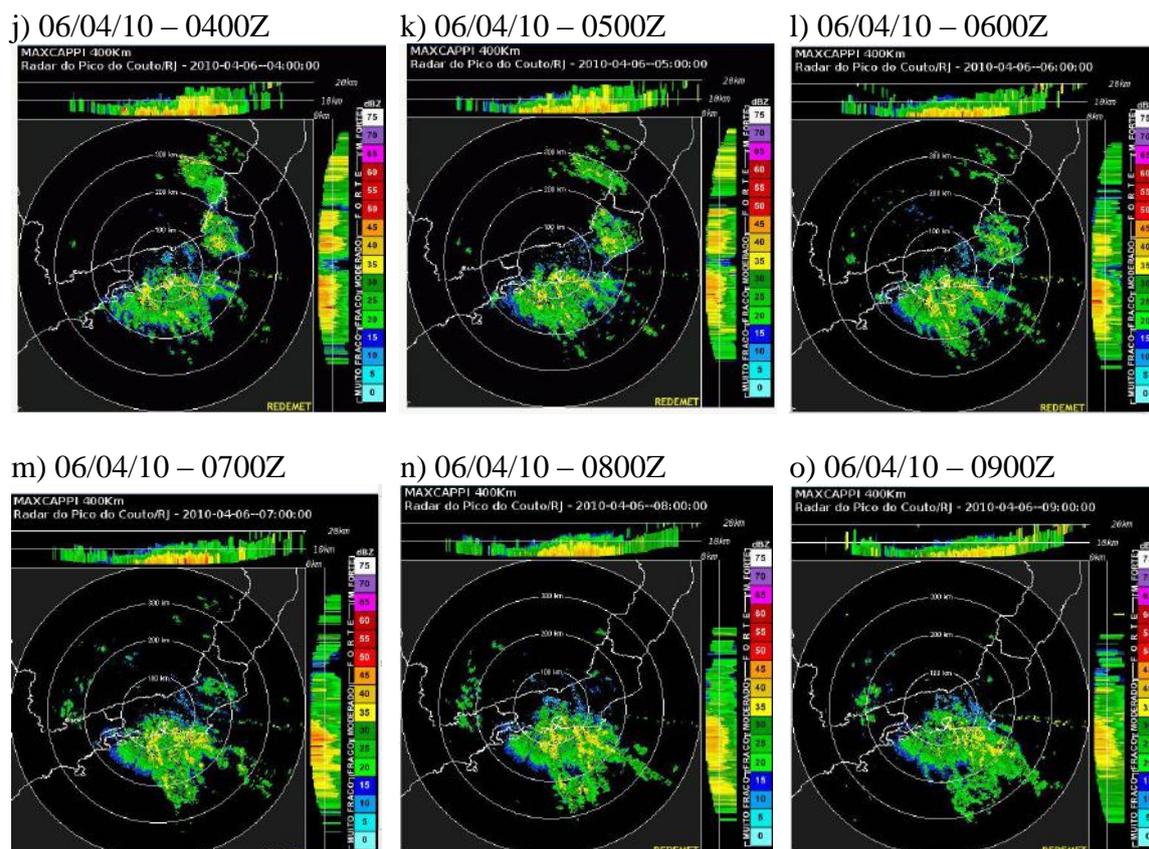
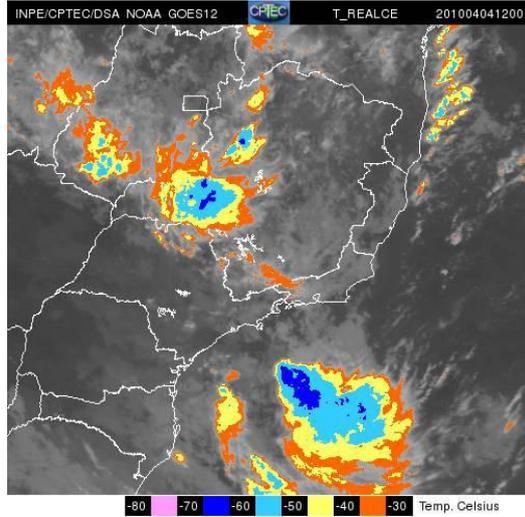


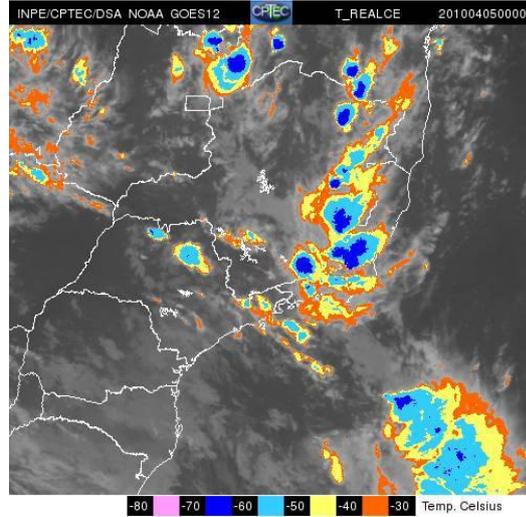
Figura 5.13 – Final.

Na Figura 5.14 notamos a passagem da frente fria e posteriormente o SCM sobre a RMRJ. Às 0500Z nota-se diversas nuvens de topo frio sobre todo o Estado do Rio de Janeiro, inclusive sobre a RMRJ. No dia 0600Z ainda há nuvens sobre a região ressaltando o caráter persistente da chuva que atingiu o Estado.

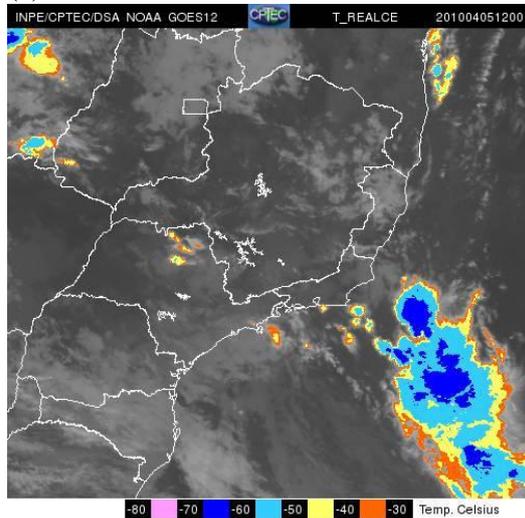
(a) 04/04/10 - 12Z



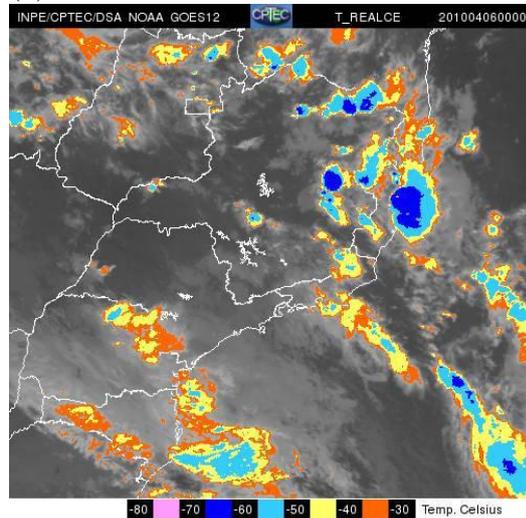
(b) 05/04/10 - 00Z



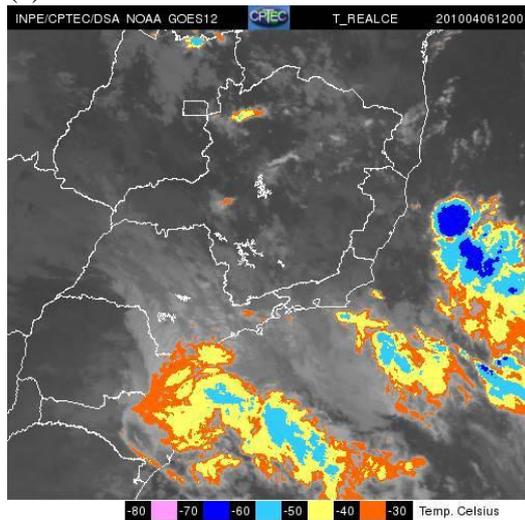
(c) 05/04/10 - 12Z



(d) 06/04/10 - 00:00Z



(e) 06/04/10 - 12Z



(f) 07/04/10 - 00 Z.

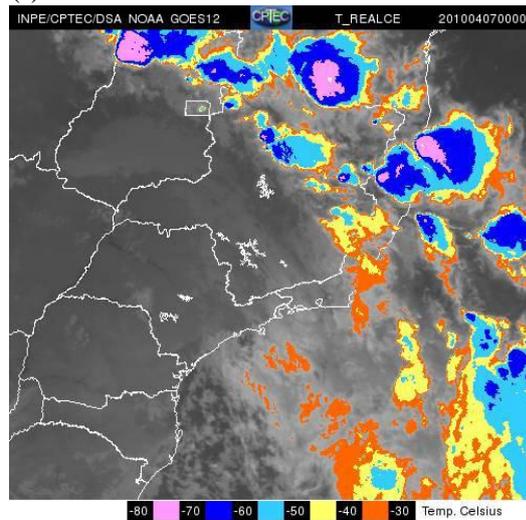


Figura 5.14 – Imagens de satélites no Canal infravermelho (IR) com realce de temperatura setorizadas na região Sudeste do Brasil. (a) 04/04/10 - 12Z; (b) 05/04/10 - 00Z; (c) 05/04/10 - 12Z; (d) 06/04/10 - 00:00Z; (e) 06/04/10 - 12Z e (f) 07/04/10 - 00 Z.

5.3 Análise das Previsões do Modelo Eta do CPTEC

Nas figuras 5.15 a 5.17 vemos as previsões do modelo Eta com 72, 48 e 24 horas de antecedência ao evento nas diferentes resoluções, 40, 20, 15 e 5 Km, tendo realce na região de interesse com destaque para a quantidade de chuva prevista para a região. Tais previsões foram geradas no CPTEC/INPE e gentilmente cedidas pela Dra. Chou Sin Chan.

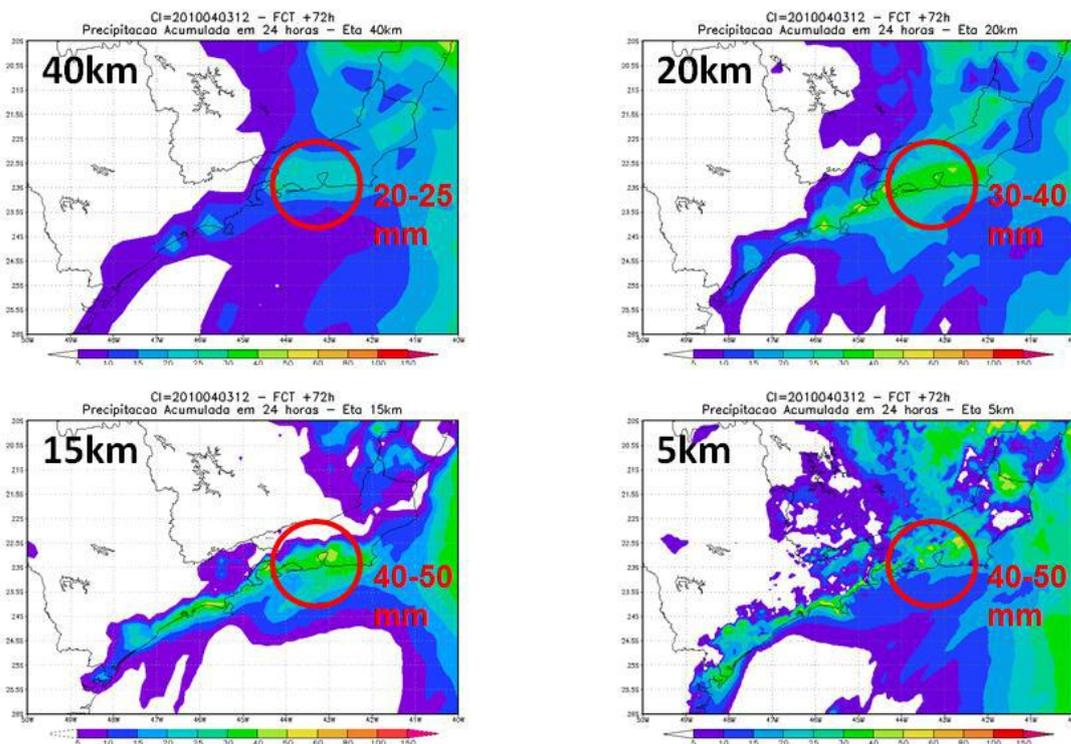


Figura 5.15 – Previsão de precipitação acumulada em 24 horas às 12Z do dia 06/04/2010 com modelo Eta integrado com 72 horas de antecedência.

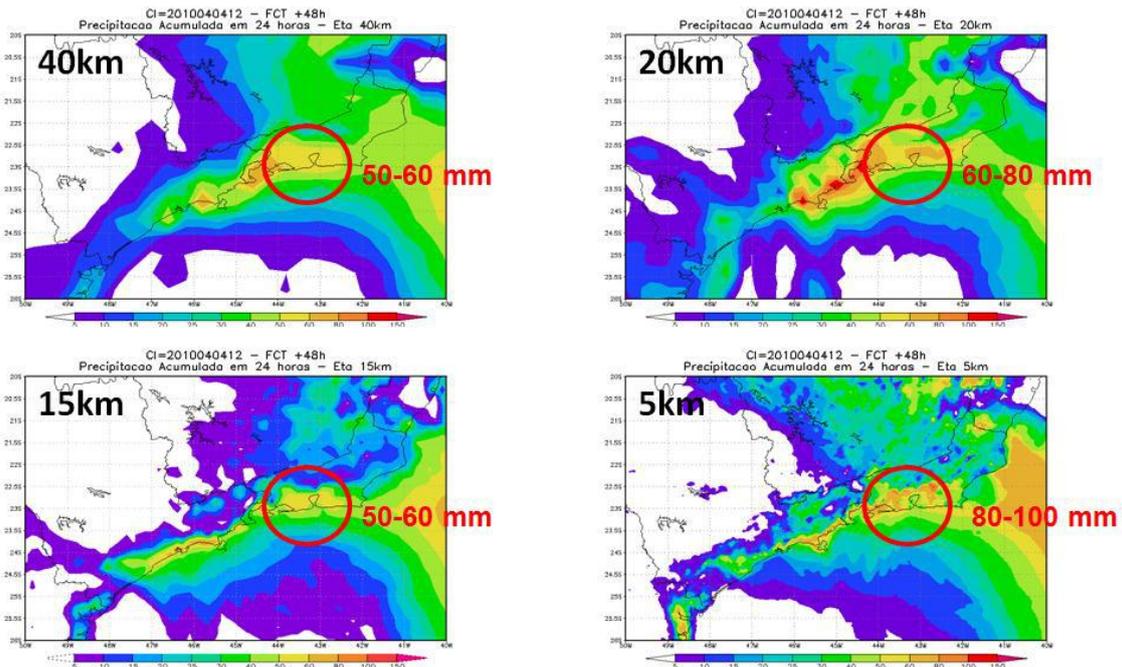


Figura 5.16 – Previsão de precipitação acumulada em 24 horas às 12Z do dia 06/04/2010 com modelo Eta integrado com 48 horas de antecedência.

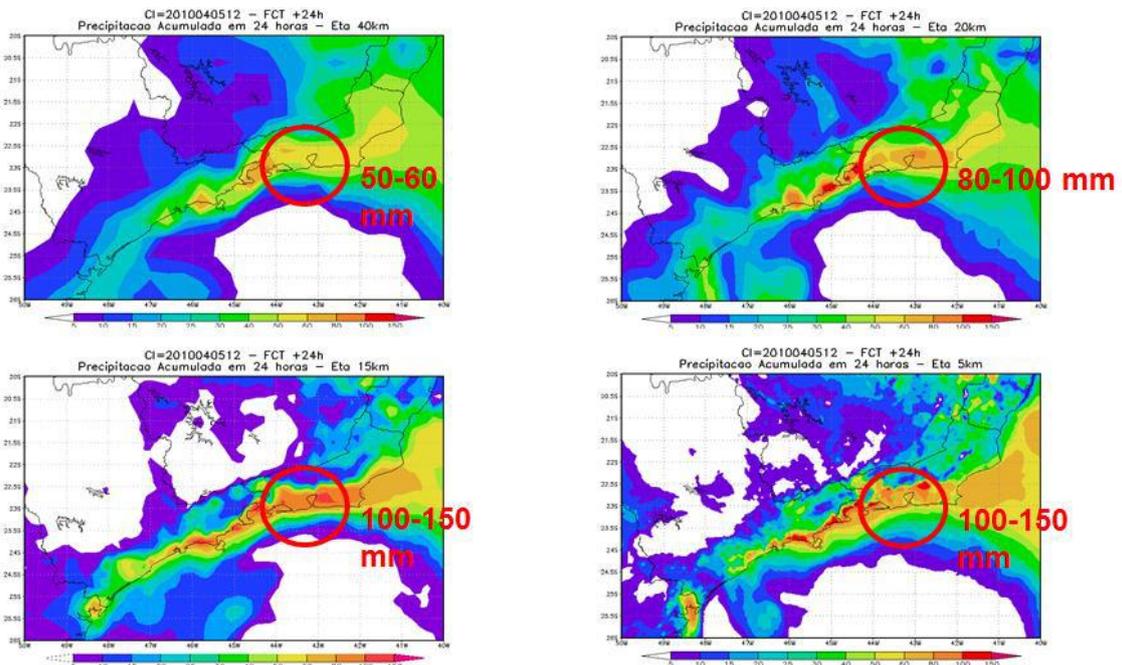


Figura 5.17 – Previsão de precipitação acumulada em 24horas às 12Z do dia 06/04/2010 com modelo Eta integrado com 24 horas de antecedência.

As previsões do modelo Eta conseguiram captar a forte chuva com antecedência, prevendo sua intensidade razoavelmente bem, chegando os modelos de 15 e 5 Km com antecedência de 24 h a lançarem valores de precipitação acumulada entre 100 e 150 mm, quando a precipitação real ficou em torno de 200 mm, chegando a 300 mm no Sumaré.

A previsão do Eta com 72 horas de antecedência previu no máximo 50 mm em 24h nas resoluções 15 e 5 km, ficando bem abaixo do volume real registrado. Conforme o modelo foi sendo atualizado, as rodadas mais recentes foram cada vez mais intensificando a chuva prevista para o evento. A previsão com 48 horas de antecedência chegou a prever 100 mm em 24h na resolução 5 Km. A previsão que realmente se aproximou mais da realidade foi com 24 horas de antecedência nas resoluções 15 e 5 km, que chegou ao valor de 150 mm/h.

Podemos dizer, com isso, que com o passar do tempo e das rodadas o modelo foi assimilando novas características do fenômeno que fizeram com que cada vez mais a precipitação prevista aumentasse seu valor. Ou seja, durante a evolução do sistema os mecanismos internos foram intensificando os processos geradores de precipitação, lançado novos valores das variáveis do modelo que foram alimentando as equações do modelo e gerando, a cada nova rodada, maiores valores de precipitação.

O fato de os valores de precipitação mais próximos da realidade estarem nas resoluções mais finas ressalta o caráter mais localizado da chuva intensa, sendo que mesmo no modelo com 24 horas de antecedência e resolução de 5 Km há núcleos de precipitação mais intensa em determinados pontos dentro da RMRJ.

Em todas as previsões do modelo Eta vemos que a região do Rio de Janeiro teria sido a mais castigada pelo sistema, que foi justamente no continente onde houve os maiores valores de precipitação em toda a área de atuação do sistema.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo identificar as condições sinóticas responsáveis pela ocorrência da tempestade que atingiu o Rio de Janeiro a partir do dia 5 de abril de 2010, causando enormes danos materiais e tirando a vida de centenas de pessoas em vários setores da RMRJ. Diversos Municípios foram atingidos, sendo que o local mais afetado foi o Morro do Bumba, em Niterói/RJ onde houve um total de 50 vidas perdidas.

Foram realizadas análises a partir dos dados da Reanálise ERA-INTERIM, dados de precipitação do sistema Alerta Rio e imagens de satélite e radar, além de dados convencionais, como METAR. Diversos fatores se somaram e fizeram com que o evento tivesse totais pluviométricos tão elevados, chegando a 321 mm em 24 horas na estação Sumaré.

Os resultados mostraram que o evento meteorológico foi provocado pela formação de um SCM embebido no SF que se deslocava pela Região Sudeste do Brasil. As condições atmosféricas reinantes antes da passagem do SF, caracterizado por ar quente e úmido, foram instabilizadas pela chegada do ar frio e seco, característicos da alta migratória, na retaguarda do sistema frontal. A presença de um ciclone extratropical favoreceu o aporte de advecção de umidade do oceano para o litoral do Estado do Rio de Janeiro. Este ciclone esteve associado à presença de um cavado na troposfera média e alta que favoreceu o aporte de um ar mais frio nestes níveis, condição esta, que favorece a instabilização da atmosfera e convergência de massa e umidade na superfície, já que o ar estava quente na baixa troposfera antes da chegada da frente. A combinação de uma forte componente dinâmica com o intenso padrão termodinâmico presente na Região Sudeste do Brasil foram os principais fatores que contribuíram para a tempestade que atingiu o RMRJ.

Neste estudo também foi incluído um histórico de chuvas extremas ocorridas no Município do Rio de Janeiro, desde a fundação da cidade (1565) até os dias atuais. Esse levantamento foi feito com objetivo de comparar eventos passados (36 casos) com o caso estudado neste trabalho, ocorrido em 06/04/2010. Os resultados mostraram que de fato o evento de 06 de abril de 2010 representou um recorde com relação aos totais pluviométricos diários que começaram a ser registrados na cidade a partir de 1851. Dos

37 eventos selecionados como extremos, todos com totais pluviométricos diários superiores a 100 mm, a maior parte dos casos (32%) ocorreu em janeiro (12 casos) e os meses de fevereiro, março e abril, apresentaram a mesma frequência de ocorrência (7 eventos em cada um dos meses), totalizando-se 89% dos eventos no período de janeiro a abril. Os 11% restantes ocorreram em maio (2 eventos), outubro (1 evento) e dezembro (1 evento).

Um estudo comparativo entre os mecanismos termodinâmicos e dinâmicos envolvidos nos casos extremos selecionados neste trabalho seria de grande utilidade e poderia contribuir para a melhoria da previsão de tais eventos.

BIBLIOGRAFIA:

- Andrade, K. Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul. 2007. 187 f. Tese (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2007.
- Arakawa, A e Lamb, V, R: computacional design for the basic dynamic process for the UCLA general circulation model. *Methods in computational physics*, 17, J. Chang, Ed., academic Press, 173 – 265, 1977
- Araújo, M. A.A., Aloise, E.D., Santos, A.P. Aspectos sinóticos das chuvas intensas de fevereiro de 1966 no Rio de Janeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 9, 1966, Campos do Jordão.
- Araújo, M.A.A. et al. Ocorrência de tempo severo na área da Cidade do Rio de Janeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 8, 1994, Belo Horizonte. Anais.
- Araújo, M. A. A., Aloise, E.D., Santos, A.P.: Aspectos sinóticos das chuvas intensas de fevereiro/1996 no Rio de Janeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, Campos do Jordão, 1996, anais...p. 399-401.
- Betts, R.A.; Cox, P.M.; Lee, S.E. and Woodward, F.I. "Contrasting physiological and structural vegetation feedbacks in climate change simulations". *Nature*, 387, 796-799. 1997.
- Black, T. L.: The new NMC mesoscale Eta model: Description and forecast examples. *Weather and Forecasting*, 9, 265-278. 1994.
- Brandão, A. M. P. M.. As Chuvas e a Ação Humana: Uma Infeliz Coincidência. In Rosa, L. P. & Lacerda, W. A. *Tormentas Cariocas*, UFRJ, Rio de Janeiro, pp. 21-38. 1997
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Instituto de Meteorologia, Normas Climatológicas, Brasília, 1992.
- Byers, H.R. e Braham, R.R. Jr.: *The thunderstorm*. U.S. Govt. Printing Office, 277 pp. 1949.
- Cavalcanti, I.F.A.; Kousky, V.E. Frentes frias sobre o Brasil. In: Cavalcanti, I.F.A....[et al.] organizadores. *Tempo e clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 463p. 2009.
- Chen, F., Z. Janjic and K. Mitchell, Impact of atmospheric surface-layer parameterization in the new land-surface scheme of the NCEP mesoscale Eta model. *Boundary-Layer Meteorology* 48, 391-421. 1997.
- Chorley, R.J., Schumm, S.A., Sugden, D.E, *Geomorphology*. Methuen, London, 605pp. 1984.

- Chou, S.C., Condições atmosféricas durante ocorrência do vento zonda – o foehn da América do Sul. Congresso Brasileiro de Meteorologia. Brasília, DF. 1998.
- Chou, S. C.; Tanajura, C. A. S.; Xue, Y.; Nobre, C. A., Simulations with the Coupled Eta/SSiB Model over South America. J. Geoph. Res., Estados Unidos. 2003.
- Chou, S. C., J. F. Bustamante, J. R. Rozante Eta Model forecasts for the Venezuela Flood Event of December 1999. Revista Brasileira de Meteorologia, vol. 19(1).2004.
- Chou, S. C.; Justi Da Silva, M. G. An Objective evaluation of Eta model precipitation forecasts over South America. Climanálise. 1.1999.
- Coaracy, V. Memórias da Cidade do Rio de Janeiro, Ed. J. Olympio, Rio de Janeiro, 1965, n. p.
- Costa, H. e Teuber, W, Enchentes no Estado do Rio de Janeiro – Uma abordagem geral. SEMADS Rio de Janeiro-RJ, 160p. 2001.
- Cotton, W. R. e R. A. Anthes. Storm and cloud dynamics. Academic Press.,883 pp. 1989.
- Dee, D,P, and Coauthors. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. Quartely Journal of Royal Meteorological Society, 137, 553 – 597. 2011.
- Dereczynski, C. P. Estudo de caso de uma nuvem vírgula invertida e a subsequente ocorrência de ventos fortes na Bacia de Campos. Dissertação de Mestrado. IAG/USP, São Paulo 77 pp.1995.
- Dereczynski, P. C., Oliveira, S. J. E Machado, O. CLIMATOLOGIA DA PRECIPITAÇÃO NO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO, Revista Brasileira de Meteorologia, v. 24, p. 24–38, 2009.
- Dereczynski, C. P. e Menezes, W. F. Meteorologia da Bacia de Campos. Relatório PETROBRAS/CENPES/IBAMA. 2011.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS DE SANEAMENTO. A chuva na Baixada da Guanabara: relatório técnico engenharia gallioli ltda. Rio de Janeiro, 1975, p 34-52.
- Doswell, C. A. Severe Convective Storms – An Overview, 2001. In Severe Convective Storms (C.A. Doswell, ed.), p. 1-26, Vol. 28, n. 50. Amer. Meteor. Soc., Boston, 2001.
- Esteves, A.; Santos, S. A.; Almeida, V. A.; Marques, P. A.; Bernardino, S. B.; Couto, R. B.; Freitas, L. E.; Martins, N. G.; Oliveira, V. G.; Miranda, P. R.; Sampaio, L. R.; Silva, R. N. F. Estudo da precipitação na cidade do Rio de Janeiro entre 1997 e 2005. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2006, Florianópolis.
- Fels, S. B., e M. D. Schwarzkopf. The simplified exchange approximation: A new method for radiative transfer calculations. J. Atmos. Sci., 32, 1475-1488. 1975.

FUNDAÇÃO INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL DO RIO DE JANEIRO. Indicadores Climatológicos do Estado do Rio de Janeiro. Governadoria do Estado do Rio de Janeiro, Secretaria de Planejamento e Coordenação Geral (SECPLAN), Fundação Instituto de Desenvolvimento Econômico e Social do Rio de Janeiro (FIDERJ). Sistemas de Informação para o Planejamento Estadual (SIPE), 1978. Rio de Janeiro, 1978. 156 p.

Gonçalves, P., Carrão, H., Pinheiro, A., Caetano, M., 2006 : Land cover classification with support vector machine Applied to MODIS imagery. In: Global Developments in environmental earth observation from space, 25, 2006.

Guia, F. V. C.; Mourão, F. E. C.; Robalinho, D. H. L.; Grosman, S. K; Menezes, W. Estudo observacional e numérico do sistema de tempestades de caráter destrutivo que atingiu o Rio de Janeiro no dia 27 de janeiro de 2006. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2006, Florianópolis.

Guimarães, M. J.; Dereczynski, P. C.; Lewis, B.; Hermsdorff, J.; Aragao, L.; Oliveira, S. N. Estudo de caso de sistema convectivo de mesoescala associado a um sistema frontal no Rio de Janeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA-2010, Belém.

Hane, C.E. Extratropical squall lines and rainbands. *Mesoscale Meteorology and Forecast*. P. Ray, Ed American Meteorology Society, 359-389. 1986.

Holton, J.R.. *An introduction to Dynamic Meteorology*, 2nd ed. Elsevier Academic Press. 2004.

Kousky, V. E. Pentad Outgoing Longwave Radiation Climatology for the South American Sector. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 3, p. 217-231, 1988.

Lacis, A. A., e J. E. Hansen. A parameterization of the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 31, 118-133. 1974.

Lemos, C.F. & N. O. Calbet. Sistemas frontais que atuaram no litoral do Brasil (período 1987-95). In: *Climanálise Especial – Edição Comemorativa de 10 anos*. MCT/INPE/CPTEC. cap. 14.1996.

Marques, V. S., André, R. G. B., Sucharov, E. C., Pinheiro, F. M. A. Possíveis Modificações na Classificação Climática das Regiões Norte e Noroeste do Estado do Rio de Janeiro. *Relatório SIMERJ*, 15p. 2001.

Mellor, G. L., Yamada, T. A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci.*, 31, 1791-1806. 1974.

Mellor, G. L., and T. Yamada. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys.*, 20, 851-875. 1982.

- Mesinger, F. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. Riv. Meteor. Aeronautica, 44, 195--202.1984.
- Mesinger, F., Z. I. Janjic, S. Nickovic, D. Gavrilov, e D. G. Deaven. The step-mountain coordinate: Model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of Appalachian redevelopment. Monthly . Weather. Review., 116, 1493-1518. 1988.
- Oliveira, A. Interações entre sistemas frontais na América do Sul e a convecção da Amazônia. INPE-4008-TDL/239. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 115 p. São José dos Campos, SP. 1986.
- Orlaski, I. A rational subdivision of scales for atmospheric process. Bulletin of the American Meteorological Society. 1975.
- Reed, R. J. Cyclogenesis in polar air streams. Monthly Weather Review 107, 38-107. 1979.
- Reis, José de Oliveira. As inundações do Rio de Janeiro. In: Revista Municipal de Engenharia. p. 64-70. Jan-Dez 1990.
- Saulo, A.C; Nicolini, M.; Chou, S.C. Model characterization of the south american low-level folw during the 1997-1998 spring-summer season. Climate Dynamics. Springer-Verlag. 867-881p. 2000.
- Seluchi, M; Norte, F.A.; Satyamurty, P; Chou, S.C. Analysis of three situations of the foehn effects over the Andes (zonda wind) using the Eta-CPTEC regional model. Wether and forecasting. June. 481-501p. 2003.
- Seluchi, E. M. Padrões sinóticos associados a situações de deslizamentos de encostas na serra do mar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2006, Florianópolis.
- Seluchi, M.E.; Chou, S.C. Intercambios de masas de aire entre latitudes tropicales y extratropicales de Sudamerica. Climanálise, Cachoeira Paulista, SP, 14, n. 5. 1999
- Serra, A. B.; Ratisbonna L. Clima do Rio de Janeiro. 2. ed., Transcrição de: Boletim Geográfico. Ministério da Agricultura. Serviço de Meteorologia, p. 527-560, 1957.
- Serra, A. B. Clima da Guanabara. Boletim Geográfico, ano 29, n. 214, jan/fev 1970, Fundação Instituto Brasileiro de Geografia, p. 80-111, 1970.
- Silva Dias, M. A. F. Sistemas de mesoescala e previsão de tempo a curto prazo. Rev. Brasil. Meteor., 2, 133-150. 1987.
- Silva Dias, P. L, Caplan, P. Kousky, V. As chuvas intensas de 1988, circulação geral e previsibilidade. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 5, 1988, Rio de Janeiro.

Silva, J. G. F.; Uliana, E. M.; Pimassoni, L. H. S.; Ramos, H. E. A. Probabilidade de Ocorrência de Dias Chuvosos e Precipitação Mensal e Anual para o Município de Colatina - ES. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA- 2010, Belém. Strang, D. Considerações sobre a chuva de Janeiro de 1962 no Estado da Guanabara. Escritório de Meteorologia, 1962.

Tippett, M. K. ; Da Silva, A. Model error estimations for the CPTEC Eta Model. Climanálise. 1999

Uppala, S.M., Kállberg, P.W., Simmons, A.J., Andrae, U., da Costa Bechtold, V., Fiorino, M., Gibson, J.K., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G.A., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R.P., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M.A., Beljaars, A.C.M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Caires, S., Chevallier, F., Dethof, A., Dragosavac, M., Fisher, M., Fuentes, M., Hagemann, S., Hólm, E., Hoskins, B.J., Isaksen, L., Janssen, P.A.E.M., Jenne, R., McNally, A.P., Mahfouf, J.-F., Morcrette, J.-J., Rayner, N.A., Saunders, R.W., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K.E., Untch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P., and Woollen, J. The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal Review of Meteorological Society*, 131, 2961-3012. 2005

Varejão, M. A. S. Meteorologia e Climatologia – Versão Digital, Recife. 2005.

Velasco, I. E J. M. Fritsch. Mesoscale Convective Complexes in the Americas. *J. Geoph. Res.*, 92 (D8), 9591-9613 em *Journal of geophysical research atmospheres* 1987.

Weisman M. L. E J. B. Klemp. Characteristics of Isolated Convective Storms. In: Ray, P. S., ed. *Mesoscale Meteorology and Forecasting*. Boston, American Meteorological Society, 1986. 331-358. 1986.