



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

CARACTERIZAÇÃO SINÓTICA E CLIMATOLÓGICA DE EVENTOS DE CHUVA PÓS-FRONTAL NO RIO DE JANEIRO

Suzanna Maria Bonnet de Oliveira Martins

Orientadora: D. Sc. Claudine Pereira Dereczynski

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

Rio de Janeiro, RJ

Outubro, 2012

CARACTERIZAÇÃO SINÓTICA E CLIMATOLÓGICA DE EVENTOS DE CHUVA
PÓS-FRONTAL NO RIO DE JANEIRO

Suzanna Maria Bonnet de Oliveira Martins

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

Aprovada por:

Prof.^a D. Sc. Claudine Pereira Dereczynski

Prof.^a D. Sc. Ana Maria Bueno Nunes

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

Rio de Janeiro, RJ
Outubro, 2012

BONNET, SUZANNA MARIA

“CARACTERIZAÇÃO SINÓTICA E CLIMATOLÓGICA DE EVENTOS DE
CHUVA PÓS-FRONTAL NO RIO DE JANEIRO.”

Rio de Janeiro, 2012.

90p. Universidade Federal do Rio e Janeiro

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, pois sem Ele nada é possível, é importante acreditar para conquistar.

Compartilho esta vitória com meus pais, Rosangela e Jody, e minha irmã, Joanna (minha eterna amiga), que sempre acreditaram em mim mesmo nos momentos de desesperança e me ensinaram a ter força para conquistar as minhas vitórias. Muito obrigada a vocês, pois somente com o apoio de vocês consegui e consigo realizar além da minha capacidade.

Tomo como principal aprendizado de todo este processo, desde minha formação até agora, que não adianta ter pressa, tudo acontece no momento certo, pois requer amadurecimento (pessoal e intelectual), consciência e conhecimento necessários para concluir cada etapa.

Agradeço o apoio de amigos, em especial Wanderson, Fabrício, Bia, Ian, Fabio e Karina, por estarem sempre comigo nos momentos bons e ruins.

Agradeço ao Diego pelo amor que me dá, a força e compreensão por entender durante esses anos a minha vida atarefada de estudos e projetos, me ajudando pelas madrugadas, me dando caronas e principalmente me mostrando que na vida a gente precisa mais do que estudar!

À minha orientadora Claudine, que permaneceu comigo todos estes anos, acreditando no nosso trabalho e na conclusão dele. Aos professores do Departamento de Meteorologia, que de muitas formas foram importantes na minha formação, sanando minhas dúvidas e acreditando no meu potencial. Agradeço também às pessoas que me auxiliaram de alguma forma na realização deste trabalho: Prof.^a Ana Nunes, Leonardo Aragão, Alessandra Carbonel, Luiz Henrique e Raphael Vieira.

Obrigada a todos!

RESUMO

CARACTERIZAÇÃO SINÓTICA E CLIMATOLÓGICA DE EVENTOS DE CHUVA PÓS-FRONTAL NO RIO DE JANEIRO

Suzanna Maria Bonnet - outubro/2012

No Rio de Janeiro, em certas situações pós-frontais verifica-se a ocorrência de chuvas de origem estratiforme, apesar do posicionamento do sistema frontal (SF) ao norte da região em estudo, muitas vezes já localizado no Nordeste do Brasil. Este fenômeno é conhecido na região como precipitação devido ao “efeito de circulação marítima”, onde a presença de nuvens estratiformes, não associadas ao SF, geram chuvas leves a moderadas. Casos de chuva (tipo B) e não-chuva (tipo A) pós-frontais no período de janeiro de 2000 a dezembro de 2007 foram investigados comparativamente a partir de compostos e de estudos de casos, com o objetivo de conhecer os principais mecanismos físicos responsáveis pelos eventos de chuvas pós-frontais. Neste trabalho são apresentados os resultados de uma climatologia de oito anos de eventos tipo A, tipo B e também tipo E (nos quais o SF não evolui para norte). Para a realização do trabalho foram utilizados dados da Reanálise ERA-Interim, imagens de satélite, dados observacionais de precipitação do Sistema Alerta Rio e de vento do Ministério da Aeronáutica. Os resultados indicam que mais da metade (57%) dos SFs que atingem o Rio de Janeiro são do tipo E, 26% são do tipo A e 17% do tipo B. Os casos tipo B ocorrem principalmente no inverno devido à posição e intensidade preferenciais nesta época do ano do ASAS e do anticiclone migratório, na retaguarda do SF, promovendo ventos de quadrante sul no oceano adjacente e de oeste sobre o continente. O movimento é ascendente (-10 hPa.s^{-1}) nos baixos níveis, a advecção térmica nos baixos níveis é positiva (entre 1 e $5 \text{ }^\circ\text{C.dia}^{-1}$) e o fluxo de umidade verticalmente integrado oscila em torno de $100 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$. Nos casos tipo A, que ocorrem com maior frequência na primavera, as brisas terrestre e marítima são configuradas, ocorre movimento subsidente em toda a troposfera, a advecção térmica é nula e não se observa fluxo de umidade significativo. Conclui-se que a instabilidade que favorece à ocorrência dos eventos de chuva pós-frontal concentra-se nos baixos níveis (até pouco acima de 850 hPa).

ABSTRACT

SYNOPTIC AND CLIMATOLOGICAL CHARACTERIZATION OF POST-FRONTAL RAINFALL EVENTS IN RIO DE JANEIRO

In Rio de Janeiro city, during some post-frontal conditions, stratiform rain occurs, even with the cold front (CF) located very far, at Northeast Brazil. This phenomenon is known as “rain caused by seawind circulation”, where stratiforms clouds, not associated with the CF, are responsible for light rains. Cases of post-frontal rain (Type B) and without rain (Type A) during the period from January 2000 to December 2007 were investigated aiming to depict the main physical mechanisms responsible for these events. In this work we present results of an eight-year climatology for Types A, B and also E (where CF don't shift to north). ERA-Interim Reanalysis, satellite images, observed precipitation from Alerta Rio and wind METAR were used in this study. The results show that more than half percent (57%) of CFs that strike Rio de Janeiro are of E Type, 26% A Type and 17% B Type. The B Type cases occur mainly in winter due to intensity and position of the SASH and migratory high, generating south winds at adjacent ocean and from west inside the continent. The vertical motion is ascendant (-10 hPa.s^{-1}) at low levels, the thermal advection at low levels is positive (between 1 and 5 $^{\circ}\text{C.dia}^{-1}$) and the vertically integrated moisture flux is about $100 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$. In the Type A cases, that occur mainly in the spring, the sea and onshore breezes are configured, with descending motion in the troposphere, no thermal advection nor vertically integrated moisture flux are observed. It follows that the instability associated with post-frontal precipitation is concentrated at low levels (by 850 hPa).

ÍNDICE TEMÁTICO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. METODOLOGIA E DADOS.....	3
2.1– Dados	3
2.2 – Metodologia	4
2.2.1 – Cálculo do fluxo de umidade verticalmente integrado.....	9
3. CLIMA	10
3.1 – Circulação Geral da Atmosfera	10
3.2 – Clima na América do Sul e na Região Sudeste do Brasil	11
3.3 – Sistemas Transientes que afetam a Região Sudeste do Brasil.....	24
3.4 – Caracterização climática do Estado e do Município do Rio de Janeiro..	26
4. RESULTADOS.....	44
4.1 – Climatologia de eventos pós-frontais.....	44
4.2 – Análise dos Compostos.....	48
4.3 – Estudo do Caso de 08/04/2010.....	53
4.4 – Estudo do Caso de 14/05/2010.....	69
5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	84
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 -Imagens de satélite de um caso pós-frontal ocorrido em 08/11/04 - 12Z (a) e de um caso tipo E ocorrido em 30/11/04 - 00 Z (b) no canal do infravermelho.	5
Figura 2.2 - Localização dos Aeroportos do Galeão (SBGL), Afonsos (SBAF), Jacarepaguá (SBJR) e Santos Dumont (SBRJ).	9
Figura 3.1 - Esquema da circulação geral da atmosfera, modelo de três células. (Fonte: Adaptada de Lutgens e Tarbuck (1995) por Martins et al. (2008))	10
Figura 3.2 – Campo de pressão ao NMM e direção e intensidade do vento à 10 metros: climatologia para o período de 1989 a 2010 para (a) verão – Dez/Jan/Fev, (b) outono - Mar/Abr/Mai, (c) inverno – Jun/Jul/Ago e (d) primavera - Set/Out/Nov. (Fonte: Reanálise ERA-Interim)	14
Figura 3.3 – Campo de temperatura do ar à 2 metros: climatologia para o período de 1989 a 2010 para (a) verão – Dez/Jan/Fev, (b) outono - Mar/Abr/Mai, (c) inverno – Jun/Jul/Ago e (d) primavera - Set/Out/Nov. (Fonte: Reanálise ERA-Interim)	17
Figura 3.4 – Campo de precipitação: climatologia Xie e Arkin (1997) para o período de 1979 a 2009 para (a) verão - Dez/Jan/Fev, (b) outono - Mar/Abr/Mai, (c) inverno – Jun/Jul/Ago e (d) primavera - Set/Out/Nov. (Fonte: Dados de Precipitação CMAP fornecidos pela NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, EUA)	20
Figura 3.5 – Campo de umidade relativa do ar à 2 metros: climatologia para o período de 1989 a 2010 para (a) verão – Dez/Jan/Fev, (b) outono - Mar/Abr/Mai, (c) inverno – Jun/Jul/Ago e (d) primavera - Set/Out/Nov. (Fonte: Reanálise ERA-Interim)	22
Figura 3.6 – Diagrama esquemático do funcionamento das brisas marítima/terrestre.	26
Figura 3.7 - Mapa físico do Município do Rio de Janeiro. (Fonte: http://www.terrabrasil.org.br/media/Nova_pasta/maparelevomunic.jpg)	27
Figura 3.8 - Distribuição espacial da temperaturas médias anuais entre 1931 e 1975. (Fonte: FIDERJ, 1978)	28

Figura 3.9 - Distribuição espacial de precipitação média anual entre 1931 e 1975. (Fonte: FIDERJ, 1978)	30
Figura 3.10 - Média anual de precipitação sobre o Município do Rio de Janeiro. (Fonte: Dereczynski, 2009)	31
Figura 3.11 - Médias sazonais de precipitação: (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera. (Fonte: Dereczynski, 2009)	33
Figura 3.12 - Distribuição espacial dos ventos (frequência e velocidade média por direção) média anual entre 1931 e 1975. (Fonte: FIDERJ, 1978)	35
Figura 3.13 - Rosa-dos-ventos para o aeroporto Santos Dumont no período de 00 Z às 23 Z, de 2000 a 2010. Fonte: Comando da Aeronáutica.	37
Figura 3.14 - Rosa-dos-ventos para o aeroporto Santos Dumont no período de (a) 00 Z às 02 Z, (b) 03 Z às 05 Z, (c) 06 Z às 08 Z, (d) 09 Z às 11 Z, (e) 12 Z às 14 Z, (f) 15 Z às 17 Z, (g) 18 Z às 20 Z e (h) 21 Z às 23 Z, de 2000 a 2010. Fonte: Comando da Aeronáutica.	38
Figura 3.15 - Rosa-dos-ventos para o aeroporto Galeão no período de 00 Z às 23 Z, de 1961 a 1990. Fonte: Comando da Aeronáutica.	40
Figura 3.16 - Rosa-dos-ventos para o aeroporto Galeão de 1961 a 1990, no período de: a) 00 às 02 Z, b) 03 às 05 Z, c) 06 às 08 Z, d) 09 às 11 Z, e) 12 às 14 Z, f) 15 às 17 Z, g) 18 às 20 Z e h) 21 às 23 Z. Fonte: Comando da Aeronáutica.	42
Figura 4.1 – Frequência média sazonal de eventos tipo A, tipo B e tipo E, conforme dados contidos na Tabela 4.2.	47
Figura 4.2 – Imagens de satélite de dois casos de passagens de SFs pelo Rio de Janeiro, onde ocorreram situações pós-frontais do tipo B: (a) 24/05/2006 – 7:30 Z, (b) 25/05/2006 - 00 Z , (c) 26/06/2006 – 23 Z e (d) 27/06/2006 – 12 Z.	48
Figura 4.3 – Compostos de pressão ao nível médio do mar (isolinhas a cada 2 hPa) e valores negativos de divergência do vento à superfície ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) para: (a) 90 casos tipo A e (b) 60 casos tipo B.	50
Figura 4.4 – Compostos de Omega (valores negativos em $\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$) e linhas de corrente em 1000 hPa para (a) casos tipo A e (b) casos tipo B.	50
Figura 4.5 – Compostos de umidade específica (intervalos a cada $1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) ao nível de 1000 hPa para (a) casos tipo A e (b) casos tipo B.	51

Figura 4.6 – Compostos de temperatura do ar (intervalos de 1 °C) e direção e intensidade do vento à superfície para (a) casos tipo A e (b) casos tipo B.	52
Figura 4.7 -Imagens de satélite dos dias 08 (a e b) e 09 (c e d) de abril de 2010 – 12 Z nos canais do infravermelho - IV (esquerda) e do visível - VIS (direita).	54
Figura 4.8 - Distribuição espacial da precipitação acumulada entre os dias 08/04/2010 12Z e 09/04/2010 12Z.	56
Figura 4.9 - Gráfico da série temporal do acumulado de 15 minutos de precipitação (mm) no período de 08 a 09/04/2010 - 12 Z para as estações de Bangu, Madureira e Grajaú.	56
Figura 4.10 - Série temporal do vento nos Aeroportos do Campo dos Afonsos (SBAF), Galeão (SBGL), Jacarepaguá (SBJR) e Santos Dumont (SBRJ), no período de 07/04/2010 - 12 Z até 09/04/2010 - 12 Z .	58
Figura 4.11 – Campos de pressão ao nível médio do mar (isolinhas a cada 2hPa) e valores negativos de divergência do vento à superfície ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) para (a) 08/04/10 – 12 Z e (b) 09/04/10 – 12 Z.	59
Figura 4.12 – Campos de Omega (sombreado - valores negativos em hPa.s^{-1}) e linhas de corrente em 1000 hPa para (a) 08/04/10 – 12 Z e (b) 09/04/10 – 12 Z.	60
Figura 4.13 – Campos umidade específica (intervalos a cada 1 g.kg^{-1}) ao nível de 1000 hPa, para (a) 08/04/10 – 12 Z e (b) 09/04/10 – 12 Z.	60
Figura 4.14 – Campos de temperatura do ar (intervalos de 1 °C) e direção e intensidade do vento em 1000 hPa (a) e (c) e advecção de temperatura ($^{\circ}\text{C.dia}^{-1}$) (b) e (d) para 08/04 – 12 Z (superior) e 09/04 – 12 Z (inferior).	61
Figura 4.15 – Campos de fluxo de umidade verticalmente integrado na camada 1000-300 hPa (intervalos a cada $50 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$) para (a) 08/04 – 12 Z e (b) 09/04 – 12 Z.	62
Figura 4.16 – Campos de omega (valores negativos em hPa.s^{-1}) e linhas de corrente em 08/04/10 - 12 Z nos níveis: (a) 850 hPa; (b) 700 hPa; (c) 500 hPa; (d) 300 hPa.	63

Figura 4.17 – Campos de temperatura do ar (intervalos a cada 1 °C) e direção e intensidade do vento (coluna esquerda) e advecção térmica (°C.dia ⁻¹) (coluna direita) em 08/04/10 - 12 Z para os níveis de 850 hPa (a e b), 700 hPa (c e d), 500 hPa (e e f) e 300 hPa (g e h).	64
Figura 4.18 – Campo de espessura (mgp) da camada 500 – 1000 para (a) 08/04 – 12 Z e (b) 09/04 – 12 Z.	66
Figura 4.19 – Campos de vorticidade relativa (10 ⁻⁵ .s ⁻¹) e linha de corrente em 300 hPa para (a) 08/04 – 12 Z e (b) 09/04 – 12 Z.	66
Figura 4.20 – Evolução temporal dos perfis verticais de (a) omega (hPa.s ⁻¹); (b) umidade específica (g.kg ⁻¹); (c) temperatura do ar (°C) e (d) vento horizontal (m/s) para o período de 04 a 11/04 sobre o ponto de grade da Reanálise ERA-Interim localizado em 22,5°S/43,5°W.	67
Figura 4.21 – Imagens de satélite dos dias 14 (a e b) e 15 (c e d) de maio de 2010 – 12 Z nos canais do infravermelho - IV (esquerda) e do visível - VIS (direita).	70
Figura 4.22 - Série temporal do vento nos Aeroportos do Campo dos Afonsos (SBAF), Galeão (SBGL), Jacarepaguá (SBJR) e Santos Dumont (SBRJ), no período de 13/05/2010 - 12 Z até 15/05/2010 - 12 Z .	71
Figura 4.23 – Campos de pressão ao nível médio do mar (isolinhas a cada 2 hPa) e valores negativos de divergência do vento à superfície (x 10 ⁻⁵ s ⁻¹) para (a) 14/05/10 – 12 Z e (b) 15/05/10 – 12 Z.	72
Figura 4.24 – Campos de Omega (sombreado - valores negativos em hPa.s ⁻¹) e linhas de corrente em 1000 hPa para (a) 14/05/10 – 12 Z e (b) 15/05/10 – 12 Z.	73
Figura 4.25 – Campos umidade específica (intervalos a cada 1 g.kg ⁻¹) ao nível de 1000 hPa, para (a) 14/05/10 – 12 Z e (b) 15/05/10 – 12 Z.	74
Figura 4.26 – Campos de temperatura do ar (intervalos de 1 °C) e direção e intensidade do vento em 1000 hPa (a) e (c) e advecção de temperatura (°C.dia ⁻¹) (b) e (d) para 14/05 – 12 Z (superior) e 15/05 – 12 Z (inferior).	74
Figura 4.27 – Campos de fluxo de umidade verticalmente integrado na camada 1000-300 hPa (intervalos a cada 50 kg.m ⁻¹ .s ⁻¹) para (a) 14/05 – 12 Z e (b) 15/05 – 12 Z.	76

Figura 4.28 – Campos de omega (valores negativos em $\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$) e linhas de corrente em 14/05/10 - 12 Z nos níveis: (a) 850 hPa; (b) 700 hPa; (c) 500 hPa; (d) 300 hPa. 77

Figura 4.29 – Campos de temperatura do ar (intervalos a cada $1\text{ }^{\circ}\text{C}$) e direção e intensidade do vento (coluna esquerda) e advecção térmica ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{dia}^{-1}$) (coluna direita) em 14/05/10 - 12 Z para os níveis de 850 hPa (a e b), 700 hPa (c e d), 500 hPa (e e f) e 300 hPa (g e h). 78

Figura 4.30 – Campo de espessura (mgp) da camada 500 – 1000 para (a) 14/05/10 – 12 Z e (b) 15/05/10 – 12 Z. 79

Figura 4.31 – Campos de vorticidade relativa ($10^{-5}\cdot\text{s}^{-1}$) e linha de corrente em 300 hPa para (a) 14/05 – 12 Z e (b) 15/05 – 12 Z. 80

Figura 4.32 – Evolução temporal dos perfis verticais de (a) omega ($\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$); (b) umidade específica ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$); (c) temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) e (d) vento horizontal (m/s) para o período de 10 a 17/05 sobre o ponto de grade da Reanálise ERA-Interim localizado em $22,5^{\circ}\text{S}/43,5^{\circ}\text{W}$. 81

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1	Data e hora dos casos considerados tipo A e B no período de 2000 a 2007.	7
Tabela 3.1	Climatologia de SFs que passaram pelas bandas latitudinais 40 e 35°S, 35 e 25°S, 25 e 20°S e norte de 20°S e que organizaram a convecção tropical (média mensal para o período de 1975 a 1984). (Fonte: Oliveira, 1986)	25
Tabela 4.1	Frequência de eventos do tipo A, B e E no período de janeiro de 2000 a dezembro de 2007.	45
Tabela 4.2	Levantamento sazonal dos casos pós-frontais do tipo A (sem chuva), B (com chuva) e E (excluídos) no período do outono de 2000 até a primavera de 2007, com base na Tab. 4.1.	46
Tabela 4.3	Resumo das principais diferenças entre os compostos formados por 90 casos tipo A e 60 casos tipo B. Valores aproximados na região do Rio de Janeiro.	52
Tabela 4.4	Precipitação (mm) acumulada em 24 h no período entre os dias 08/04/10 12Z e 09/04/10 12 Z. Fonte: Alerta Rio	55
Tabela 4.5	Resumo das principais diferenças entre o caso A (14/05) e o caso B (08/04), estudados. Quando não especificado os valores são referentes ao Rio de Janeiro.	83

ÍNDICE DE SIGLAS

AB	Alta da Bolívia
AM	Anticiclone Migratório
ASAS	Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul
ASPS	Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul
BC	Baixa do Chaco
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ERA-Interim	Reanálise do ECMWF
GrADS	Grid Analysis and Display System
PNMM	Pressão ao Nível Médio do Mar
RMRJ	Região Metropolitana do Rio de Janeiro
SBAF	Aeroporto Campo dos Afonsos
SBGL	Aeroporto Galeão
SBJR	Aeroporto de Jacarepaguá
SBRJ	Aeroporto Santos Dumont
SCM	Sistema Convectivo de Mesoescala
SF	Sistema Frontal
VCAN	Vórtice Ciclônico do Nordeste
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Na Região Sudeste do Brasil, os sistemas frontais (SFs) são os principais sistemas meteorológicos responsáveis pela precipitação (Satyamurty et al., 1998). Uma climatologia de dez anos de eventos de chuvas intensas (total pluviométrico diário igual ou superior a 30 mm) para a cidade do Rio de Janeiro no período de janeiro de 1997 a dezembro de 2006, apresentada em Dereczynski et al (2009), mostra a frequência de ocorrência de sistemas meteorológicos associados a 160 eventos entre 1997 e 2006. Os sistemas meteorológicos associados a tais eventos são os sistemas frontais, a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), os Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs) e a circulação marítima, com respectivamente 77, 13, 8 e 2% dos 160 casos estudados. O reduzido número de casos de chuva por efeito de circulação marítima é razoável, visto que as chuvas geradas por tal fenômeno são, em sua maioria, de fraca intensidade (inferior a 30 mm).

Em geral, após a passagem dos SFs a atuação do anticiclone migratório (AM) pós-frontal na região do Rio de Janeiro, com temperaturas mais amenas, reduzido teor de umidade e maiores valores de pressão atmosférica, promove condições de céu claro ou com poucas nuvens, boa visibilidade e ventos calmos. Contudo, em determinadas ocasiões, após a passagem dos SFs, continua a chover com intensidade fraca a moderada no Rio de Janeiro, mesmo quando tal sistema encontra-se bastante deslocado para norte, atingindo o norte do Espírito Santo ou sul da Bahia. Este fenômeno é conhecido na região como precipitação devido ao “efeito de circulação marítima”, que promove a convergência e movimento ascendente no interior do continente, gerando nuvens estratiformes e chuvas fracas.

Como trabalho inicial no tema pós-frontal, Domingues e Dereczynski (2005) estudaram um caso de chuva pós-frontal por efeito de circulação marítima, ocorrido em 21/02/2005, no município do Rio de Janeiro. Seus resultados mostraram que as condições sinóticas que favoreceram a ocorrência de precipitação sobre a região, foram o posicionamento do AM e do sistema de baixa pressão associado ao SF sobre o oceano, acentuando o gradiente de pressão, e promovendo ventos de quadrante sul, atingindo a costa do Estado do Rio de Janeiro, mesmo após a passagem do SF. Além disto, havia nos baixos níveis movimento ascendente de fraca intensidade, convergência de massa até 850 hPa, convergência de umidade e valores moderados de razão de mistura provenientes da massa de ar mais úmida ao norte do Estado. Ainda em

Domingues e Dereczynski (2005), a verificação da previsão de alguns eventos de precipitação gerada por efeito de circulação marítima indicou que os modelos numéricos de circulação geral da atmosfera e os modelos de mesoescala não conseguem prever adequadamente a precipitação associada a este fenômeno.

Mello (2009) elaborou a comparação da evolução das condições entre dois casos pós-frontais no município do Rio de Janeiro, um com chuva (ocorrido em 07/09/06) e outro sem chuva pós-frontal (21/08/06). Para isto foram utilizados dados de precipitação coletados no município do Rio de Janeiro dos postos pluviométricos do Sistema Alerta Rio, dados observacionais de vento e dados da Reanálise do European Centre for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF) denominada ERA-INTERIM (Dee et al., 2011). Os resultados de Mello (2009) foram baseados na suposição de que a brisa marítima (mesoescala) alteraria sua intensidade no caso pós-frontal de acordo com a direção do vento sinótico (devido ao posicionamento do AM), causando ou não precipitação. No caso sem chuva, o vento era de quadrante norte após a passagem do SF, mesmo no horário de atuação da brisa marítima (que possui ventos de quadrante sul na região). Já no caso com chuva, o vento continuou de sul após a passagem do SF.

Como visto, estudos científicos sobre casos de precipitação gerada por efeito de circulação marítima são pouco comuns na literatura com apenas alguns estudos de casos, ficando o evento restrito ao conhecimento do previsor operacional. Neste sentido, o objetivo principal desta monografia é identificar o padrão sinótico característico das situações pós-frontais em que a precipitação continua a ocorrer sobre o município do Rio de Janeiro. Além disso, um objetivo secundário é estabelecer uma climatologia sazonal de passagem de SFs pela região para determinar a frequência de ocorrência de tais casos.

Neste trabalho são apresentados no capítulo 2 a metodologia e os dados utilizados no estudo. Uma revisão bibliográfica da climatologia do município e do Estado do Rio de Janeiro é apresentada no capítulo 3. No capítulo 4 estão os resultados do trabalho, incluindo: uma climatologia dos eventos pós-frontais; uma análise de compostos de casos com e sem chuva pós-frontal e por último dois estudos de casos de passagens de SFs ocorridos no município do Rio de Janeiro: um com (dia 08/04/2010) e outro sem (14/05/2010) precipitação pós frontal. Finalmente no capítulo 5 estão as conclusões e considerações finais.

CAPÍTULO 2: METODOLOGIA E DADOS

Neste capítulo, apresentam-se a metodologia e os dados observacionais e de modelagem numérica, utilizados para a elaboração da climatologia, dos compostos e dos estudos de casos de eventos pós-frontais. Também são apresentados os dados utilizados na confecção das rosas-dos-ventos apresentadas no capítulo 3.

2.1 Dados

1) Boletim Climanálise do CPTEC (disponibilizado no sítio <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/>), no período de janeiro de 2000 a dezembro de 2007;

2) Imagens de satélites GOES-10 e GOES-12 nos canais visível e infravermelho;

3) Dados observacionais de precipitação acumulados a cada 15 minutos nos 32 postos pluviométricos do Sistema Alerta Rio (GeoRio), obtidos através do sítio <http://www.sistema-alerta-rio.com.br/>;

4) Dados da Reanálise ERA-Interim

A Reanálise do European Centre for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF) denominada ERA-Interim (Dee et al., 2011) é a versão mais recente das reanálises atmosféricas globais do ECMWF. Sendo sucessora da reanálise Era-40 (Uppala et al. 2005), apresenta alguns avanços no esquema de assimilação de dados, no uso de observações, na física do modelo, número de níveis na vertical, representação do ciclo hidrológico, entre outros. A reanálise ERA-Interim é disponibilizada no sítio http://data-portal.ecmwf.int/data/d/interim_daily/ na resolução horizontal de 1,5° e com 37 níveis na vertical, para o período de 1 de janeiro de 1979 até os dias atuais, nos horários 00, 06, 12 e 18 Z.

As variáveis utilizadas foram de: pressão atmosférica ao nível médio do mar (Pa), componentes zonal e meridional do vento ($m.s^{-1}$), temperatura do ar (K), movimento vertical ($Pa.s^{-1}$) e umidade específica ($kg.kg^{-1}$) e altura geopotencial (mgp), para os níveis da superfície e isobáricos de 1000 a 100 hPa.

5) Totais pluviométricos mensais sobre a América do Sul

A climatologia sazonal de precipitação (Xie e Arkin 1997) apresentada no capítulo 3 foi elaborada para o período de 1979 a 2009. Os dados de precipitação (escrever por extenso CMAP) CMAP são fornecidos pela (idem) NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, EUA (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.cmap.html>).

6) Dados observacionais de ventos

Os dados de vento utilizados nas rosas-dos-ventos apresentadas no capítulo 3 são dados de METAR referentes aos Aeroportos Santos Dumont (no período de 2000 a 2010) e Galeão (de 1961 a 1990) obtidos através do sítio <http://www.redemet.aer.mil.br/>.

O software utilizado para a construção das rosas do Santos Dumont foi o WRPLOT View da Lakes Environmental, para o ambiente Windows, e o utilizado para o Aeroporto do Galeão foi o Microsoft Office Excel 2007.

Ambas as rosas foram elaboradas em intervalos de três horas, visando a obtenção do ciclo diurno característico do vento nestas localidades.

2.2 Metodologia

Neste item serão apresentados os passos realizados elaboração da climatologia e estudos de casos pós-frontais.

Primeiramente foi feito um levantamento de todos os casos de passagens de sistemas frontais (SFs) pelo Estado do Rio de Janeiro no período de 2000 a 2007, a partir do Boletim Climanálise do CPTEC, para contabilizar o número de SFs, totalizando-se 347 eventos.

As imagens de satélites GOES-10 e GOES-12 (canal infravermelho), foram utilizadas para separar os eventos em casos pós-frontais e casos excluídos (casos do tipo E), em que havia a atuação de outras forçantes, além das que atuam em conjunto com o SF.

Os casos pós-frontais, foram aqueles onde se podia observar o deslocamento da frente para norte, muitas vezes já se posicionado no sul da Região Nordeste. Casos do tipo E (excluídos), foram aqueles em que o SF se deslocou de forma lenta, configurando a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) ou casos em que a banda de

nebulosidade frontal se deslocou pelo oceano, sem penetrar no continente; e ainda casos em que o SF se dissipou sobre o Rio de Janeiro e não se pode definir a situação de passagem da frente, ou seja, nos quais não podia se classificar o evento pós-frontal.

Os casos pós-frontais e os excluídos totalizaram 150 e 197 eventos, respectivamente. A Figura 2.1 exemplifica como foi feita a separação inicial em casos pós-frontais e casos excluídos, a partir da disposição da nebulosidade associada ao SF, que no caso tipo E (Fig. 2.1 b) configurou um episódio de ZCAS.

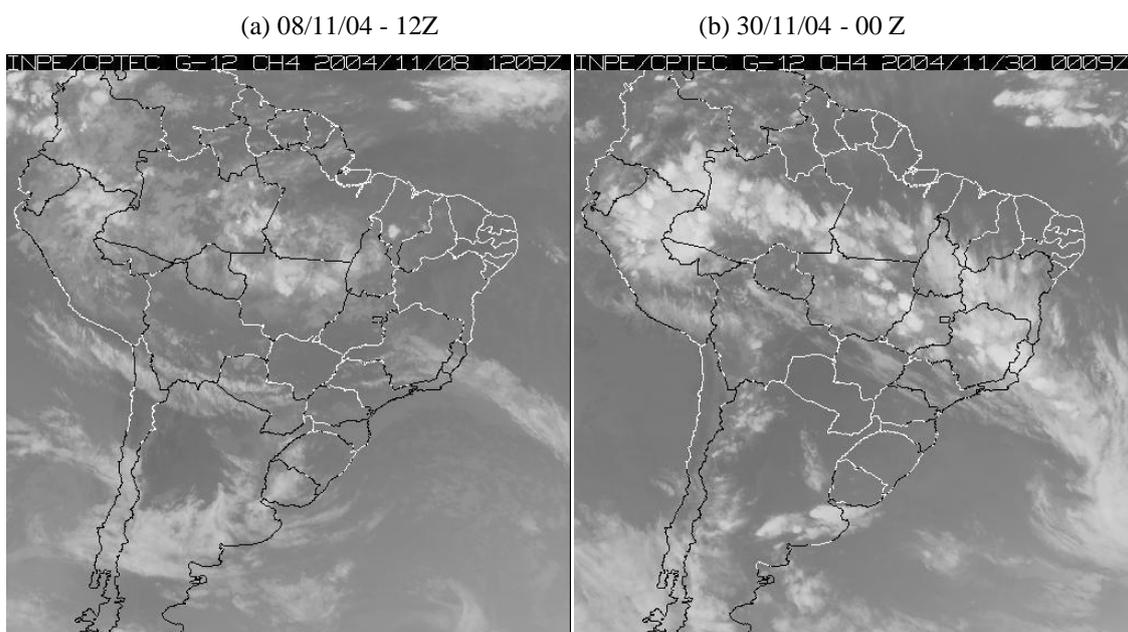


Figura 2.1 -Imagens de satélite de um caso pós-frontal ocorrido em 08/11/04 - 12Z (a) e de um caso tipo E ocorrido em 30/11/04 - 00 Z (b) no canal do infravermelho.

Com o objetivo de definir o caráter dos eventos pós-frontais quanto à ocorrência de chuva, foram utilizados os dados observacionais de precipitação dos postos pluviométricos do Sistema Alerta Rio (GeoRio). O acumulado de precipitação analisado para cada caso selecionado foi das 24 horas posteriores à data especificada, ou seja, se o caso ocorreu por exemplo no dia 29/07/2007 às 00 Z, o total de precipitação analisado foi no período de 29/07/2007 00:15 Z até 30/07/2007 00 Z. Com isto, os casos foram divididos em casos do tipo A e B, onde:

- 1) Os casos do tipo A foram aqueles em que a precipitação cessou logo após a passagem do SF.
- 2) Nos casos do tipo B, após a ocorrência da chuva frontal, verificou-se a ocorrência de chuva estratiforme, mesmo sem a presença do SF e de sua nebulosidade convectiva (o

critério utilizado para determinar este tipo de caso foi ocorrer acumulado de pelo menos 5 mm em, no mínimo, 4 estações).

A Tabela 2.1 apresenta as datas e os horários da ocorrência dos casos pós-frontais, com um total de 90 casos do tipo A e 60 casos do tipo B. As diferenças entre os casos A e B serão discutidas no capítulo de resultados (seção 4).

Tabela 2.1 - Data e hora dos casos considerados tipo A (90 casos) e tipo B (60 casos) no período de 2000 a 2007.

CASO A				CASO B			
Data	hora (TMG)						
21/01/2000	0	25/03/2004	0	19/02/2000	12	05/06/2004	12
13/03/2000	12	28/04/2004	12	03/04/2000	12	06/07/2004	12
21/04/2000	0	03/05/2004	12	06/07/2000	0	12/07/2004	0
29/05/2000	0	30/08/2004	12	14/07/2000	12	21/07/2004	12
22/06/2000	0	20/09/2004	12	26/07/2000	12	09/08/2004	12
25/06/2000	0	13/01/2005	12	08/10/2000	12	04/09/2004	12
20/08/2000	0	07/04/2005	0	18/05/2001	12	05/10/2004	12
05/09/2000	0	11/05/2005	12	13/07/2001	12	08/11/2004	12
07/09/2000	0	27/05/2005	12	18/09/2001	0	13/11/2004	12
28/09/2000	12	25/06/2005	0	25/02/2002	12	20/11/2004	12
02/10/2000	12	21/07/2005	0	22/03/2002	12	21/02/2005	0
02/11/2000	0	12/08/2005	12	23/05/2002	0	26/03/2005	0
08/11/2000	12	20/08/2005	12	26/06/2002	0	01/05/2005	12
07/12/2000	0	03/09/2005	12	08/09/2002	12	08/07/2005	12
01/06/2001	0	28/09/2005	12	08/11/2002	0	08/09/2005	0
04/10/2001	0	03/10/2005	12	24/03/2003	0	21/09/2005	0
16/10/2001	0	16/10/2005	0	29/03/2003	0	01/04/2006	12
23/10/2001	12	13/11/2005	0	08/04/2003	0	28/04/2006	0
06/11/2001	12	27/11/2005	0	13/04/2003	12	12/05/2006	0
02/12/2001	12	04/12/2005	0	03/05/2003	12	25/05/2006	0
11/05/2002	0	04/02/2006	12	29/05/2003	12	01/06/2006	12
09/07/2002	0	28/03/2006	0	13/07/2003	12	06/06/2006	12
14/07/2002	0	21/04/2006	12	27/08/2003	0	27/06/2006	12
24/07/2002	0	23/04/2006	12	12/09/2003	0	30/07/2006	12
12/08/2002	0	03/05/2006	12	15/09/2003	0	30/08/2006	0
24/08/2002	0	13/06/2006	12	04/11/2003	0	05/09/2006	0
26/09/2002	12	01/07/2006	0	04/01/2004	0	26/09/2006	0
02/10/2002	12	11/07/2006	12	17/01/2004	0	30/05/2007	0
27/10/2002	12	21/08/2006	12	07/02/2004	12	29/07/2007	0
02/11/2002	12	11/09/2006	12	21/05/2004	0	06/08/2007	0
28/11/2002	0	15/10/2006	12				
09/01/2003	0	08/11/2006	12				
17/04/2003	0	22/11/2006	0				
07/05/2003	12	02/12/2006	0				
22/05/2003	0	13/02/2007	0				
26/05/2003	0	11/04/2007	12				
07/06/2003	12	10/05/2007	0				
22/06/2003	12	25/05/2007	0				
17/08/2003	12	28/05/2007	12				
03/09/2003	12	04/06/2007	12				
19/09/2003	0	30/06/2007	0				
01/10/2003	12	19/07/2007	12				
15/10/2003	12	20/09/2007	0				
25/10/2003	12	01/10/2007	0				
11/11/2003	0	17/11/2007	12				

Após a classificação dos casos nas categorias A e B, foram elaborados compostos, a fim de obter-se uma caracterização climatológica e os aspectos relevantes entre os dois tipos de casos, com os 90 casos tipo A e 60 casos tipo B, a partir de dados da Reanálise ERA-Interim.

Os campos analisados nos compostos foram de: pressão atmosférica ao nível médio do mar (hPa) e convergência dos ventos ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) à superfície; omega ($\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$) e linhas de corrente em 1000 hPa; umidade específica ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) em 1000 hPa; temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) e direção e intensidade do vento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) em 1000 hPa.

Para a plotagem dos campos foi utilizada a versão em LINUX do programa Grid Analysis and Display System (GrADS), desenvolvido no Departamento de Meteorologia da Universidade de Maryland (USA) – Center for Ocean-Land Atmosphere Interactions (COLA).

Além dos compostos, também foram realizados dois estudos de casos:

- 1) Caso do tipo B, ocorrido em 08/04/2010 12 Z;
- 2) Caso do tipo A, ocorrido em 14/05/2010 12 Z.

Nos estudos de casos foram consideradas análises em outros níveis na troposfera, além da superfície e de 1000 hPa. Os campos analisados próximos ao nível da superfície foram os mesmos campos dos compostos, além do campo de advecção de temperatura ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{dia}^{-1}$). Os campos analisados em níveis isobáricos, 850, 700, 500 e 300 hPa, foram os mesmos analisados ao nível de 1000 hPa, incluindo os campos de: fluxo de umidade verticalmente integrado ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) na camada 1000-300 hPa; espessura (mgp) da camada 500 – 1000 hPa; vorticidade relativa ($\times 10^{-5}\cdot\text{s}^{-1}$) em 300 hPa e a evolução temporal dos perfis verticais de omega, umidade específica, temperatura do ar e direção e intensidade do vento horizontal sobre um ponto localizado no município do Rio de Janeiro ($22,5^{\circ}\text{S}/43,5^{\circ}\text{W}$).

Para detalhamento dos casos também foi utilizado o software ArcGIS para a plotagem da precipitação, além de dados METAR de vento dos Aeroportos do Galeão (SBGL), Afonsos (SBAF), Jacarepaguá (SBJR) e Santos Dumont (SBRJ), plotados através do software MATLAB (ver localização dos aeroportos na Figura 2.2).

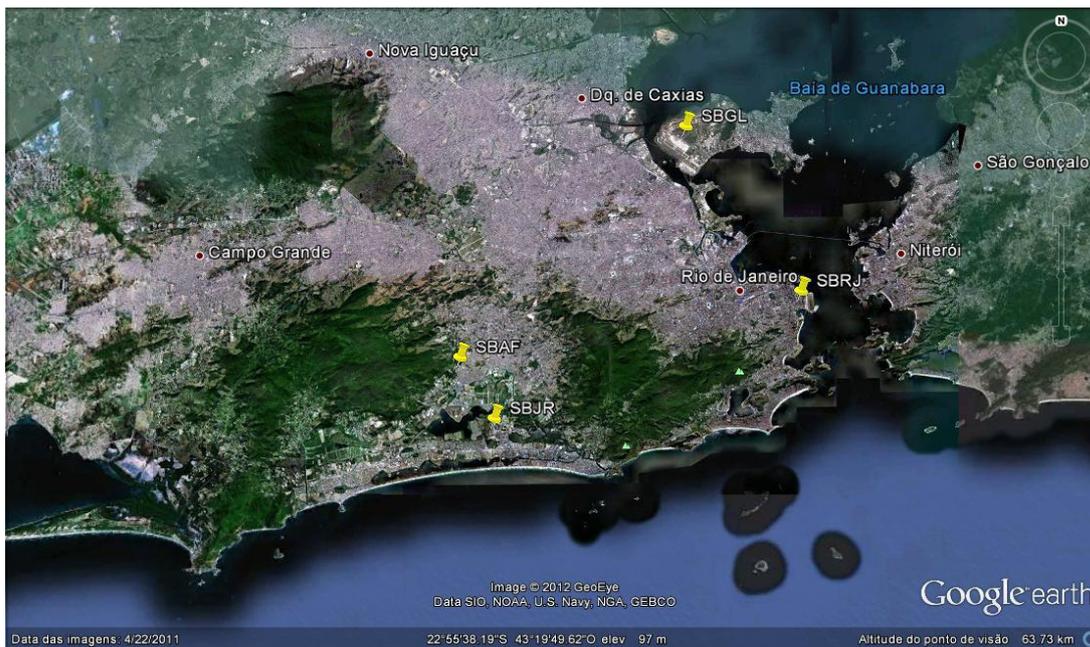


Figura 2.2 - Localização dos Aeroportos do Galeão (SBGL), Afonsos (SBAF), Jacarepaguá (SBJR) e Santos Dumont (SBRJ).

2.2.1 Cálculo do fluxo de umidade verticalmente integrado

Para o cálculo do fluxo de umidade verticalmente integrado foi usada a função VINT do GrADS, que considera o seguinte cálculo:

$$\frac{f}{g} \times \sum (expr \times \Delta(level))$$

Onde $f=100$ e $g=9,8 \text{ m.s}^{-2}$ (aceleração da gravidade) são fatores de escala, $expr$ é a expressão a ser integrada verticalmente e $\Delta(level)$ é a diferença entre o nível do topo e da superfície em hPa, com isto, a unidade do fluxo de umidade verticalmente integrado é $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$.

CAPÍTULO 3: CLIMA

O objetivo deste capítulo é descrever as características climáticas do Estado e do Município do Rio de Janeiro, abordando o comportamento das variáveis meteorológicas e dos sistemas sinóticos atuantes na região de estudo. Os seguintes tópicos serão apresentados: Circulação geral da atmosfera; Clima na América do Sul e na Região Sudeste do Brasil; Sistemas Transientes que afetam a Região Sudeste do Brasil e Caracterização climática do Estado e do Município do Rio de Janeiro.

3.1 Circulação Geral da Atmosfera

A incidência de radiação solar sobre a Terra gera aquecimento diferencial entre as faixas latitudinais do planeta, gerando gradientes de temperatura e pressão entre o equador e os pólos, que para serem reduzidos dão origem a circulação geral da atmosfera (Figura 3.1). A circulação geral é dividida em 4 células de circulação: Hadley (norte-sul), Walker (leste-oeste), Ferrel (norte-sul) e Célula Polar (norte-sul). No padrão de escoamento médio encontram-se também os sistemas permanentes que atuam no globo.

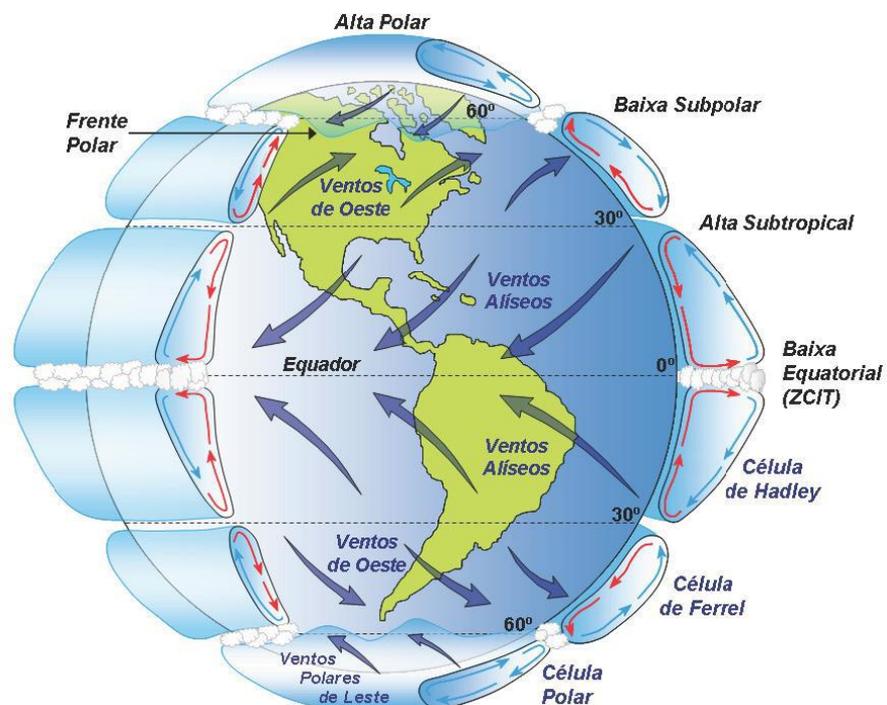


Figura 3.1- Esquema da circulação geral da atmosfera, modelo de três células. (Fonte: Adaptada de Lutgens e Tarbuck (1995) por Martins et al. (2008))

Devido à posição do sol, o maior aquecimento se dá na região equatorial, promovendo a formação de regiões de baixas pressões, denominada doldrums, que se localiza entre 30°N e 30°S de latitude. Nestas regiões os ventos recebem o nome de alísios, que têm direção de sudeste (no Hemisfério Sul) e de nordeste (no Hemisfério Norte) e convergem em torno de 0° de latitude, ramo ascendente da célula de Hadley. Em sua ascensão ocorre resfriamento devido a perda de umidade por condensação e precipitação, seu retorno em altitude é chamado de contra-alísios (sentido contrário), descendendo em torno de 30° de latitude, na zona dos cinturões anticiclônicos, aquecendo-se novamente e formando os alísios. Esta célula é denominada Hadley-Walker, sendo Hadley no sentido norte-sul e Walker no sentido leste-oeste. Na realidade não há como separar estas duas células pois geralmente ocorrem simultaneamente (Climanálise, 1986).

A região de convergência dos alísios dos dois hemisférios sobre os oceanos equatoriais, em que há movimento ascendente e altos índices pluviométricos, denomina-se Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).

A zona dos cinturões anticiclônicos, caracterizada por estabilidade e ventos calmos, é conhecida como “latitude dos cavalos”, pois as embarcações a vela que por lá passavam no sec. XVII, ao se deparar com calmarias típicas dos centros de alta pressão necessitavam reduzir seu peso e racionar água, lançando por vezes seus cavalos ao mar (Byers, 1959).

A célula de Ferrel é uma célula de circulação meridional, que se localiza entre as latitudes de 30° e 60° de cada hemisfério, possui ramo descendente na zona dos cinturões anticiclônicos e ramo ascendente em 60° de latitude, zona temperada, onde convergem os ventos de sudeste e noroeste (HS) e nordeste e sudoeste (HN). Nesta zona situam-se baixas pressões que são importantes regiões de convergência extratropical, onde o ar quente e úmido encontra-se com ar frio e seco, originando os fenômenos meteorológicos mais importantes das latitudes médias, os sistemas frontais (SFs). Parte do ar que ascende próximo à latitude de 60°, desce nos pólos (90° S e 90° N), formando a célula polar. Esta é uma célula de circulação indireta, pois nela o ar sobe frio e desce quente, ao contrário do que ocorre na célula de Hadley (Byers, 1959).

3.2. Clima na América do Sul e na Região Sudeste do Brasil

Destacando-se os sistemas que atuam na América do Sul e regiões adjacentes, posicionados em torno da faixa latitudinal de 30°S, estão os dois anticiclones quase-

estacionários: Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul (ASPS) (Figura 3.2). Tais sistemas são responsáveis pelas condições de estabilidade sobre o continente. Estes sistemas apresentam-se durante todo o ano com algumas variações sazonais, na posição e intensidade, interagindo com os sistemas frontais e outros sistemas transientes que se propagam pelo continente.

O ASPS não possui influência direta no continente devido a Cordilheira dos Andes, que bloqueia sua circulação restringindo-a ao Oceano Pacífico, levando ar frio no sentido sul-norte a oeste das Cordilheiras. O ASPS desvia para leste os sistemas polares migratórios que passam em sua porção sul sobre o Oceano Pacífico. Ele também sofre modificações sazonais em suas características, intensificando-se e deslocando-se para norte, no inverno e primavera e enfraquecendo e deslocando-se para sul no período do verão e outono.

A Região Sudeste do Brasil e oceano adjacente sofrem influência direta do ASAS durante todo o ano, que localiza-se a leste do continente sul-americano, com fracos ventos em seu centro, intensificando-se em direção à sua periferia. Tal sistema é responsável pelas condições de céu claro ou com pouca nebulosidade e ventos de direção nordeste de fraca intensidade que predominam na região.

Nos meses de verão (Figura 3.2 a) o ASAS (com centro de 1020 hPa, próximo a 32°S/5°W) encontra-se mais enfraquecido e deslocado para sul em relação às outras estações. Observam-se, associados a este sistema, baixos valores de pressão atmosférica no litoral da Região Sudeste do Brasil, entre 1012 e 1013 hPa, e ventos na direção NE de intensidade média de 4 m/s.

No período do verão, no interior do continente Sul Americano predominam também baixos valores de pressão atmosférica, com mínimo de 1008 hPa no centro do sistema denominado de Baixa do Chaco (BC), localizado a aproximadamente 22°S/62°W, entre o Paraguai, Bolívia e sudoeste do Brasil e Alta da Bolívia (AB) em altos níveis (Figura não apresentada). O mecanismo básico de formação da AB é o movimento ascendente de escala regional devido a intensa atividade convectiva sobre a Amazônia (Satyamurty et al, 1998). A AB é deslocada em relação aos baixos níveis, localizando-se principalmente sobre a Região Centro-Oeste do Brasil. Seu principal efeito é subsidência induzida em baixos níveis sobre a Região Nordeste, a partir de um cavado em altos níveis (Cavado do Nordeste). Pode também intensificar a convecção na região frontal, a partir da divergência em altitude. (Satyamurty et al., 1998)

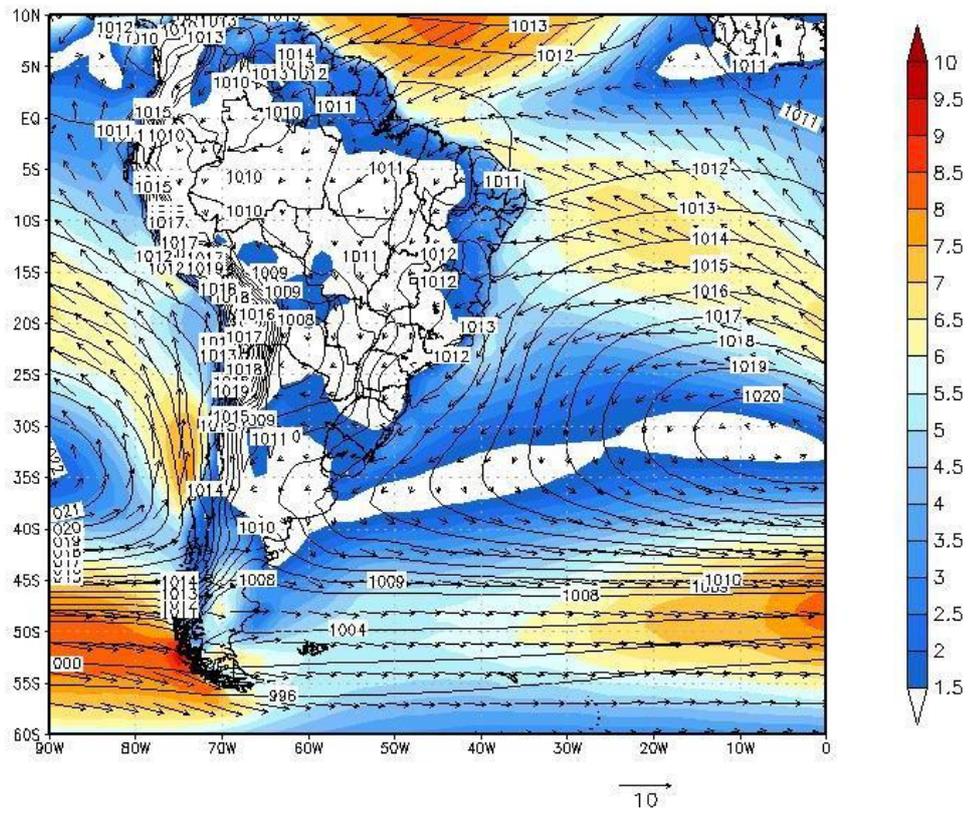
No outono (Figura 3.2 b), o centro do ASAS (1020 hPa) localiza-se em torno de $31^{\circ}\text{S}/0^{\circ}\text{W}$, período em que encontra-se mais afastado do continente. Os valores de pressão no litoral da Região Sudeste oscilam entre 1013 hPa em março e 1017 hPa em maio, mês com menor intensidade do vento ($\sim 1,5$ m/s) na região, proveniente de ENE. Neste período observa-se o menor gradiente de pressão no litoral.

No inverno (Figura 3.2 c) o ASAS, com seu centro de 1024 hPa localizado a aproximadamente $27^{\circ}\text{S}/5^{\circ}\text{W}$, atua no continente devido a extensão de sua borda, que posiciona-se mais próximo ao continente em relação às outras estações. As pressões no litoral da Região Sudeste atingem valores de 1021 hPa no mês de julho. Os ventos são de direção NE, com intensidade média em torno de 4 m/s. Neste período, o intenso movimento de ar descendente dificulta a formação de distúrbios nas áreas continentais e oceânicas (Riehl, 1965).

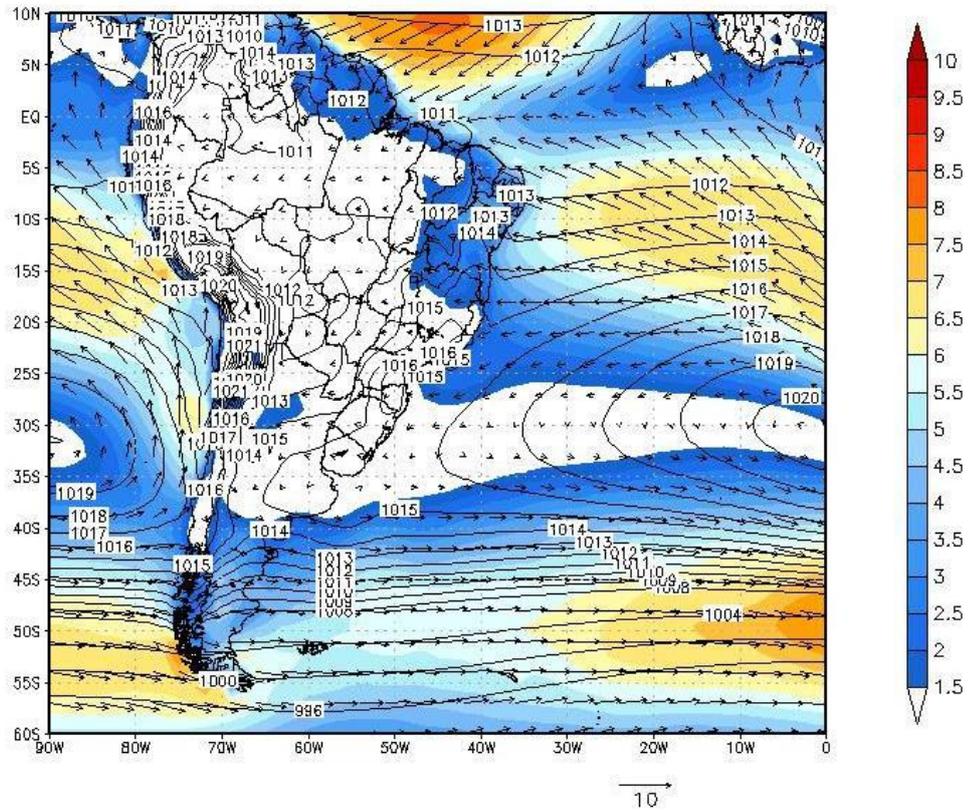
Na primavera (Figura 3.2 d) o centro do ASAS de 1023 hPa, localiza-se próximo de $30^{\circ}\text{S}/3^{\circ}\text{W}$. A borda do sistema ainda influencia o litoral da Região Sudeste, principalmente no início do período. As pressões declinam de 1018 hPa em setembro a 1013 hPa em novembro. A direção média do vento é de ENE com velocidade média em torno de 4,5 m/s.

A direção e intensidade do vento no litoral da Região Sudeste são determinadas pelo posicionamento e intensidade do gradiente de pressão entre o continente e o centro do ASAS. No verão, o intenso gradiente de pressão contribui para aumento da intensidade dos ventos na costa da Região Sudeste do Brasil e no outono o menor gradiente de pressão promove um enfraquecimento dos ventos.

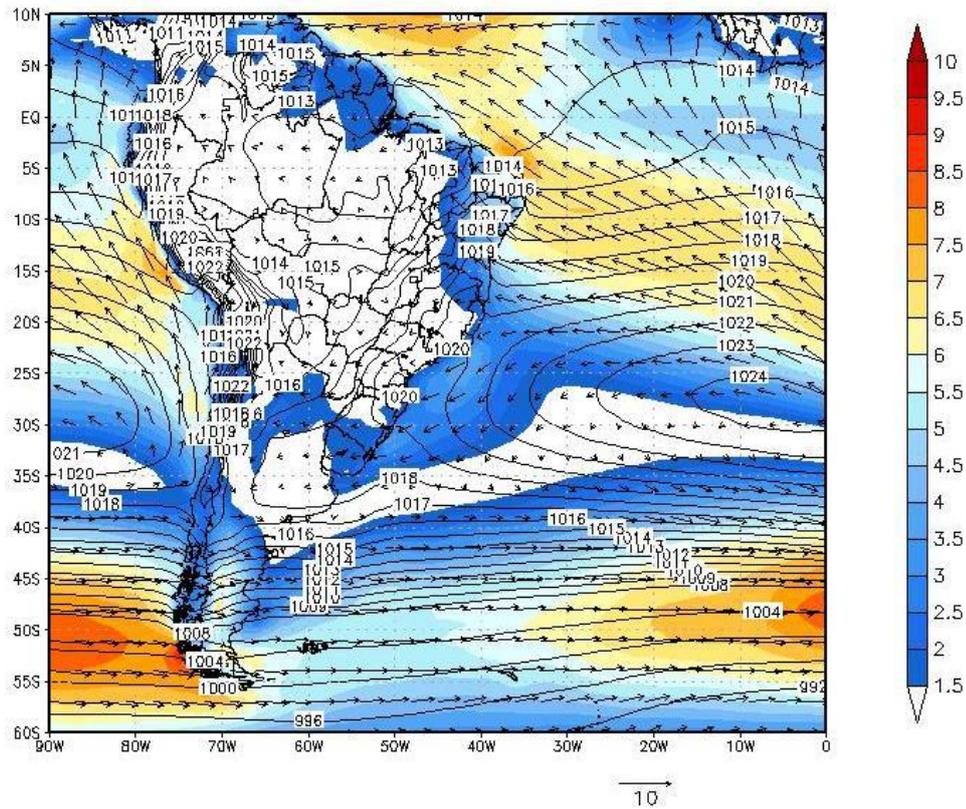
(a) verão – Dez/Jan/Fev



(b) outono - Mar/Abr/Mai



(c) inverno – Jun/Jul/Ago



(d) primavera - Set/Out/Nov

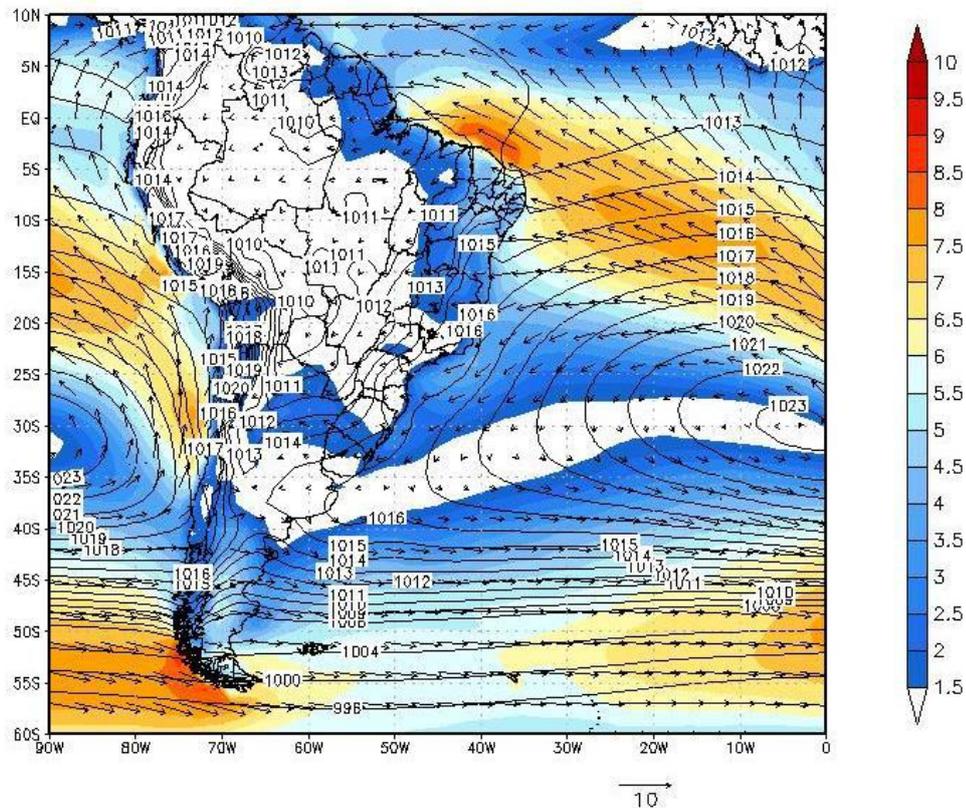


Figura 3.2 – Campo de pressão ao NMM e direção e intensidade do vento à 10 metros: climatologia para o período de 1989 a 2010 para (a) verão – Dez/Jan/Fev, (b) outono - Mar/Abr/Mai, (c) inverno – Jun/Jul/Ago e (d) primavera - Set/Out/Nov. (Fonte: Reanálise ERA-Interim)

A distribuição da temperatura do ar à superfície é apresentada na Figura 3.3. Como esperado, nas regiões próximas ao equador, onde maiores quantidades de radiação solar são recebidas ao longo do ano, as temperaturas são mais elevadas. A variação anual de temperatura é muito pequena nas latitudes subtropicais, devido a radiação solar não mudar significativamente ao longo do ano sobre a região e também sobre os oceanos. Nas áreas oceânicas, os altos valores de calor específico e a forte mistura na camada superficial leva a uma grande inércia térmica dos mesmos, reduzindo as variações de temperatura durante o ano (Peixoto e Oort, 1993).

Durante o verão (Figura 3.3 a), no litoral da Região Sudeste, a temperatura assume valores médios entre 25 e 26 °C. O interior do continente apresenta temperaturas altas (~27 °C), na posição coincidente da BC.

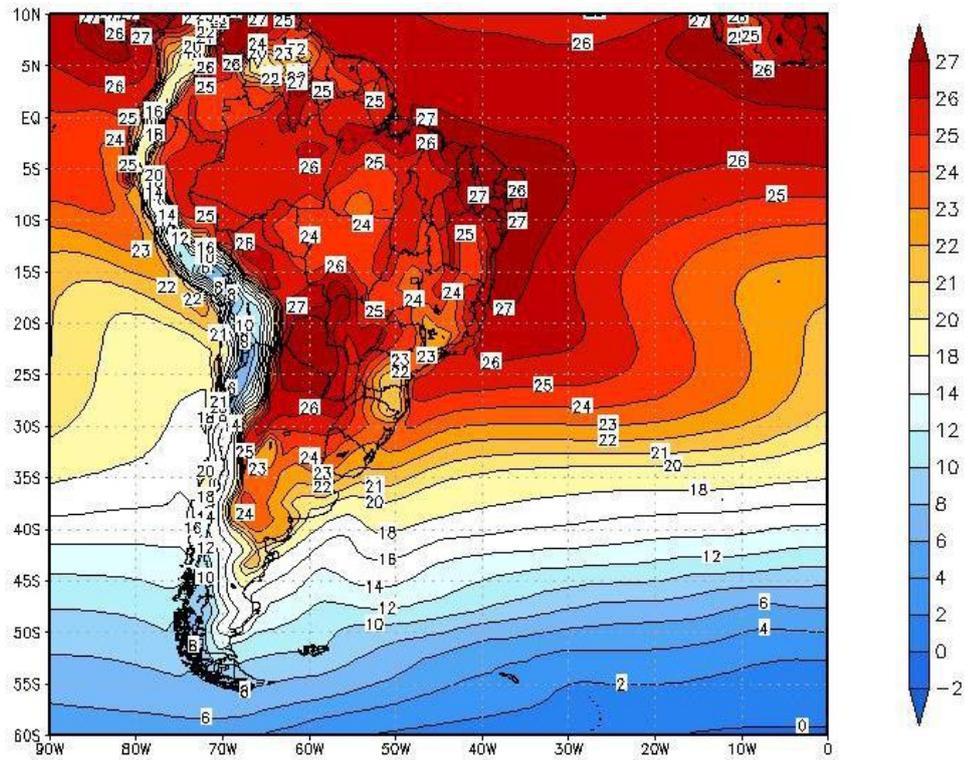
No outono (Figura 3.3 b) observa-se advecção de ar frio pelo interior do continente, próximo ao litoral Sul e Sudeste do Brasil, a partir do sul, proveniente de massas de ar de origem polar, provocando queda nas temperaturas que oscilam entre 21 e 25 °C no litoral Sudeste. Observa-se também, associado à advecção de temperatura, um intenso gradiente de temperatura no litoral entre o oceano e o continente.

No inverno (Figura 3.3 c) a advecção de ar frio é intensificada no interior do continente, cobrindo toda a Região Sul e atingindo a Bahia. O litoral da Região Sudeste apresenta forte gradiente de temperatura, com valores oscilando entre 18 e 22 °C. Os mais fortes gradientes meridionais de temperatura do ar tanto no inverno, quanto no verão são encontrados nas latitudes médias (Peixoto e Oort, 1993).

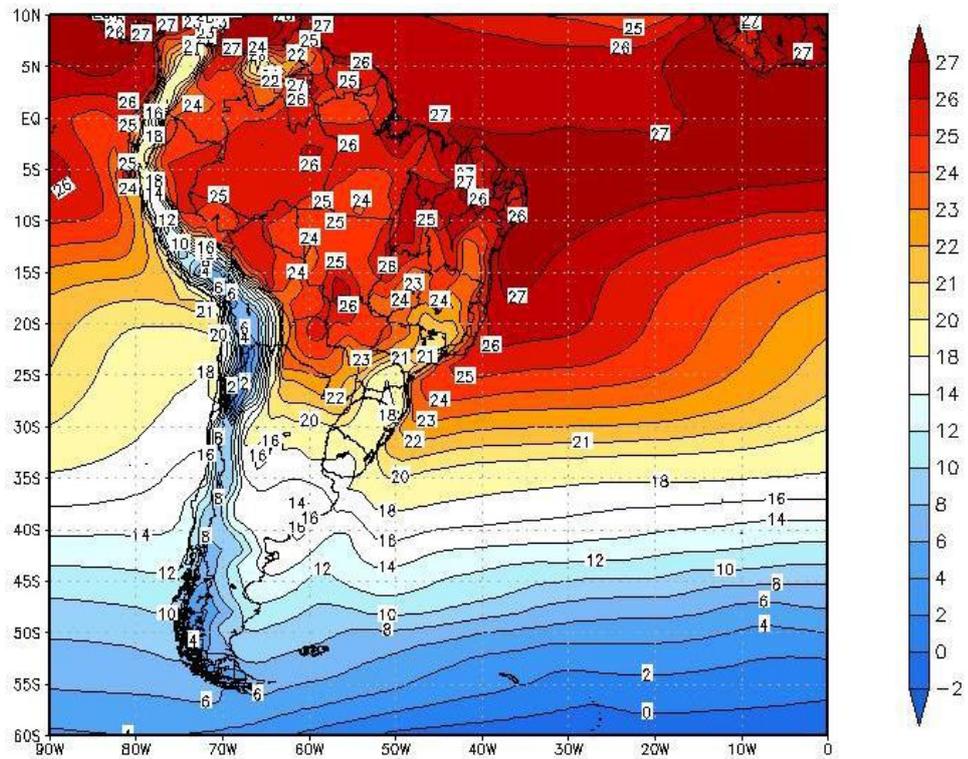
Na primavera (Figura 3.3 d) observa-se o recuo da advecção de ar frio, enfraquecendo o gradiente de temperatura. A temperatura no litoral da Região Sudeste fica em torno de 22 e 23 °C.

Na primavera, durante episódios de El Niño, há condições secas na Região Sudeste causando significativo aquecimento (Grimm, 2009).

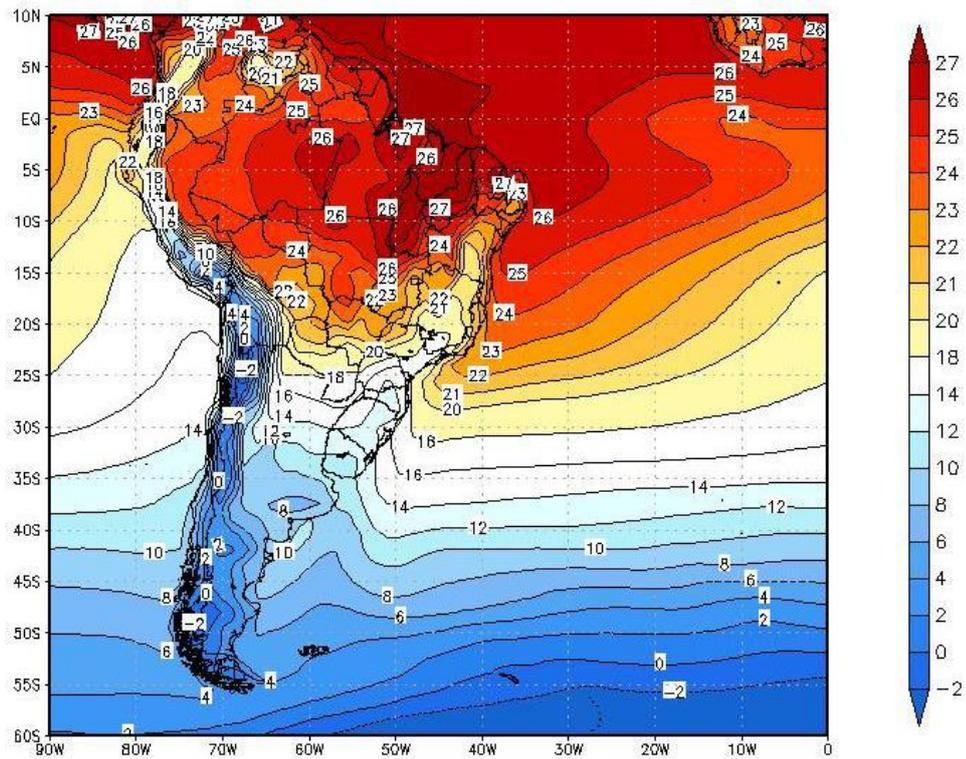
(a) verão – Dez/Jan/Fev



(b) outono - Mar/Abr/Mai



(c) inverno – Jun/Jul/Ago



(d) primavera - Set/Out/Nov

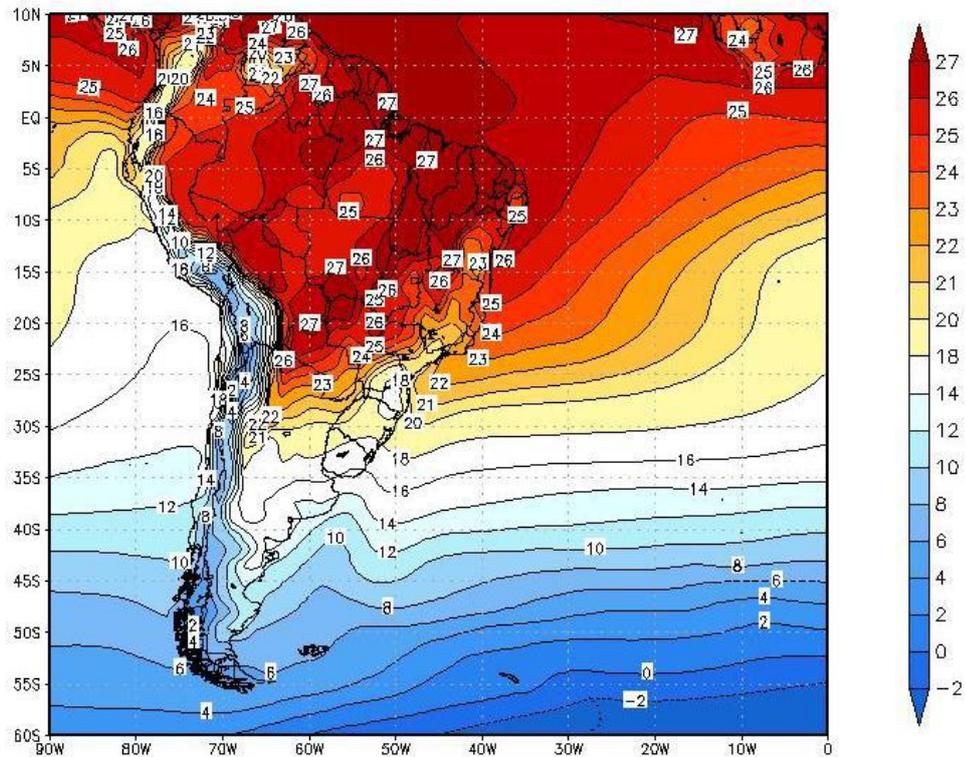


Figura 3.3 – Campo de temperatura do ar à 2 metros: climatologia para o período de 1989 a 2010 para (a) verão – Dez/Jan/Fev, (b) outono - Mar/Abr/Mai, (c) inverno – Jun/Jul/Ago e (d) primavera - Set/Out/Nov. (Fonte: Reanálise ERA-Interim)

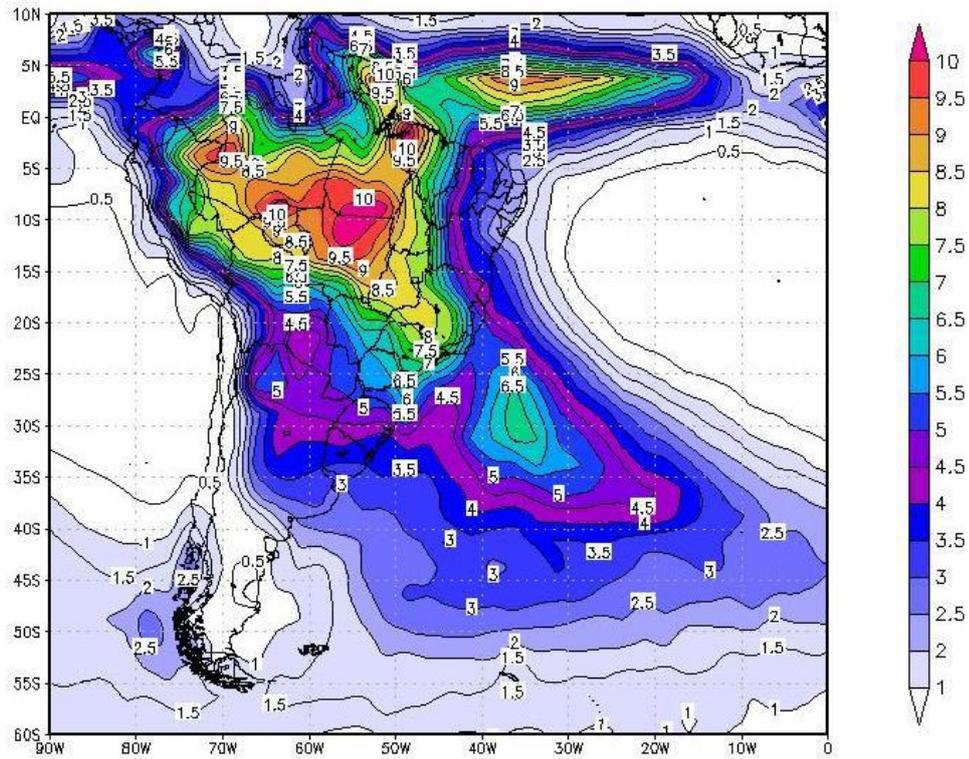
Com relação à distribuição sazonal da precipitação, nota-se a assinatura da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) durante o verão (Figura 3.4 a) com máximos de precipitação em sua faixa NO-SE, da região Amazônica ao Oceano Atlântico e também na região da ZCIT. No início do outono e final da primavera também ocorrem chuvas devido a este sistema, o que é indicado nos campos médios. O aquecimento da superfície durante esses períodos - final da primavera, verão e início do outono - também gera convecção e, conseqüentemente, chuva sobre diversas localidades. Já durante o período do inverno, é notável a diminuição da precipitação sobre o Brasil devido a diversas interações, como o afastamento da ZCIT para o norte, aproximação do ASAS e menor aquecimento da superfície, devido a menor incidência de radiação solar. A precipitação nesta época do ano fica mais concentrada no litoral das Regiões Nordeste, Sudeste e no Sul do Brasil, devido a concentração de SFs nesta última região e pouca penetração deles em território nacional.

Os valores de precipitação no litoral da Região Sudeste do Brasil oscilam entre 6 e 6,5 mm/dia no verão (Figura 3.4 a) (em torno de 180 mm/mês), entre 3 e 3,5 mm/dia no outono (Figura 3.4 b), entre 1 e 2 mm/dia no inverno (Figura 3.4 c) (em torno de 45 mm/mês) e entre 3,5 e 4 mm/dia na primavera (Figura 3.4 d).

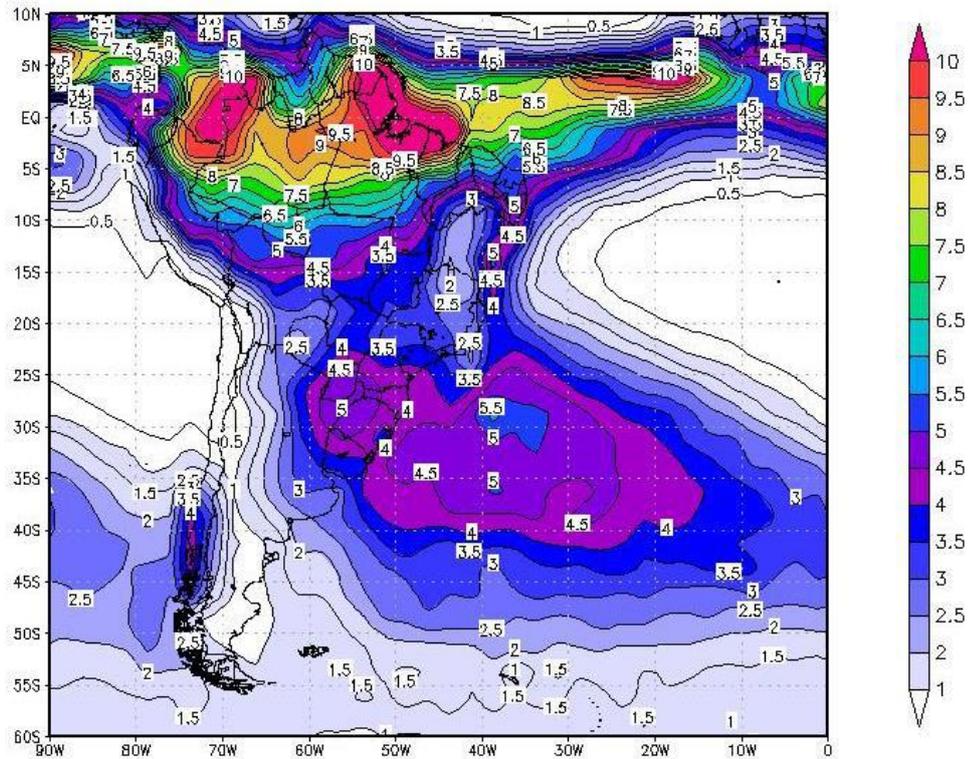
A Região Sudeste também sofre influência de fenômenos de grande escala e os impactos de alguns deles, como El Niño e La Niña (Nunes et al., 2009). A influência desses episódios na Região Sudeste do Brasil não é tão significativa quanto nas Regiões Nordeste e Sul, onde a estação chuvosa é fortemente afetada (Ropelewski e Halpert, 1987).

De acordo com Grimm e Ferraz (1998), o clima na Região Sudeste do Brasil sofre maior influência do Oceano Atlântico do que do Pacífico. Os estudos mostram que em episódios de La Niña ocorrem anomalias negativas no total anual de precipitação ao sul de 20°S, enquanto que episódios de El Niño causam anomalias positivas. Durante o outono, em episódios de El Niño, há aumento da precipitação sobre o Sudeste/Sul do Brasil (Grimm, 2009).

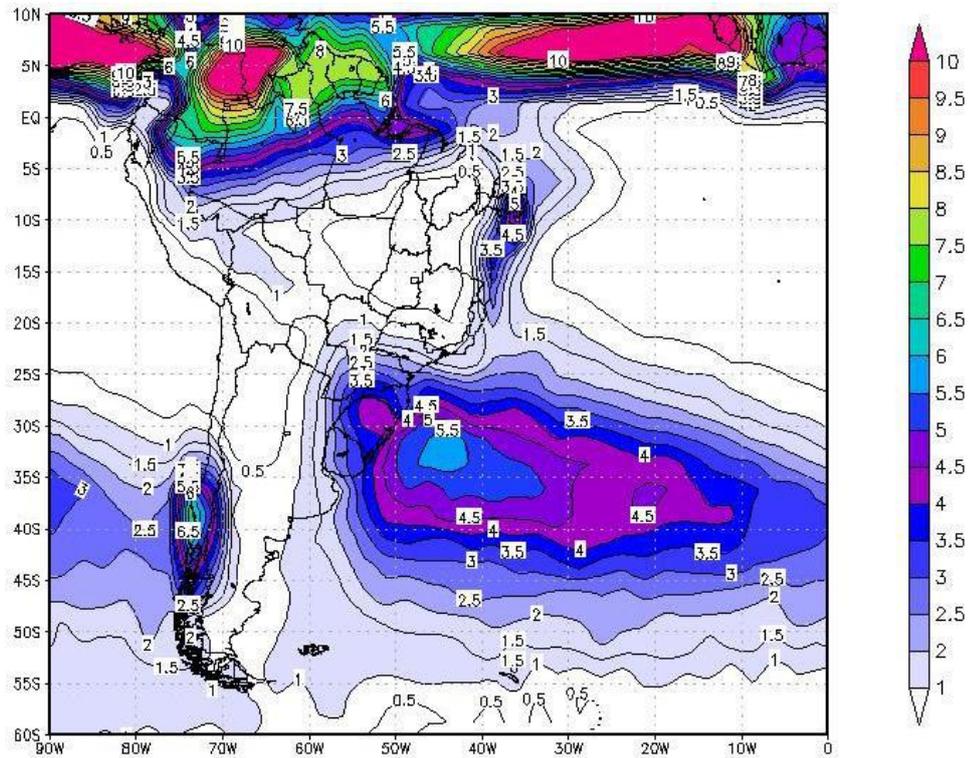
(a) verão – Dez/Jan/Fev



(b) outono - Mar/Abr/Mai



(c) inverno – Jun/Jul/Ago



(d) primavera - Set/Out/Nov

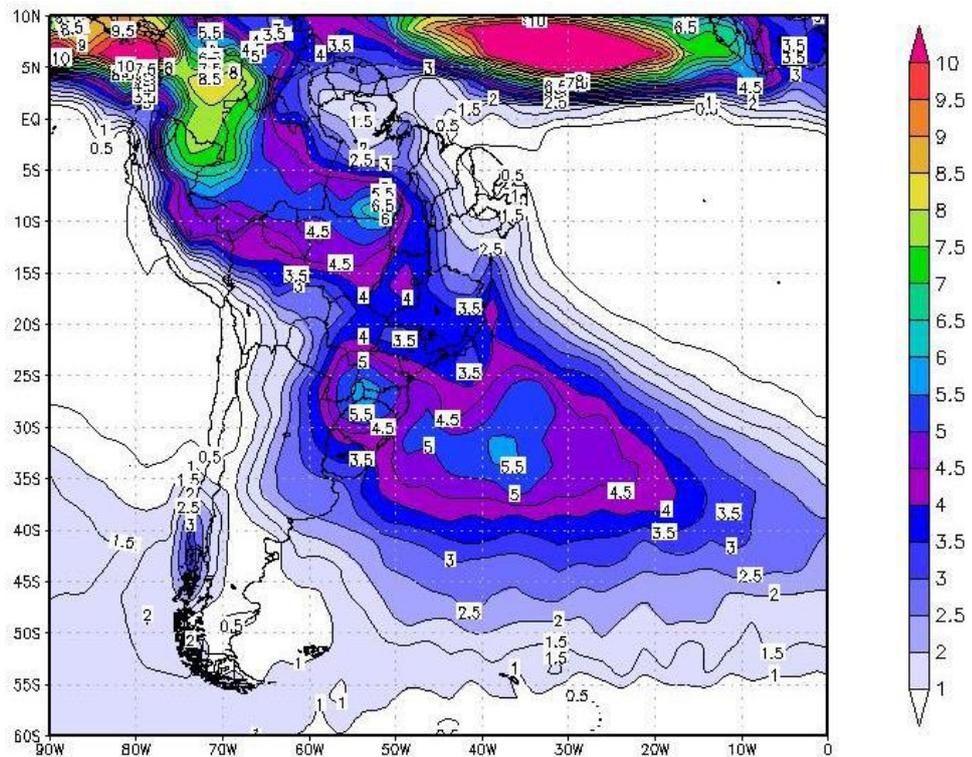
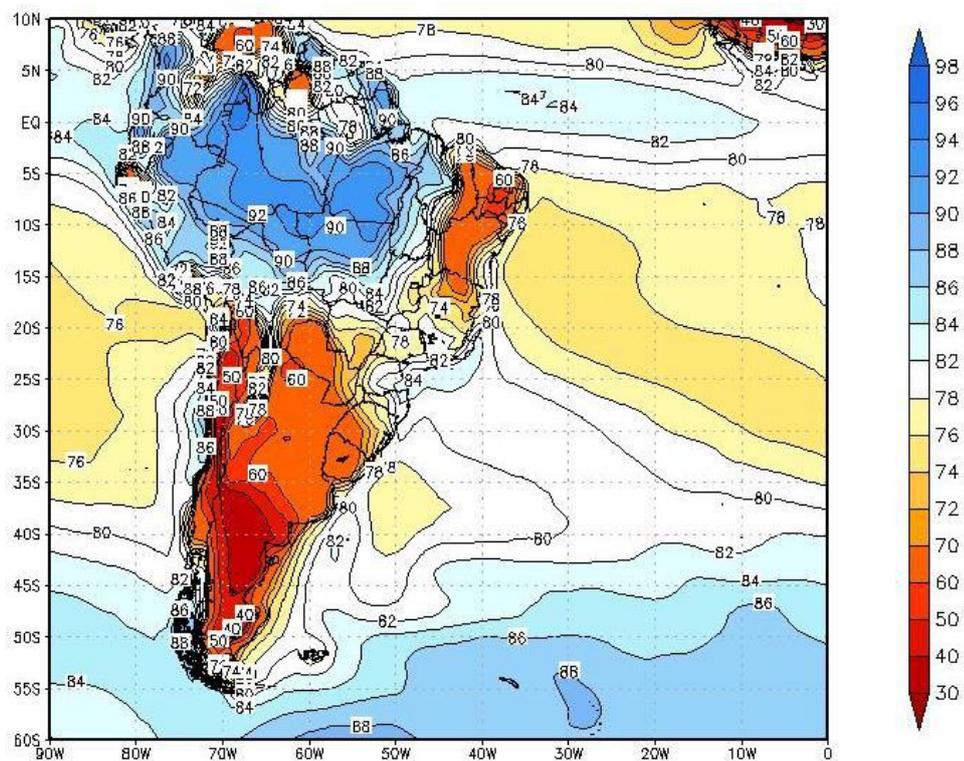


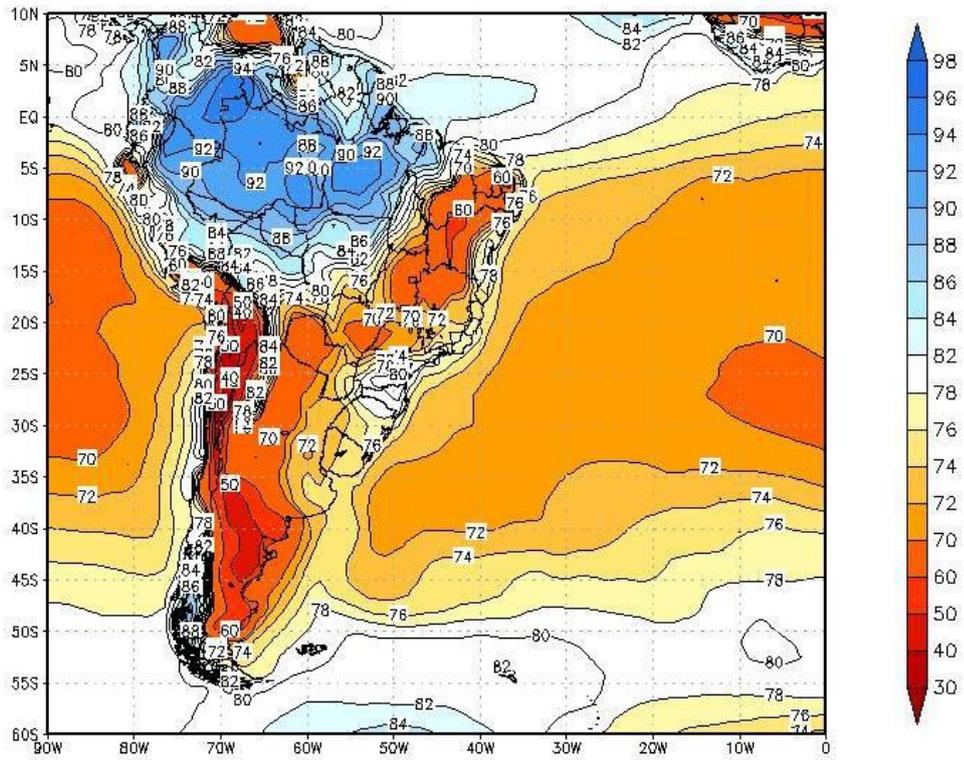
Figura 3.4 – Campo de precipitação: climatologia Xie e Arkin (1997) para o período de 1979 a 2009 para (a) verão - Dez/Jan/Fev, (b) outono - Mar/Abr/Mai, (c) inverno – Jun/Jul/Ago e (d) primavera - Set/Out/Nov. (Fonte: Dados de Precipitação CMAP fornecidos pela NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, EUA)

O campo de umidade relativa do ar (Figura 3.5) apresenta diferenças significativas entre as estações do ano. No período do verão os valores de umidade são elevados sobre a maior parte do Brasil (superior a 80%) (Figura 3.5 a), coincidente com a região da ZCAS. No litoral da Região Sudeste predominam valores em torno de 84% no verão. No outono (Figura 3.5 b), a umidade relativa no litoral Sudeste oscila para menos de 80%. Já no inverno (Figura 3.5 c) há um intenso gradiente de umidade no litoral, com um mínimo de 50% no interior do Brasil e valores que ultrapassam 80% ao longo do litoral brasileiro e Oceano Atlântico. No litoral da Região Sudeste do Brasil os valores oscilam entre 74 e 80% no inverno. Com relação a primavera (Figura 3.5 d), apenas algumas características se distinguem do inverno: o centro do ASAS é mais úmido durante a primavera, a Região Sul é mais seca e a umidade no litoral da Região Sudeste fica em torno de 82%. No outono o centro do ASAS encontra-se mais seco que no inverno. Sobre a Região Sudeste do Brasil não se percebe grande oscilação sazonal nos valores de umidade relativa do ar.

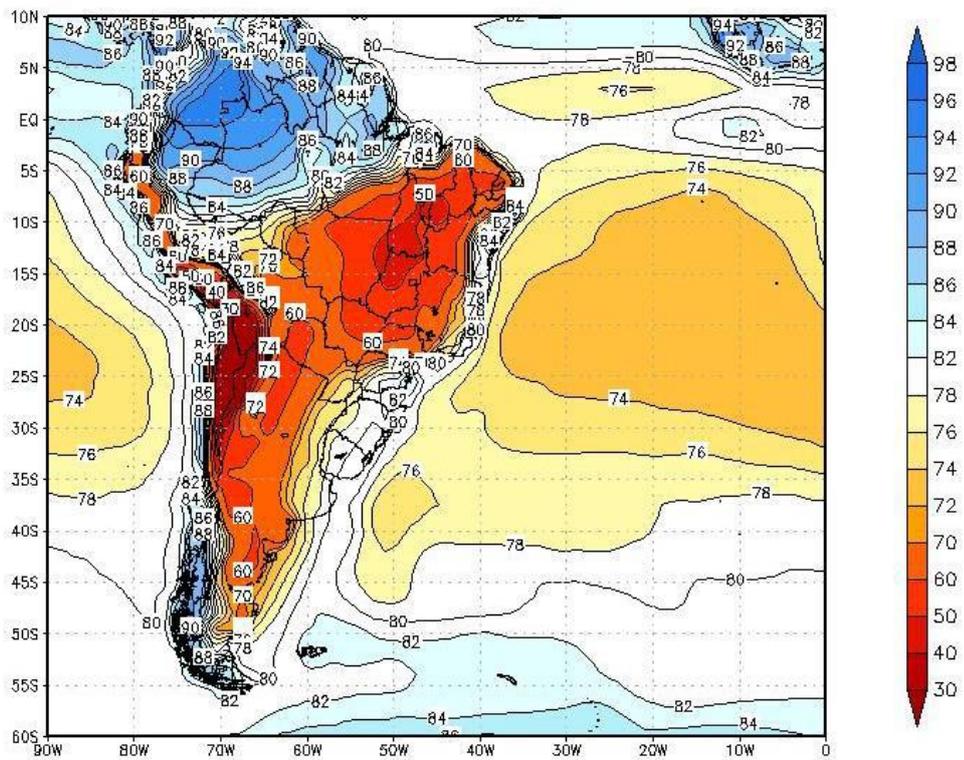
(a) verão – Dez/Jan/Fev



(b) outono - Mar/Abr/Mai



(c) inverno - Jun/Jul/Ago



(d) primavera - Set/Out/Nov

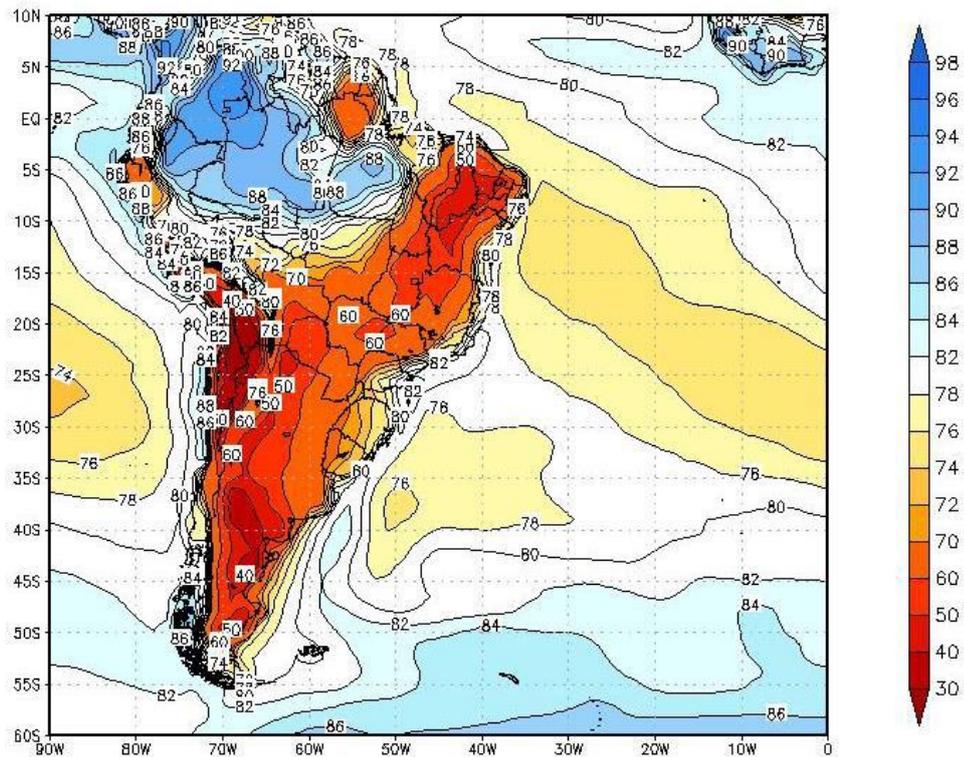


Figura 3.5 – Campo de umidade relativa do ar à 2 metros: climatologia para o período de 1989 a 2010 para (a) verão – Dez/Jan/Fev, (b) outono - Mar/Abr/Mai, (c) inverno – Jun/Jul/Ago e (d) primavera - Set/Out/Nov. (Fonte: Reanálise ERA-Interim)

3.3 Sistemas Transientes que afetam a Região Sudeste do Brasil

A chegada ou o estabelecimento de sistemas transientes perturbam a condição de estabilidade promovida pela presença do ASAS. Os sistemas meteorológicos que atingem a Região Sudeste podem ser de diferentes escalas espaciais e temporais, distintas regiões de origem e podem se desenvolver nos baixos, médios e altos níveis da atmosfera. Tais sistemas são: sistemas frontais (SFs); ciclones extratropicais; sistemas convectivos de mesoescala (SCMs); brisas terrestre e marítima; Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS); vórtices ciclônicos de altos níveis (VCAN) e outros. A seguir são descritos apenas os sistemas meteorológicos de maior relevância para o presente estudo: Sistemas frontais e brisas marítima e terrestre.

Sistemas frontais (SFs) podem ter suas trajetórias sobre o litoral da região e na parte continental, ou se deslocar sobre o oceano, tendo menor influência sobre o continente. Embora seus deslocamentos sejam geralmente de SW, suas trajetórias seguem dois padrões bastante distintos ao longo do ano: durante o verão é mais lenta e

caracterizada por maior atividade convectiva; já durante o inverno, os SFs deslocam-se mais rapidamente, em trajetórias mais zonais e não conseguem penetrar no interior do continente, não provocando convecção acentuada como no verão e induzindo forte queda de temperatura (Nobre et al., 1998).

Os SFs ocorrem durante todo o ano e na Região Sudeste do Brasil são os principais responsáveis pela ocorrência de precipitação (Cavalcanti e Kousky, 2003). Em Oliveira (1986) encontra-se uma estatística útil sobre penetração de sistemas frontais (SFs) e seus efeitos sobre a atividade convectiva na região Amazônica. A Tabela 3.1 sintetiza os resultados de Oliveira (1986) para as quatro bandas latitudinais: Banda A (entre 40 e 35°S), Banda B (entre 35 e 25°S), Banda C (entre 25 e 20°S) e Banda D (ao norte de 20°S), considerando tanto o número de passagem de SFs, quanto o número de sistemas que se deslocam e que conseguem organizar a convecção tropical no interior do continente. Para a Banda C, onde localiza-se a área de interesse deste trabalho, o número médio de SFs oscila entre 2,5 (fevereiro) e 5,4 (outubro). Nota-se também que na Banda C, durante os meses de verão (inverno) dos três (quatro) sistemas que se deslocam pela região, os três (apenas um) conseguem organizar a convecção.

Tabela 3.1 - Climatologia de SFs que passaram pelas bandas latitudinais 40 e 35°S, 35 e 25°S, 25 e 20°S e norte de 20°S e que organizaram a convecção tropical (média mensal para o período de 1975 a 1984). (Fonte: Oliveira, 1986)

Meses	Número de SFs				Número de SFs que organizam convecção			
	40°S - 35°S	35°S - 25°S	25°S - 20°S	Norte de 20°S	40°S - 35°S	35°S - 25°S	25°S - 20°S	Norte de 20°S
jan	8,6	6,1	3,8	2,0	3,0	3,9	3,2	1,7
fev	7,8	5,6	2,5	1,3	2,0	3,9	2,4	1,2
mar	7,4	5,7	3,1	1,3	1,0	3,7	3,0	1,0
abr	7,9	5,1	3,3	2,5	0,5	2,7	2,8	1,9
mai	10,3	6,8	3,8	2,2	0,4	2,2	2,4	1,5
jun	9,8	6,5	4,4	2,8	0,0	1,2	1,2	0,3
jul	11,9	7,7	4,1	2,5	0,0	0,7	0,9	0,6
ago	9,9	6,8	4,2	2,1	0,2	2,4	1,6	0,9
set	8,0	5,7	4,4	2,5	0,3	3,2	3,6	1,7
out	9,6	7,4	5,4	3,1	0,8	3,4	4,7	2,4
nov	8,7	6,7	4,3	3,4	0,5	4,7	4,2	3,0
dez	9,8	6,5	4,0	2,3	2,4	3,9	3,8	2,1

*médias mensais

Com relação as brisas marítima/terrestre, estas ocorrem devido ao aquecimento diferencial entre as superfícies, no caso, mar e terra. A Figura 3.6 esquematiza o processo de estabelecimento das brisas marítima e terrestre.



Figura 3.6 – Diagrama esquemático do funcionamento das brisas marítima/terrestre.

Durante o dia, a superfície terrestre se aquece mais rápido do que a superfície oceânica, gerando baixos valores de pressão sobre o continente, com isso nos baixos níveis o vento sopra do mar para terra (brisa marítima). À noite, ocorre o inverso, ou seja, a superfície terrestre perde calor mais rapidamente e o oceano fica mais aquecido do que o continente. Os menores valores de temperatura sobre o continente geram aumento da pressão e o ar flui do continente para oceano (brisa terrestre). Geralmente, a brisa marítima é mais intensa e mais persistente do que a brisa terrestre (IAG/USP Tópicos de ensino).

3.4 Caracterização climática do Estado e do Município do Rio de Janeiro

O Estado do Rio de Janeiro localiza-se entre os paralelos 20,5 e 23,5°S (aproximadamente 300 km de extensão norte-sul) e meridianos 41 e 45°W (aproximadamente 400 km de extensão oeste-leste). Apesar de sua área reduzida, 43.780,157 km² (IBGE, 2010), apresenta um clima muito variado, devido a orografia bastante acidentada, com muitos morros, serras, vales, vegetação diversificada, regiões de baixada e baías distribuídas pelo território, além da proximidade com o Oceano Atlântico, influenciando muito as distribuições espaciais da temperatura e dos totais pluviométricos.

O Município do Rio de Janeiro (Figura 3.7) localiza-se entre os paralelos 22,8 e 23,1°S (aproximadamente 30 km de extensão norte-sul) e os meridianos 43,1 e 43,8°W (aproximadamente 70 km de extensão oeste-leste) possuindo uma área de 1.200,279 km² (IBGE, 2010). A região sofre influência da baía de Guanabara a leste e da baía de Sepetiba a oeste e do Oceano Atlântico ao sul. Com relação a sua topografia destacam-se os maciços de Gericinó ao norte (887 m de altitude), da Tijuca a leste (1021 m de altitude) e da Pedra Branca a oeste (1024 m de altitude). (Fonte: www.educacaopublica.rj.gov.br)

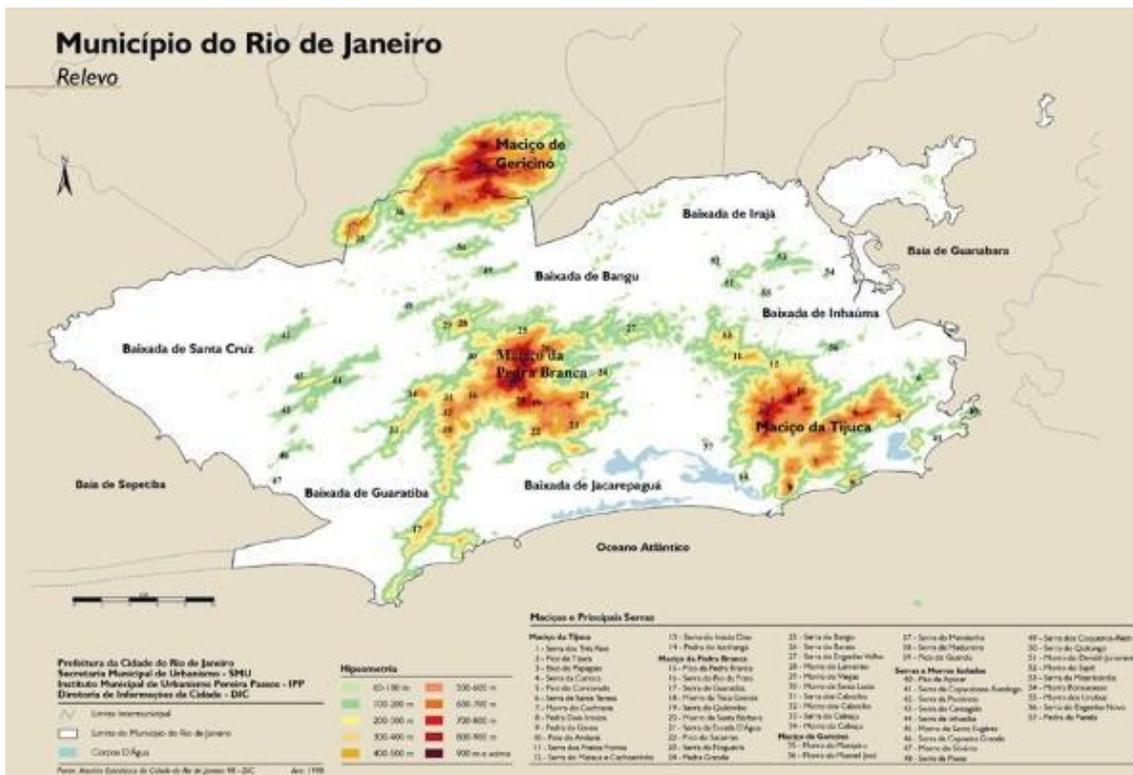


Figura 3.7 - Mapa físico do Município do Rio de Janeiro. (Fonte: http://www.terrabrasil.org.br/media/Nova_pasta/maparelevomunic.jpg)

A seguir as características climáticas do Estado e do Município do Rio de Janeiro serão analisadas a partir do comportamento das variáveis meteorológicas: temperatura do ar, precipitação e ventos.

a) Distribuição Espacial da Temperatura do Ar

Em FIDERJ (1978), encontra-se uma análise da distribuição espacial mensal da temperatura do ar no Estado do Rio de Janeiro para o período de 1931 a 1975 (Figura 3.8). Como esperado, a altitude é o principal fator controlador desta variável. De acordo com a distribuição espacial das temperaturas médias anuais verificam-se menores valores (entre 14 e 20 °C) nas áreas mais elevadas, entre 500 e 1500 m; valores entre 20 e 23 °C nas áreas de baixada e em torno de 23°C no litoral, onde nota-se menor variabilidade espacial.

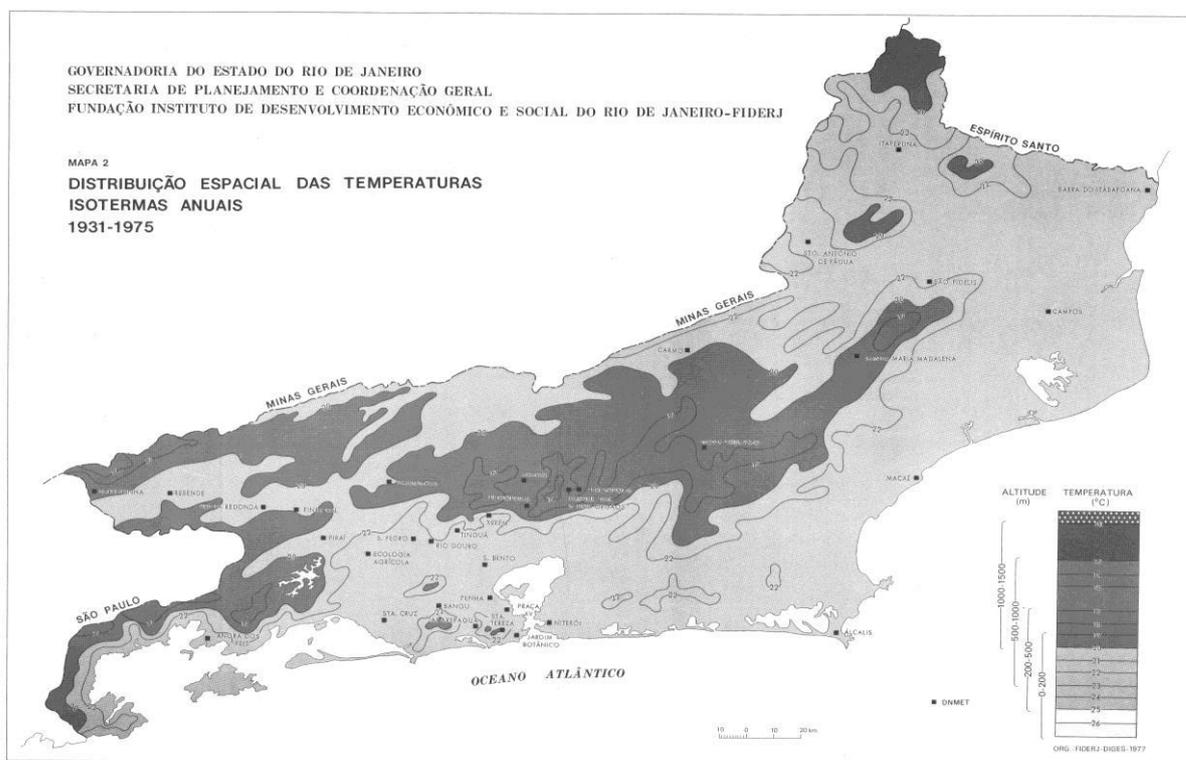


Figura 3.8 - Distribuição espacial da temperaturas médias anuais entre 1931 e 1975. (Fonte: FIDERJ, 1978)

As isothermas do mês de janeiro, representativas do verão (Figura não apresentada), expressam maior variação espacial das temperaturas entre as áreas de baixada, planalto e relevo. Menores valores (entre 17 °C e 23 °C) são observados em áreas mais altas (entre 500 e 1500 m); nas áreas de baixada são encontrados os maiores valores (entre 23 e 26 °C) e no litoral as temperaturas não variam significativamente, assumindo valores em torno de 26 °C. Vale ressaltar que estes são valores médios e foram consideradas poucas estações ao longo do Estado, não descrevendo

detalhadamente a distribuição de temperatura, mas mostrando apenas uma tendência do que seria este mapeamento.

A distribuição espacial de temperatura dos meses de abril e outubro (representativas respectivamente do outono e primavera) possuem o mesmo padrão de distribuição espacial da média anual, inclusive com relação aos valores (Figuras não apresentadas). As isotermas de julho (Figura não apresentada), representativas do inverno, indicam valores mais baixos, com acentuada redução da temperatura com a altitude. Em julho, valores entre 9 °C e 17 °C são observados em áreas mais altas (entre 500 e 1500 m); valores entre 17 e 20 °C são observados nas áreas de baixadas e no litoral predominam valores em torno de 20 °C.

As ilhas de calor também podem ser consideradas como um fator que influencia o campo de temperatura. Estas podem ser de origem natural, devido ao aquecimento diferencial de áreas mais continentalizadas ou de origem antropogênica, devido a concentração de poluentes (Moraes et al., 2005), estes fatores em conjunto com a circulação local, contribuem para a dispersão ou intensificação da ilha de calor.

b) Distribuição Espacial da Precipitação

Assim, como para a temperatura do ar, a precipitação também sofre forte influência da topografia, com máximos sobre as regiões de altitude elevada (Figura 3.9). A passagem de SFs, estabelecimento da ZCAS, ocorrência de SCMs e a circulação marítima interagem com a orografia local, gerando irregularidades espaciais no campo de precipitação. Quanto à sazonalidade, verifica-se a predominância dos meses de primavera e verão (setembro a março) como os mais chuvosos, e os de outono e inverno (maio a setembro) como os mais secos (FIDERJ, 1978).

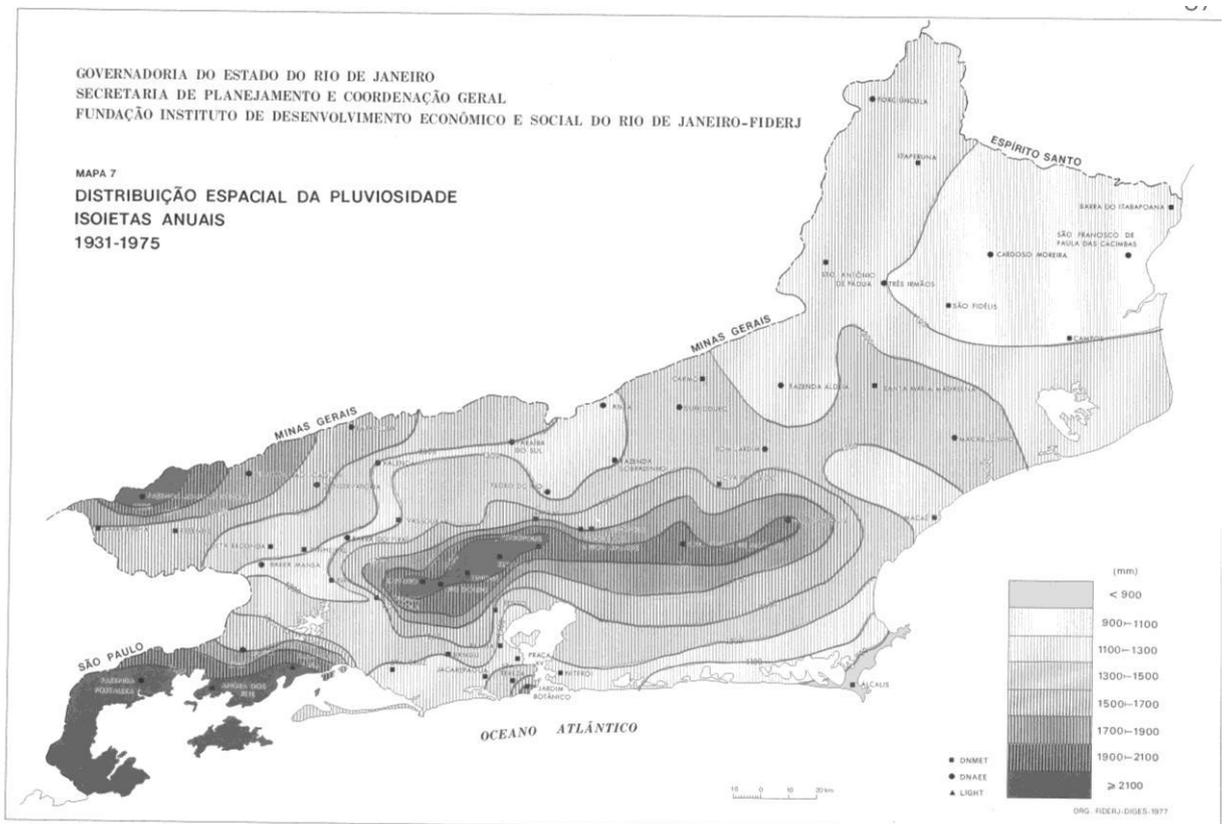


Figura 3.9 - Distribuição espacial de precipitação média anual entre 1931 e 1975. (Fonte: FIDERJ, 1978)

Os maiores índices pluviométricos do Estado encontram-se na porção centro-sul fluminense, devido à chuvas orográficas. Os menores índices são encontrados nas áreas das baixadas litorâneas, mais próximas ao mar, e na maior parte do Norte Fluminense. No verão os índices são mais elevados principalmente devido ao estabelecimento da ZCAS e da convecção local. No inverno há redução destes índices pluviométricos, sendo a chuva neste período consequência de SFs. No outono a precipitação é mais concentrada nas áreas litorâneas e também a barlavento das encostas, que são expostas as penetrações de massas de ar úmidas. Já na primavera, os índices de precipitação são

maiores do que no outono e mais uniformes, exceto em áreas litorâneas e de altitudes elevadas, devido ao aumento das temperaturas do ar (FIDERJ, 1978).

Podem-se observar mais detalhes na distribuição espacial média sazonal de precipitação no Município do Rio de Janeiro considerando-se dados de precipitação num período de dez anos (1997-2006), coletados em 30 postos pluviométricos da Fundação Geo-Rio, do Sistema Alerta Rio (Dereczynski, 2009). Analisando-se a distribuição média anual de precipitação (Figura 3.10) observam-se máximos associados aos pontos mais altos do Município como o Maciço da Tijuca a sudeste da região (estação Sumaré - 2200 mm), Maciço da Pedra Branca no centro da região (estação Grotta Funda - 1200 mm) e Maciço do Gericinó no norte da região (estação Mendanha - 1490 mm). Os menores totais pluviométricos anuais ocorrem em áreas de baixada como a Baixada de Irajá no nordeste da região (estação Penha - 870 mm, estação Irajá - 905 mm), Baixada de Bangu no norte da região, a sul do Maciço de Gericinó (estação Bangu - 991 mm). As estações mencionadas não localizam-se necessariamente nos pontos mais altos dos maciços ou mais baixos das baixadas, mas dão um indicativo do que ocorre na área.

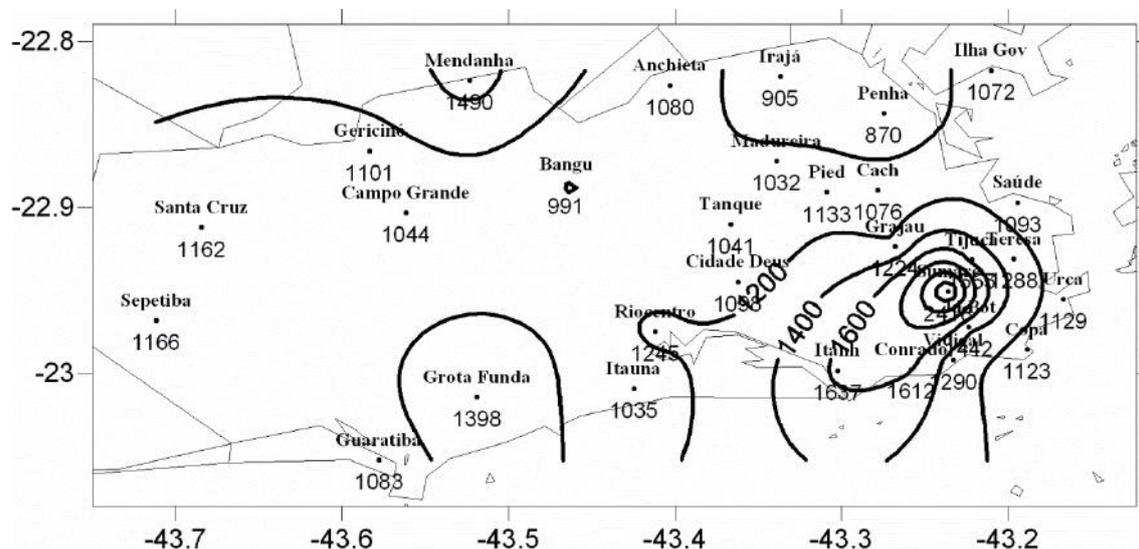


Figura 3.10 - Média anual de precipitação sobre o Município do Rio de Janeiro. (Fonte: Dereczynski, 2009)

A distribuição espacial de precipitação média descrita com relação à média anual pode ser observada nas distribuições sazonais de precipitação, como será apresentado.

O período do verão (Figura 3.11 a), com relação a semelhança da distribuição de precipitação média anual, apresenta máximos nos Maciços da Tijuca (220 mm - estação

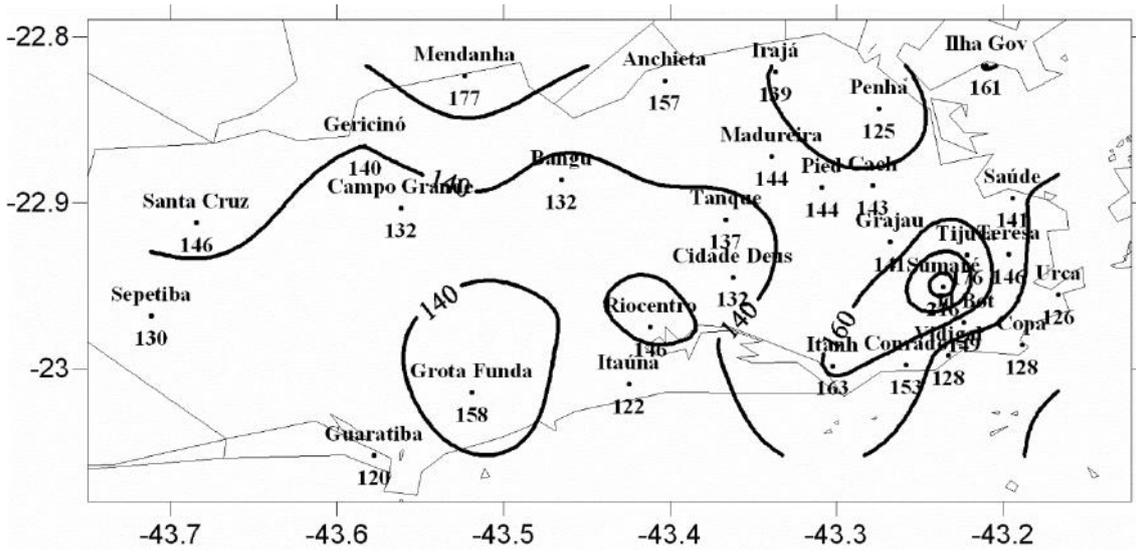
Sumaré), da Pedra Branca (160 mm - estação Grota Funda) e do Gericinó (180 mm - estação Mendanha). No litoral, a média sazonal é menor, em torno de 120 mm, nas estações de Copacabana, Vidigal, Urca, Itaúna e Guaratiba, enquanto nas estações localizadas no interior do Município a média oscilou em torno de 135 mm. Apesar desta diferença entre litoral e interior, a precipitação é bem distribuída ao longo do Município. Esta situação pode ser explicada devido ao maior aquecimento durante o período, que gera convecção em todo o Município e principalmente no interior da região, que encontra-se mais aquecido.

No período do outono (Figura 3.11 b), a média de precipitação é reduzida como um todo em relação ao verão, e também assume valores um pouco menores no interior da região (cerca de 30 mm de diferença). Os máximos de precipitação encontram-se nos Maciços da Tijuca (160 mm - estação Sumaré), Gericinó e Pedra Branca (110 mm - estações da Grota Funda e do Mendanha). O mínimo de precipitação é encontrado na Baixada de Irajá (60 mm - estação Irajá).

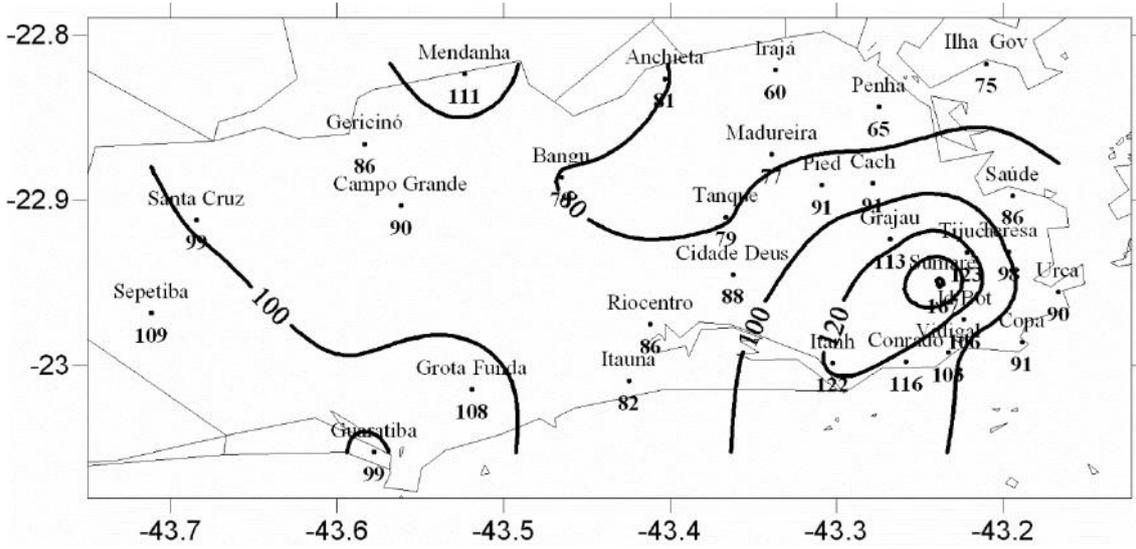
Durante o inverno (Figura 3.11 c), a média de precipitação é bastante reduzida em relação às outras estações do ano. A maior média é observada no Maciço da Tijuca (140 mm - estação Sumaré), enquanto que nas demais estações distribuídas ao longo do Município, a média não passa dos 100 mm. Nesse período do ano, os mínimos de precipitação encontram-se no interior da região considerada, com diferença de até 60 mm em relação ao litoral. A média mínima de precipitação ocorre na Baixada de Irajá (27 mm - estação Irajá e Penha).

Na primavera (Figura 3.11 d), as médias de precipitação apresentam distribuição desigual pelo Município, com valores em torno de 170 mm e 70 mm no litoral (estações Itanhangá e São Conrado) e no interior (estação Penha), respectivamente. Este fato pode ser explicado devido à maior incidência de sistemas frontais, concentrando a chuva no litoral. Outros máximos de precipitação média podem ser observados nos Maciços da Tijuca (260 mm - estação Sumaré - maior que no verão), Gericinó (140 mm - estação Mendanha) e Pedra Branca (130 mm - estação Grota Funda).

(a) Verão



(b) outono



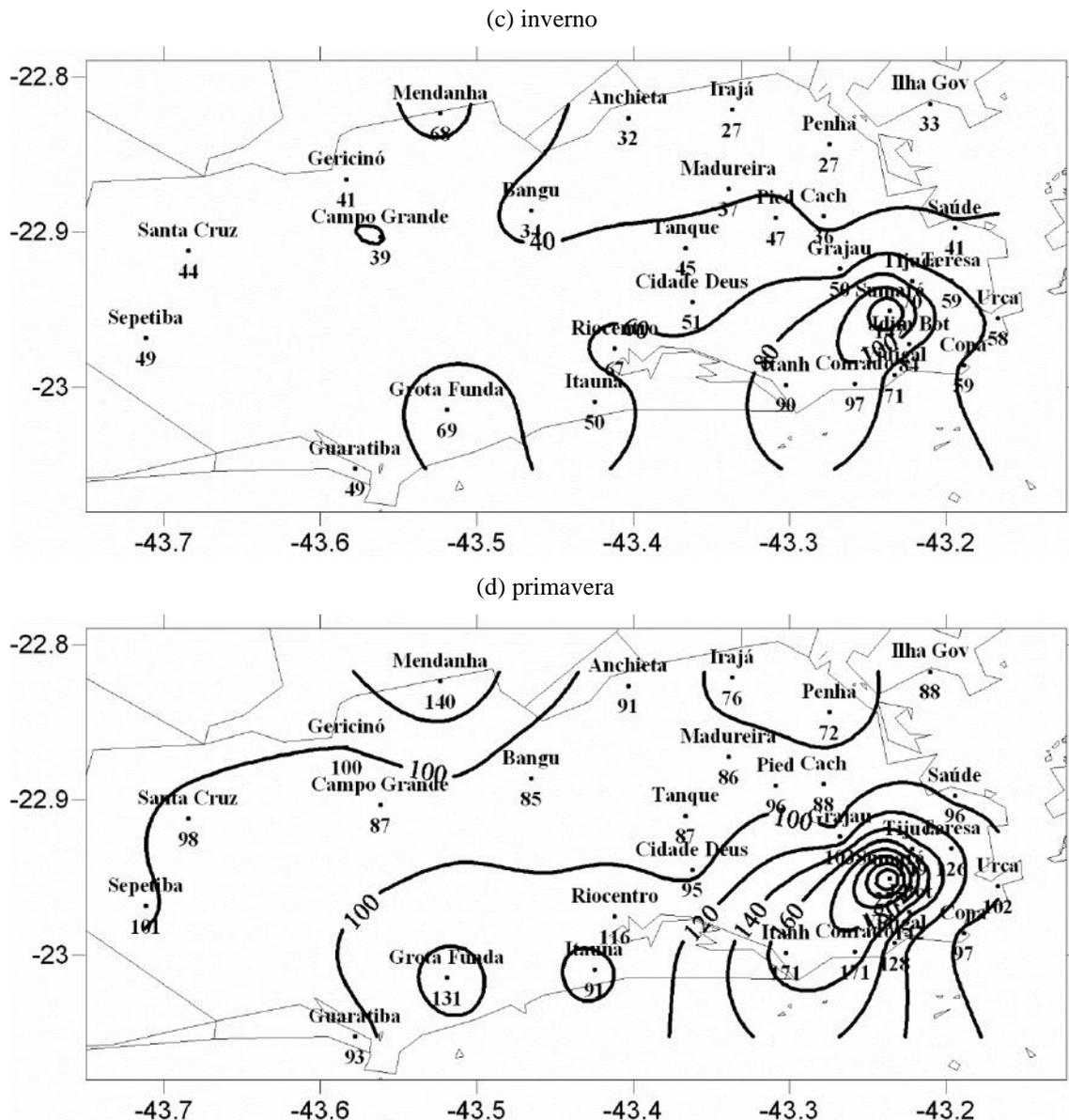


Figura 3.11 - Médias sazonais de precipitação: (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera. (Fonte: Dereczynski, 2009)

c) Comportamento do vento

De FIDERJ (1978) destaca-se que trechos elevados da Serra do Mar, baixadas litorâneas e Norte Fluminense sofrem influência de ventos de nordeste, proveniente do ASAS (Figura 3.12). A sotavento da Serra do Mar, Vale do Paraíba do Sul e baixadas da Região Metropolitana predomina o vento calmo, pois a topografia funciona como barreira à circulação atmosférica. Apenas em algumas estações nos maciços litorâneos, as velocidades médias são maiores com predominância de sul.

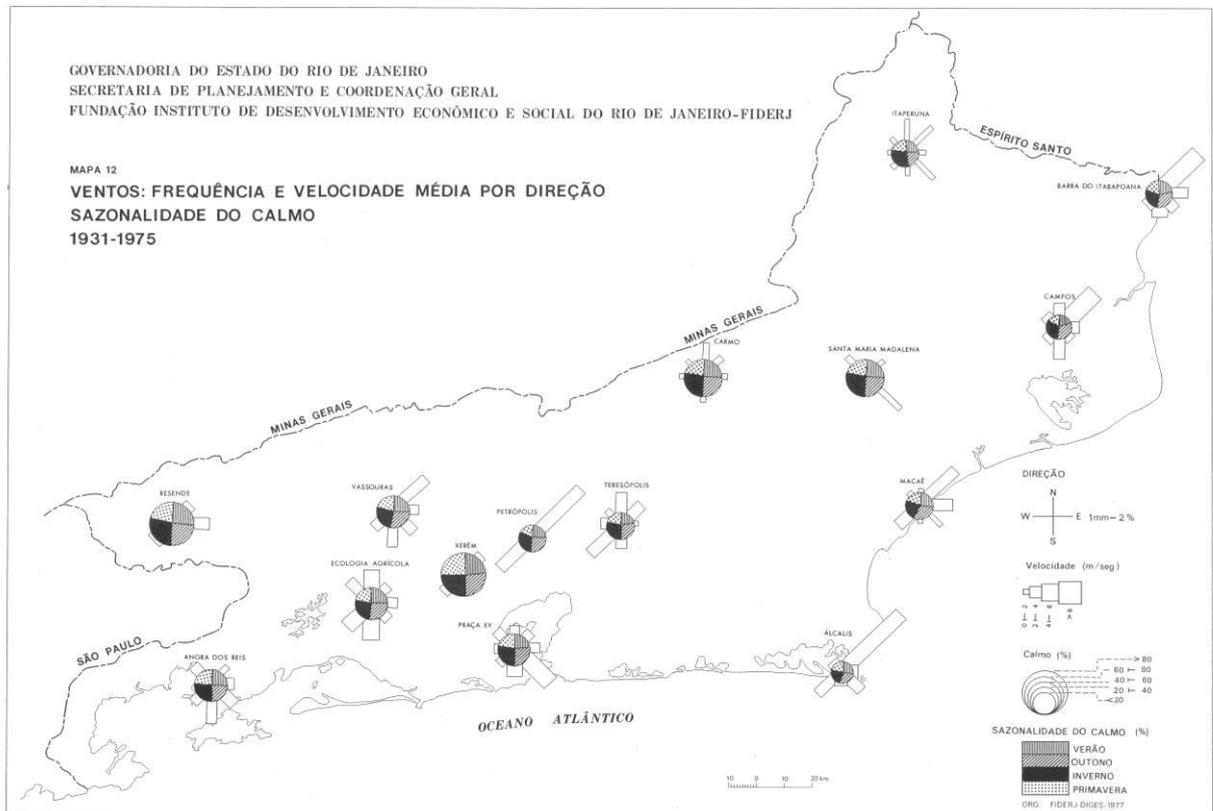


Figura 3.12 - Distribuição espacial dos ventos (frequência e velocidade média por direção) média anual entre 1931 e 1975. (Fonte: FIDERJ, 1978)

Ao longo do litoral do Rio de Janeiro, a influência das brisas marítima e terrestre, é pronunciada, criando um ciclo diurno característico, com ocorrência da brisa marítima nos horários de aquecimento do continente e brisa terrestre no período de resfriamento. O regime de ventos sobre todo Estado do Rio de Janeiro apresenta uma grande sazonalidade, em geral, com a ocorrência de ventos mais intensos nos meses de primavera e mais brandos nos meses de final de outono, início de inverno e verão (Governo do Estado do Rio de Janeiro, 2002).

Um estudo para o período de 2000 a 2006 na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) realizado por Jourdan (2007) analisou a climatologia de ventos sobre o município nas estações do Aeroporto do Galeão (localizado na Ilha do Governador), do Aeroporto Santos Dumont (localizada próxima a entrada da Baía de Guanabara), da FEEMA no Centro (localizada em área extremamente urbanizada) e do Aeroporto dos Afonsos (localizada numa área densamente urbanizada, cercada pelos três maciços litorâneos - Tijuca, Pedra Branca e Gericinó).

Os resultados desta climatologia apontaram que os diferentes períodos do dia - madrugada, manhã, tarde e noite - apresentaram regimes distintos de vento. O período madrugada/manhã é caracterizado pela predominância de ventos de componente norte, enquanto que o período da tarde/noite é caracterizado pela predominância de ventos de componente sul. No período da noite e madrugada há maior ocorrência de calmaria, enquanto que no período da tarde os ventos são mais intensos, com direção menos variável que nos outros períodos. Isto sugere uma modulação através do mecanismo de brisa terrestre/marítima, em que há variação no padrão predominante do vento da forma observada. Os ventos da brisa terrestre possuem intensidade inferior aos da brisa marítima (Serra, 1970).

Outra conclusão de Jourdan (2007) é que as características das variações sazonais no padrão predominante de vento não são as mesmas para cada localidade, mas é possível observar algumas variações entre as diferentes estações do ano em todas as localidades analisadas, principalmente com relação à frequência e intensidade dos ventos, ocorrência de calmaria e variação da componente meridional do vento.

Destaca-se o aumento relativo na frequência de ventos de componente sul nas estações de verão e primavera, épocas em que o aquecimento da superfície é mais intenso, como um todo. Segundo Jourdan (2007), um dos fatores que contribui para isto seria a intensificação do gradiente horizontal de temperatura, resultante do aquecimento diferenciado da superfície continental e oceânica que induz uma intensificação da circulação de brisa marítima.

Nota-se também um aumento relativo da incidência de ventos de componente norte no outono e, principalmente, no inverno. Este período do ano é caracterizado por um aquecimento menos intenso da superfície terrestre e maior estabilidade atmosférica. Isto sugere uma enfraquecimento da circulação de brisa marítima (Jourdan, 2007).

Outra explicação para o enfraquecimento dos ventos locais ao longo de um período seria a oposição entre os sentidos do padrão local e do vento sinótico. Sentidos iguais (opostos) levaria a uma intensificação (enfraquecimento) do vento local.

Apesar de no Estado do Rio de Janeiro as direções de componente norte serem predominantemente influenciadas pela circulação do ASAS (FIDERJ, 1978; Jourdan, 2007), no município do Rio de Janeiro as brisas marítima e terrestre dominam a circulação local (Dereczynski, 2009).

Com o objetivo de ilustrar os resultados citados anteriormente, foram geradas rosas-dos-ventos com dados do Aeroporto Santos Dumont (SBRJ), para o período de 2000 à 2010. Analisando o comportamento do vento para todo o período (Figura 3.13) pode-se notar que há incidência de ventos principalmente de norte e de sul, mas a direção predominante e de maior intensidade é de quadrante sul.

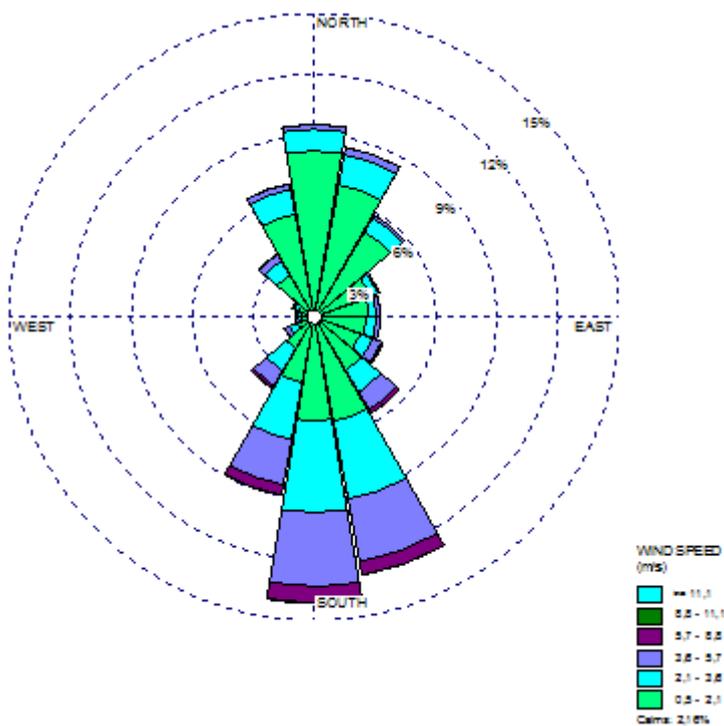


Figura 3.13 - Rosa-dos-ventos para o aeroporto Santos Dumont no período de 00 Z às 23 Z, de 2000 a 2010. Fonte: Comando da Aeronáutica.

A análise dos mesmos dados coletados no Aeroporto Santos Dumont para intervalos de 3 horas indica que os ventos sopram predominantemente nas direções N e NE no período diurno (03 às 11 Z - madrugada e manhã) (Figura 3.14 b, c e d) e S e SE no período noturno (15 às 23 Z - tarde e noite) (Figuras 3.14 f, g e h), com intervalos de

transição em que há predominância das duas direções, como no final da noite (00 às 02 Z) (Figura 3.14 a) e final da manhã (12 às 14 Z) (Figura 3.14 e). O que está de acordo com os resultados obtidos por Jourdan (2007).

O padrão de vento de quadrante norte é o esperado para a brisa terrestre, pois concorda com a orientação E-W da linha de costa na região, ocorrendo preferencialmente no período diurno e no sentido continente-oceano. Devido ao rápido resfriamento do continente por perda de calor e ao lento resfriamento do oceano, a pressão sobre o continente encontra-se mais elevada em relação à pressão do oceano. Com isso, os ventos vão em direção ao oceano, partindo do continente, o que é consistente com o observado.

Padrão análogo pode ser observado no período noturno, em que ocorre a brisa marítima. Neste caso o continente encontra-se mais aquecido que o oceano, em vista da radiação solar incidente ao longo do dia, que aquece as superfícies, principalmente a terrestre, devido ao baixo calor específico da superfície de terra em relação a superfície de água, que faz com que a superfície terrestre se aqueça mais rapidamente que o oceano. Este intervalo de tempo em que a terra ganha calor e começa a soprar a brisa marítima é o período de transição mencionado que ocorre entre 12 e 14 Z (Figura 3.14 e). O período de transição em que a terra perde calor e começa a soprar a brisa terrestre é o compreendido entre 00 e 02 Z (Figura 3.14 a).

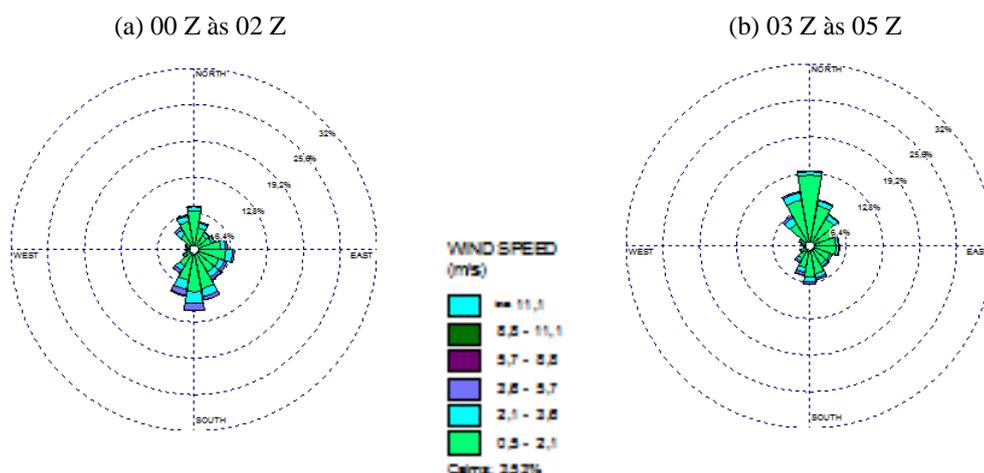


Figura 3.14 - Rosa-dos-ventos para o aeroporto Santos Dumont no período de (a) 00 Z às 02 Z, (b) 03 Z às 05 Z, (c) 06 Z às 08 Z, (d) 09 Z às 11 Z, (e) 12 Z às 14 Z, (f) 15 Z às 17 Z, (g) 18 Z às 20 Z e (h) 21 Z às 23 Z, de 2000 a 2010. Fonte: Comando da Aeronáutica.

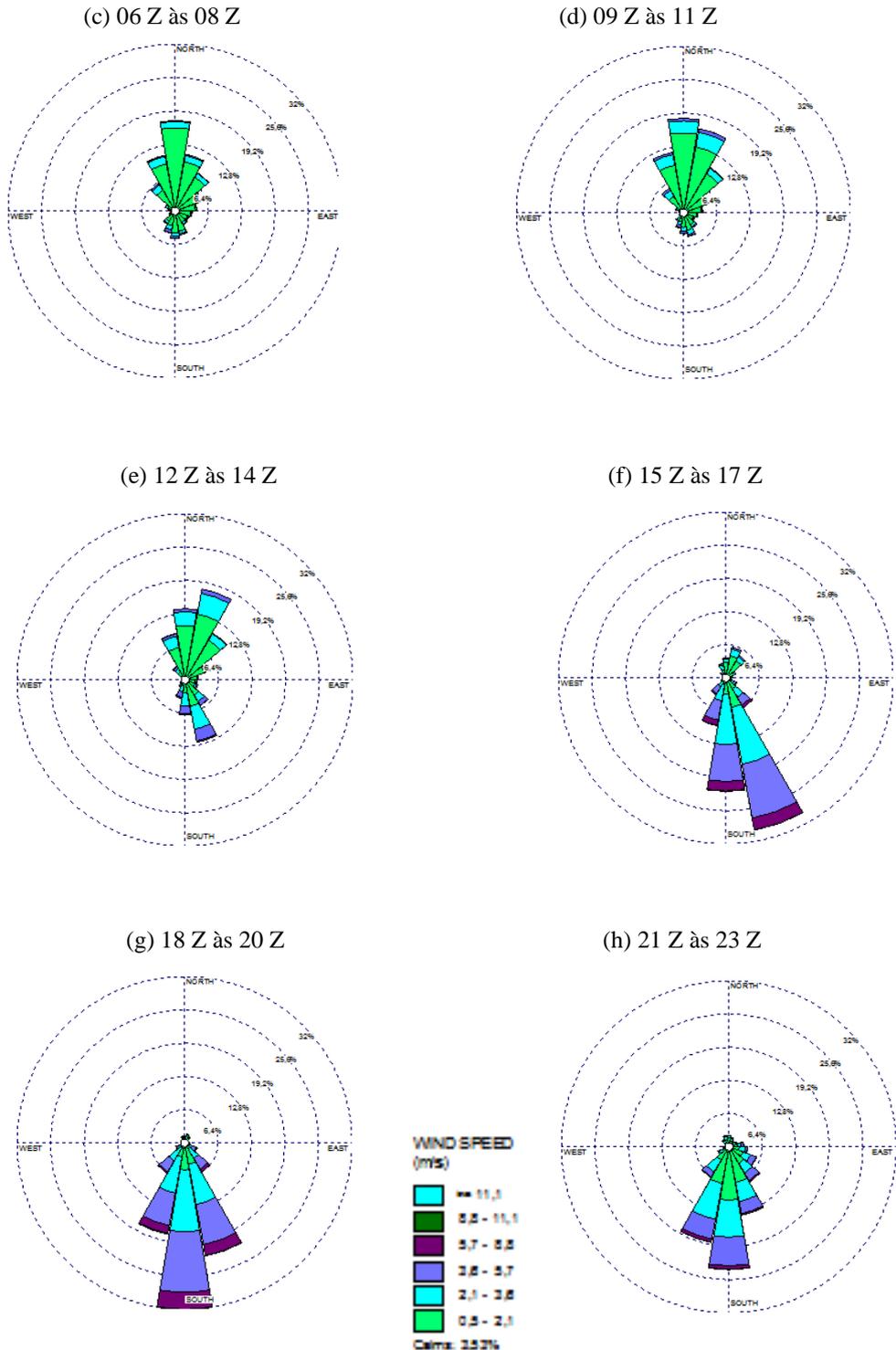


Figura 3.14 – Final.

Ao longo do ano, a direção do vento se altera devido a passagem dos sistemas transientes, que modificam as condições padrões da atmosfera e da posição do ASAS, que também se altera com o decorrer do ano.

A média das velocidades dos ventos no Aeroporto Santos Dumont ficou em torno de 1,7 m/s no período diurno (entre 03 e 11 Z) e 3,6 m/s no período noturno (entre 15 e 23 Z). A velocidade média nos períodos de transição foi de 1,8 m/s (00 a 02 Z) e 2,1 m/s (12 a 14 Z).

Padrões semelhantes aos encontrados para o Aeroporto Santos Dumont são encontrados para o Aeroporto do Galeão (SBGL), pois estão sob o mesmo regime sinótico, variando apenas a direção da brisa, pois a orientação da costa na área do Aeroporto do Galeão é de NE-SW. Nas Figuras 3.15 e 3.16 apresentam-se uma climatologia para o período de 1961 a 1990 para o Aeroporto do Galeão, mostrando a frequência total dos ventos e seu comportamento nos diferentes períodos do dia (a cada 3 horas).

Na rosa-dos-ventos referente à climatologia total para o período de 1961 a 1990 (Figura 3.15), pode-se notar maior frequência de ventos de SE e com baixa intensidade, com velocidades entre 0,5 m/s e 5,7 m/s.

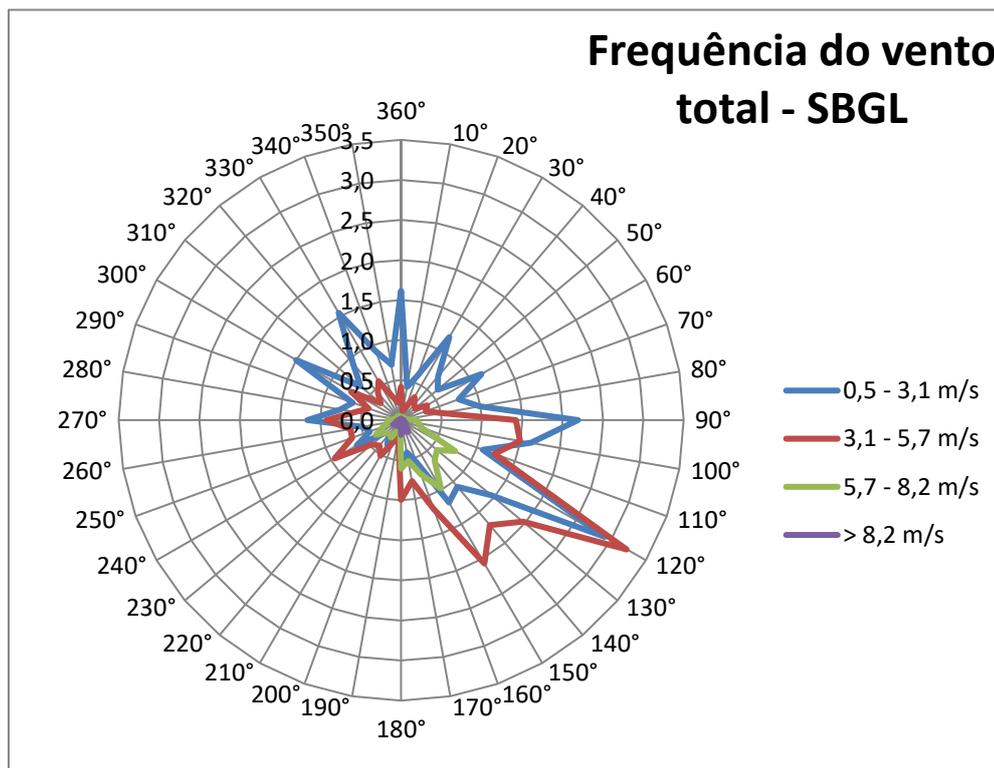


Figura 3.15 - Rosa-dos-ventos para o aeroporto Galeão no período de 00 Z às 23 Z, de 1961 a 1990. Fonte: Comando da Aeronáutica.

Analisando-se a distribuição horária do vento no Aeroporto do Galeão (Figura 3.16), observa-se:

- No período diurno (03 às 11 Z) os ventos possuem fraca intensidade 0,5 a 3,1 m/s e predominam de N e E, começando a girar para SE no final do período (Figuras 3.16 b - d);
- No final da manhã (12 às 14 Z) o vento sopra com maior frequência de SE e observa-se também o aumento da frequência de ventos com maiores intensidades, entre 3,1 e 5,7 m/s (Figura 3.16 e);
- Durante o período noturno, de 15 à 23 Z, há diminuição na frequência dos ventos de menor intensidade e aumento da frequência dos ventos de maior intensidade 3,1 a 5,7 m/s, permanecendo a direção mais frequente como SE. No final do período, a frequência dos ventos de menor intensidade volta a aumentar, mas continua a direção mais frequente como SE (Figuras 3.16 f - h);
- No final da noite (00 às 02 Z) não se nota direção preferencial e os ventos de menor intensidade (0,5 à 3,1 m/s) voltam a possuir frequência maior do que as demais intensidades (Figura 3.16 a).

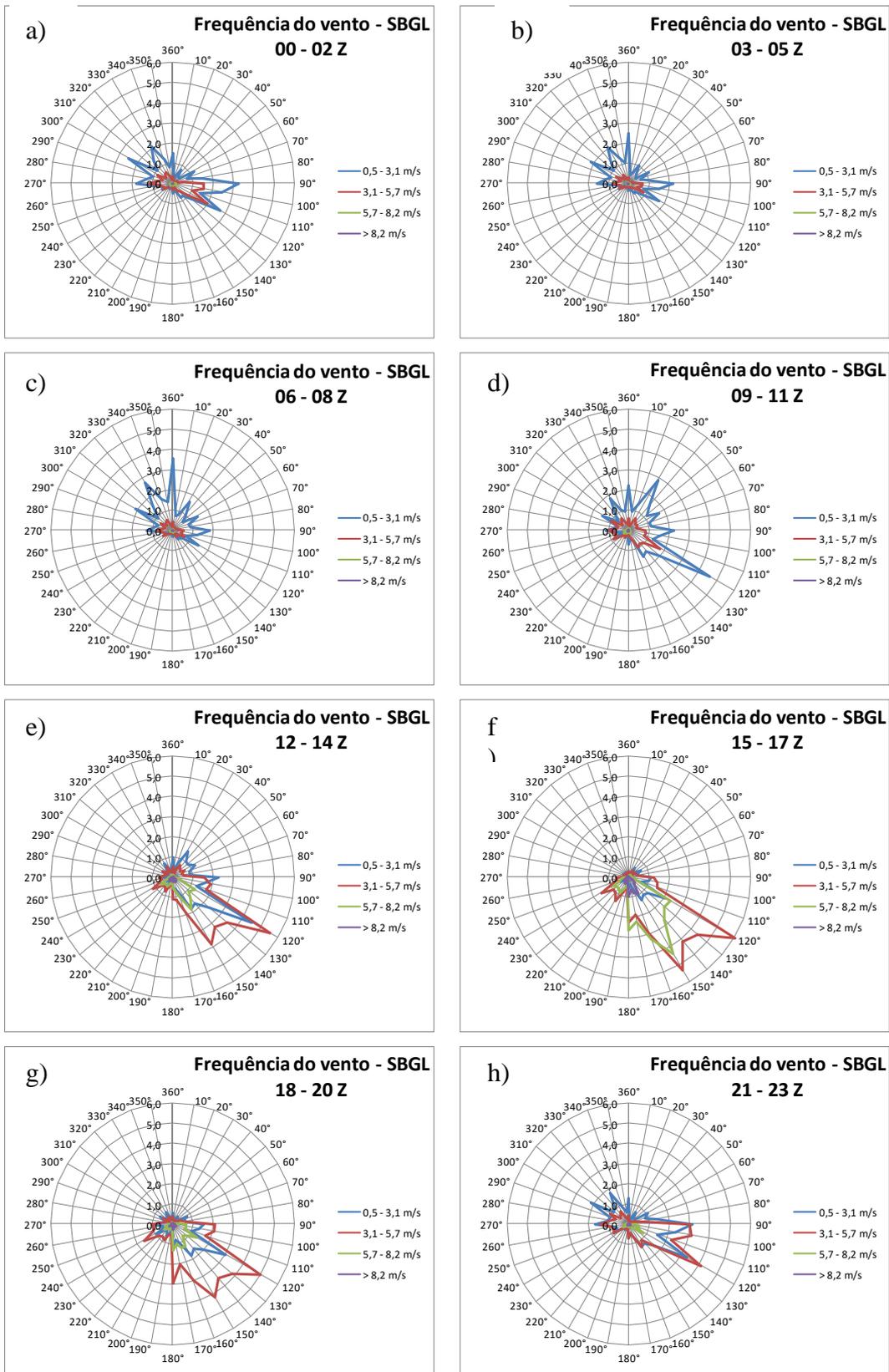


Figura 3.16 - Rosa-dos-ventos para o aeroporto Galeão de 1961 a 1990, no período de: a) 00 às 02 Z, b) 03 às 05 Z, c) 06 às 08 Z, d) 09 às 11 Z, e) 12 às 14 Z, f) 15 às 17 Z, g) 18 às 20 Z e h) 21 às 23 Z. Fonte: Comando da Aeronáutica.

RESUMO

O clima no litoral da Região Sudeste do Brasil, no Estado e município do Rio de Janeiro, é afetado diretamente pela presença do ASAS, com PNMM mais intensas no inverno do que no verão, elevados valores de temperatura do ar ao longo de todo o ano, principalmente no verão. Os ventos ocorrem de componente N no período da madrugada e manhã (03 a 14 Z - 00 a 11 hora local) e de quadrante S no período da tarde e noite (15 a 02 Z - 12 a 23 hora local). No período da noite e madrugada há maior ocorrência de calmaria, enquanto que no período da tarde os ventos são mais intensos, com direção menos variável que nos outros períodos. Isto sugere uma modulação através do mecanismo de brisa terrestre/marítima. De acordo com os meses do ano, a direção do vento se altera devido ao aquecimento diferencial da superfície, passagem de sistemas transientes, que modificam as condições padrões da atmosfera e a posição do ASAS, que também se altera com o decorrer do ano, soprando principalmente de componente S na primavera e no verão e de componente N no outono e no inverno. A precipitação é mais intensa na primavera e no verão, quando o estabelecimento da ZCAS promove aumento da convecção na região, com altos totais pluviométricos mensais. No outono e inverno a precipitação é bastante reduzida. Os SFs ocorrem durante todo o ano e são os principais responsáveis pela ocorrência de precipitação. Uma estatística sobre o número de SFs para banda latitudinal que contém o Rio de Janeiro (entre 25 e 20°S) é encontrada em Oliveira (1986), mostrando que em média no verão (inverno) dos três (quatro) sistemas que se deslocam pelo litoral, todos (apenas um) conseguem organizar a convecção.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS

Neste capítulo apresenta-se inicialmente uma climatologia de casos de passagens de sistemas frontais (SFs) pelo Rio de Janeiro, considerando-se as situações pós-frontais em que a chuva cessa após a passagem do SF (caso A), as situações nas quais continua a chover mesmo após a banda frontal ter deixado de atuar sobre o Estado do Rio de Janeiro (caso B) e os eventos excluídos (caso E). A seguir elabora-se uma análise de compostos para os casos tipo A e os casos tipo B. Finalmente dois estudos de casos são desenvolvidos, um do tipo A (ocorrido em 14/05/2010) e outro do tipo B (ocorrido em 08/04/2010). As análises de compostos e os estudos de casos têm por objetivo identificar os mecanismos físicos associados aos eventos do caso tipo B, considerando-se as semelhanças e diferenças em relação aos eventos do caso tipo A.

4.1 - Climatologia de eventos pós-frontais

A partir do levantamento de todos os casos de passagem de sistemas frontais (SFs) pelo Rio de Janeiro ocorridos no período de 2000 a 2007 (8 anos), foi elaborada uma climatologia dos eventos, agrupando-os em três categorias: sem precipitação (tipo A), com precipitação (tipo B) após o deslocamento dos SFs e excluídos (tipo E). Os casos tipo E retratam as situações, principalmente durante o verão, quando os SFs permanecem estacionários sobre a região em estudo, impossibilitando a classificação da situação pós-frontal. Em outras ocasiões os SFs ao atingirem a região de estudo deslocam-se para leste, sobre o oceano. Nestes eventos, em que a análise da situação pós-frontal não pode ser concluída, os casos foram classificados como excluídos (tipo E). Os resultados de tal climatologia são apresentados mensalmente e sazonalmente, respectivamente nas Tabelas 4.1 e 4.2. As datas das passagens dos SFs tipo A e tipo B pelo Rio de Janeiro no período analisado são apresentadas no capítulo 2, referente à Metodologia.

Tabela 4.1 - Frequência de eventos do tipo A, B e E no período de janeiro de 2000 a dezembro de 2007.

Anos		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	Total Mensal
Jan	A	1	-	-	1	-	1	-	-	3
	B	-	-	-	-	2	-	-	-	2
	E	4	1	2	2	-	2	3	2	16
Fev	A	-	-	-	-	-	-	1	1	2
	B	1	-	1	-	1	1	-	-	4
	E	3	1	-	1	3	3	2	1	14
Mar	A	1	-	-	-	1	-	1	-	3
	B	-	-	1	2	-	1	-	-	4
	E	4	2	-	2	2	2	2	1	15
Abr	A	1	-	-	1	1	1	2	1	7
	B	1	-	-	2	-	-	2	-	5
	E	1	3	1	1	2	3	-	3	14
Mai	A	1	-	1	3	1	2	1	3	12
	B	-	1	1	2	1	1	2	1	9
	E	3	1	1	-	5	2	-	1	13
Jun	A	2	1	-	2	-	1	1	2	9
	B	-	-	1	-	1	-	3	-	5
	E	3	3	2	3	1	1	-	2	15
Jul	A	-	-	3	-	-	1	2	1	7
	B	3	1	-	1	3	1	1	1	11
	E	3	3	2	2	1	2	-	4	17
Ago	A	1	-	2	1	1	2	1	-	8
	B	-	-	-	1	1	-	1	1	4
	E	4	-	1	2	3	1	-	3	14
Set	A	3	-	1	2	1	2	1	1	11
	B	-	1	1	2	1	2	2	-	9
	E	1	3	2	1	2	2	1	2	14
Out	A	1	3	2	3	-	2	1	1	13
	B	1	-	-	-	1	-	-	-	2
	E	3	-	1	3	4	4	2	2	19
Nov	A	2	1	2	1	-	2	2	1	11
	B	-	-	1	1	3	-	-	-	5
	E	4	3	1	3	1	4	-	3	19
Dez	A	1	1	-	-	-	1	1	-	4
	B	-	-	-	-	-	-	-	-	0
	E	3	3	5	5	3	5	1	2	27
Total Anual		56	32	35	50	46	52	36	40	347
Total A		14	6	11	14	5	15	14	11	90
Total B		6	3	6	11	14	6	11	3	60
Total E		36	23	18	25	27	31	11	26	197

A Tabela 4.1 apresenta a frequência de eventos do tipo A, B e E no período de janeiro de 2000 a dezembro de 2007. Considerando-se o número total de sistemas frontais, ou seja, a soma dos casos A, B e E, os valores médios são coerentes com os resultados encontrados por Oliveira (1986) para a banda latitudinal entre 20 e 25°S e apresentados na Tabela 3.1; obtendo-se respectivamente para os meses de janeiro a dezembro: 2,6; 2,5; 2,8; 3,2; 4,2; 3,6; 4,4; 3,3; 4,3; 4,3; 4,4 e 3,9 SFs neste trabalho.

No período analisado neste trabalho (2000 a 2007), foram contabilizados 347 eventos de passagens de frentes, sendo 90 do tipo A, 60 do tipo B e 197 classificados em tipo E. Isso significa que mais da metade (aproximadamente 57%) dos SFs que atingem o Rio Janeiro não evoluem de forma clássica, ou seja passando pelo Estado e a seguir deslocando-se para norte. Dos 43% de SFs restantes, 26% são do tipo A e 17% são do tipo B. Ressalta-se da Tabela 4.1 que os casos tipo B ocorrem com maior frequência nos meses de julho (11) e maio (9), enquanto os casos tipo A predominam nos meses de outubro (13), maio (12), setembro (11) e novembro (11). Os casos tipo E, como esperado, predominam nos meses quentes: dezembro (27), outubro e novembro (19). Nota-se também na Tabela 4.1 uma grande variabilidade interanual: em 2001 (2000) ocorreram 32 (56) SFs.

A divisão sazonal dos casos é apresentada na Tabela 4.2 e na Figura 4.1, sendo desprezados os meses de janeiro e fevereiro de 2000 e dezembro de 2007, totalizando-se então 7 verões, 8 outonos, 8 invernos e 8 primaveras. De acordo com os dados da Tabela 4.2, o número médio de SFs que passam pelo Rio de Janeiro é de: 8,7 sistemas no verão (aproximadamente 2,9 a cada mês), 10,3 no outono (aproximadamente 3,4 a cada mês), 11,3 no inverno (aproximadamente 3,8 por mês) e 12,9 na primavera (aproximadamente 4,3 a cada mês). Tais resultados também são coerentes com os valores apresentados em Oliveira (1986) para a banda latitudinal entre 20 e 25°S, ou seja: 3,4 sistemas por mês no verão e outono; 4,2 no inverno e 4,7 na primavera.

Tabela 4.2 – Levantamento sazonal dos casos pós-frontais do tipo A (sem chuva), B (com chuva) e E (excluídos) no período do outono de 2000 até a primavera de 2007, com base na Tab. 4.1.

	CASO A	CASO B	CASO E	Total	Média sazonal
verão	8	5	48	61	8,7
outono	22	18	42	82	10,3
inverno	24	20	46	90	11,3
primavera	35	16	52	103	12,9
Total	89	59	188	336	42,0

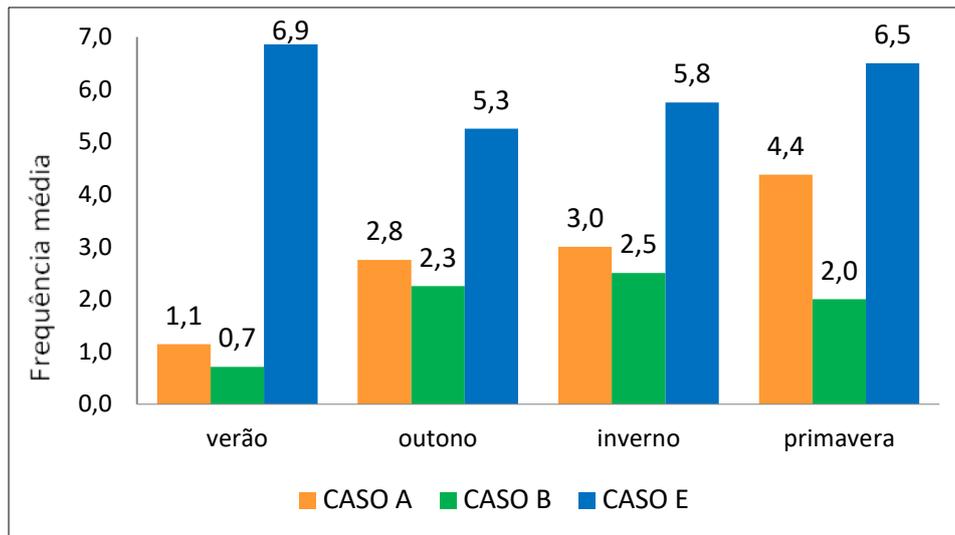


Figura 4.1 – Frequência média sazonal de eventos tipo A, tipo B e tipo E, conforme dados contidos na Tabela 4.2.

Nota-se mais uma vez que os casos tipo E predominam no verão e primavera, quando a ZCAS se estabelece na região e/ou os sistemas frontais não avançam de sul para norte continuamente (frentes semi-estacionárias) e ainda deslocam-se para leste sobre o Oceano Atlântico, impedindo a classificação dos eventos nos tipos A e B. Apenas no verão, dos 61 casos de SFs detectados, 48 (78,7%) foram excluídos. Para as demais estações (outono, inverno e primavera), este valor oscila em torno de 50%.

Verifica-se a partir da Figura 4.1 que casos do tipo A são mais frequentes na primavera, seguido do inverno, outono e por último o verão. Já os casos do tipo B, nos quais a precipitação continua, mesmo após o deslocamento da banda frontal para norte, são mais frequentes no inverno, seguido do outono, primavera e por último o verão. A causa provável para a ocorrência preferencial de eventos do tipo B no inverno está relacionada à posição e intensidade preferenciais nesta época do ano do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e do anticiclone migratório (AM), na retaguarda do sistema frontal, como será discutido a seguir. Comparando-se a frequência de ocorrência dos casos do tipo A e B sazonalmente, nota-se que durante a maior parte do ano há uma leve predominância de casos tipo A, sendo que na primavera tal diferença é acentuada, e o número de casos do tipo A é quase o dobro dos casos do tipo B.

4.2 - Análise dos Compostos

Os 150 eventos (90 casos tipo A e 60 casos tipo B) de passagem de SFs foram analisados através de compostos considerando-se suas condições sinóticas pós-frontais (entre 24 e 48 h após a passagem do SF pelo Rio de Janeiro), utilizando-se dados da Reanálise ERA-Interim de 00 ou 12 Z, dependendo do horário mais próximo ao estabelecimento da situação pós-frontal, como descrito a seguir e ilustrado na Figura 4.2.

As imagens de satélite de dois exemplos de casos do tipo B (um às 00 Z e outro às 12 Z) analisados neste trabalho encontram-se na Figura 4.2. Para o caso de passagem do SF pelo Rio de Janeiro no dia 24/05/2006 (Fig. 4.2 a), foram analisados os campos do dia 25/05/2006 às 00 Z, quando o SF já se encontrava no Espírito Santo (Fig. 4.2 b). Este horário (25/05/2006 – 00 Z) representa então a situação pós frontal para este evento. Por outro lado, para o caso de passagem do SF pelo Rio de Janeiro no dia 26/06/2006 (Fig. 4.2 c), foram analisados os campos de 27/06/2006 às 12 Z (Fig. 4.2d), quando o SF já se encontrava sobre o Espírito Santo, com nebulosidade convectiva sobre o oceano. Ou seja, algumas situações pós-frontais foram analisadas a partir do campo de 00 Z enquanto outras foram analisadas a partir dos campos de 12 Z, dependendo do horário mais próximo ao estabelecimento da situação pós-frontal. Apesar dos distintos horários utilizados (00 e 12 Z), os compostos foram construídos com aproximadamente o mesmo número de casos em cada horário, ou seja, nos casos tipo A (B) foram 44 (29) ocorridos em 00 Z e 46 (31) casos ocorridos em 12 Z.

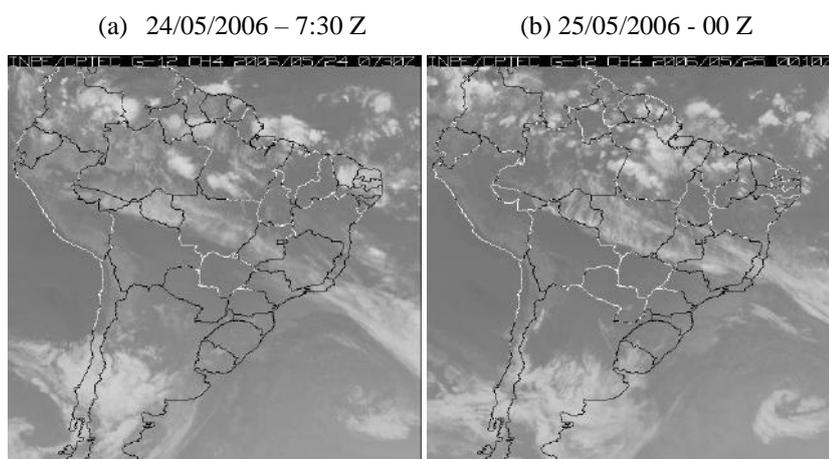


Figura 4.2 – Imagens de satélite de dois casos de passagens de SFs pelo Rio de Janeiro, onde ocorreram situações pós-frontais do tipo B: (a) 24/05/2006 – 7:30 Z, (b) 25/05/2006 - 00 Z , (c) 26/06/2006 – 23 Z e (d) 27/06/2006 – 12 Z.

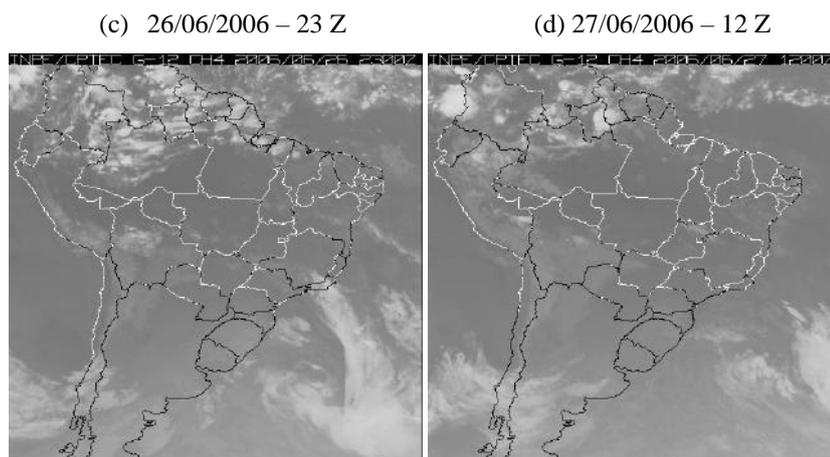


Figura 4.2 – Final.

Os campos médios (compostos) foram então elaborados para análise sendo na situação pós-frontal do tipo A (sem chuva) considerados 90 casos e no tipo B, 60 casos. Tal análise foi feita na tentativa de caracterizar a situação sinótica média observada durante os eventos. Os resultados são apresentados a seguir.

A Figura 4.3 apresenta os compostos dos campos de pressão ao nível médio do mar (PNMM) e divergência dos ventos à superfície para os casos tipo A (Figura 4.3 a) e tipo B (Figura 4.3 b). Nota-se nestes campos duas situações sinóticas distintas: no composto dos casos tipo A (sem chuva) o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) encontra-se afastado do continente, a divergência negativa (convergência) característica da presença do SF está entre o norte do ES e sul da BA e não se nota a presença do Anticiclone Migratório (AM) bem estabelecida na retaguarda do SF. Em tais condições os valores de PNMM sobre o Rio de Janeiro oscilam entre 1016 e 1018 hPa e há convergência dos ventos sobre o Estado, porém inferior a $-0,1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. Nos compostos do tipo B (com chuva) o ASAS encontra-se aproximadamente na mesma posição do que no caso tipo A, e a divergência negativa que marca a posição do SF também entre o norte do ES e sul da BA, contudo com maior intensidade, chegando a valores em torno de $-0,7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ sobre o Rio de Janeiro. A grande diferença entre os campos é a presença do AM, com centro de 1022 hPa sobre o litoral da Região Sul do Brasil e uma crista que se estende até o litoral da Região Sudeste do Brasil, deixando a PNMM mais elevada sobre o Rio de Janeiro (em torno de 1020 hPa).

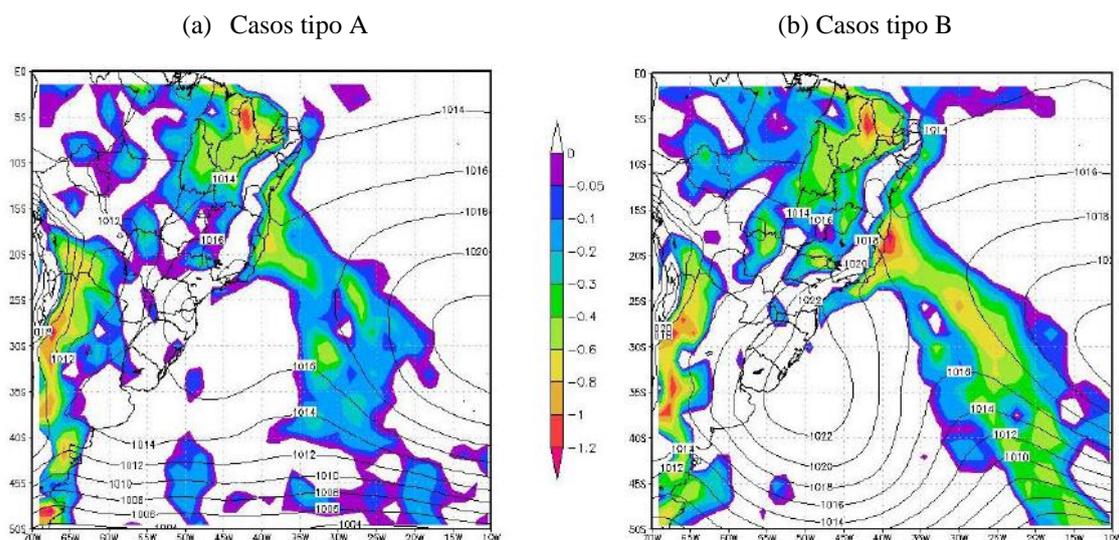


Figura 4.3 – Compostos de pressão ao nível médio do mar (isolinhas a cada 2 hPa) e valores negativos de divergência do vento à superfície ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) para: (a) 90 casos tipo A e (b) 60 casos tipo B.

Os compostos de linhas de corrente e movimento vertical (Omega), ambos em 1000 hPa, associados aos casos tipo A e tipo B são apresentados na Figura 4.4. Nota-se que sobre o Rio de Janeiro, os ventos nos casos tipo A sopram de SE e nos casos tipo B sopram de Sul, perpendiculares à linha da costa do Rio de Janeiro, ambos provenientes do AM, ao sul do SF e com giro anticiclônico. Com relação ao campo de Omega os valores são negativos (movimento ascendente) sobre o Rio de Janeiro em ambos os casos, sendo que nos casos tipo B os valores são mais intensos: em torno de $-4,5 \text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$ nos casos tipo B e de $-2,5 \text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$ nos casos tipo A.

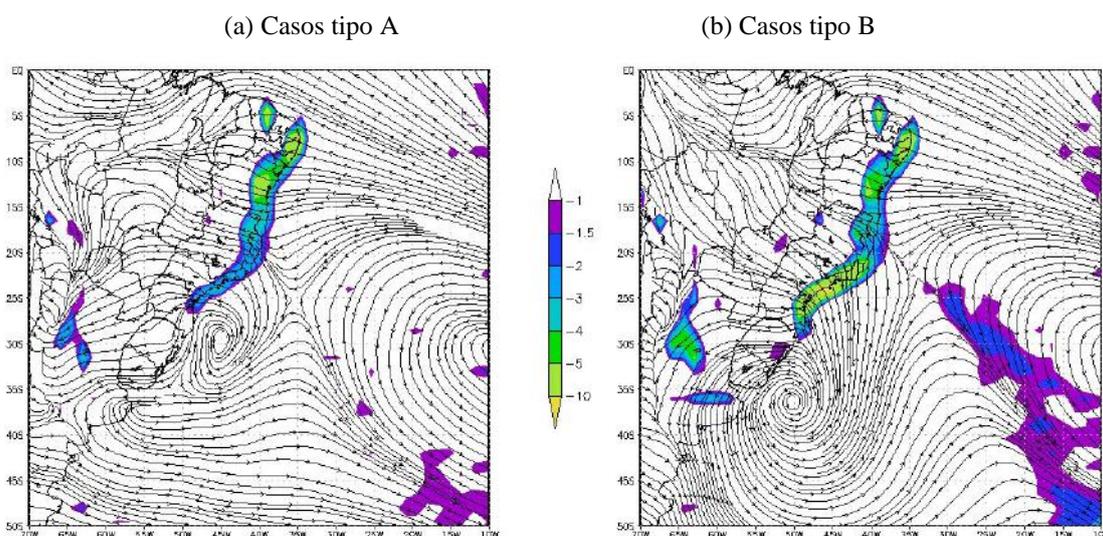


Figura 4.4 – Compostos de Omega (valores negativos em $\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$) e linhas de corrente em 1000 hPa para (a) casos tipo A e (b) casos tipo B.

Na Figura 4.5 encontram-se os compostos de umidade específica ao nível de 1000 hPa para os casos tipo A e B. Pode-se observar que a umidade específica apresenta os mesmos valores para os dois tipos de casos na região em estudo (entre 11 e 12 g/kg), mas nos casos tipo B (Figura 4.5 b) o gradiente de umidade específica é mais intenso, já que nestes casos existe na retaguarda da região frontal uma alta migratória mais intensa, com ar mais seco.

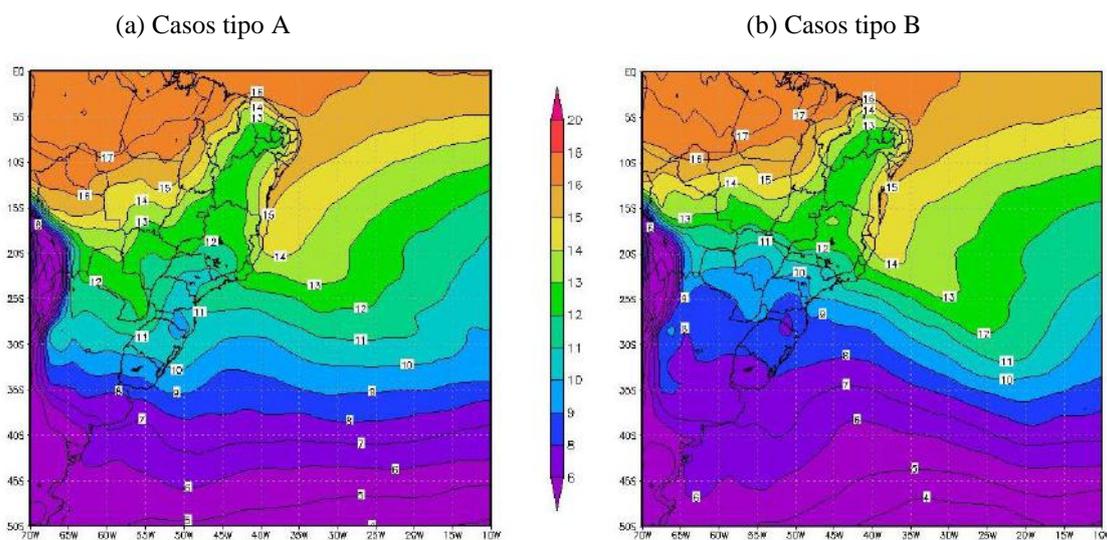


Figura 4.5 – Compostos de umidade específica (intervalos a cada 1 g.kg⁻¹) ao nível de 1000 hPa para (a) casos tipo A e (b) casos tipo B.

Os compostos de temperatura do ar e direção e intensidade do vento ao nível de 1000 hPa são apresentados na Figura 4.6. Como esperado, os ventos provenientes do AM nos casos tipo B são mais intensos do que nos casos tipo A. Além disso, existe um gradiente térmico mais intenso nos casos tipo B do que nos casos tipo A, pois a temperatura do ar nestes casos é mais baixa no centro da alta migratória e nota-se também uma língua de ar frio penetrando sobre o continente, próximo ao litoral, mais proeminente nos casos tipo B (Figura 4.6 b). Nos casos tipo B a interação entre os ventos e as isothermas indica a ocorrência de advecção quente na região, devido à inclinação das isothermas sobre o oceano. Sobre o Rio de Janeiro as temperaturas nos casos tipo A oscilam entre 20 e 22°C e nos casos tipo B entre 18 e 20 °C.

a) Casos tipo A

(b) Casos tipo B

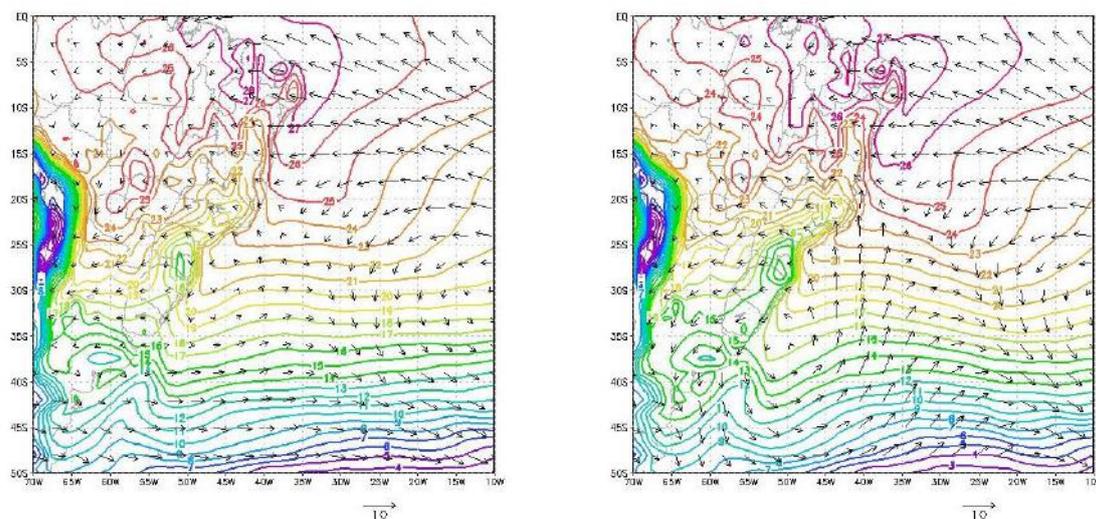


Figura 4.6 – Compostos de temperatura do ar (intervalos de 1 °C) e direção e intensidade do vento à superfície para (a) casos tipo A e (b) casos tipo B.

A Tabela 4.3 resume as principais diferenças entre os 90 casos tipo A e 60 casos tipo B.

Tabela 4.3 - Resumo das principais diferenças entre os compostos formados por 90 casos tipo A e 60 casos tipo B. Valores aproximados na região do Rio de Janeiro.

Campos analisados	Caso A	Caso B
Pressão atm. [hPa]	1016	1020
Divergência de vento [$\times 10^{-5} \cdot s^{-1}$]	-0,1	< -0,7
Omega [hPa. s^{-1}]	> -2,5	< -4,5
Vento	SE; fraco	Sul (perpendicular à costa); moderado
Umidade específica [$g \cdot kg^{-1}$]	entre 11 e 12	entre 11 e 12
Temperatura [°C]	entre 20 e 22	entre 18 e 22 (adv. quente)

4.3 Estudo do Caso de 08/04/2010

Neste subitem são apresentados os resultados do estudo de caso tipo B (com chuva) ocorrido em 08/04/2010. Este caso ocorreu após a passagem da intensa frente fria que atingiu a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) na noite do dia 5 de abril de 2010 e que provocou a morte de 50 pessoas no Morro do Bumba, em Niterói.

De acordo com Calado (2012), o evento de chuvas intensas e ventos fortes (75 km.h^{-1} no Forte de Copacabana), foi provocado por um Sistema Convectivo de Mesoescala (SCM) formado após a passagem do 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, entre 12 Z do dia 05/04 e 12 Z do dia 06/04, mais de 100 mm em toda a cidade, com máximo de 323,0 mm no Sumaré. Antes da passagem do SF, a atmosfera estava quente e úmida e foi instabilizada pela chegada do ar seco e frio que estava na retaguarda do SF. 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 próximo a 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 chuvas extremas que atingiram a RMRJ.

Nos dias que se seguiram à passagem da frente fria, as chuvas continuaram a cair sobre a RMRJ, mesmo com toda a banda de nebulosidade da frente já posicionada a norte do Espírito Santo. O período pós-frontal analisado para este evento foi de 08/04 - 12Z a 09/04 - 12Z.

A Figura 4.7 apresenta as imagens do satélite GOES-12, realçada e no canal visível, para os dias 08 e 09/04/2010 12 Z. Nota-se no dia 08, o posicionamento do SF no norte da Bahia associado a um ciclone extratropical sobre oceano e com nebulosidade convectiva. Contudo verifica-se através da imagem no canal do visível (Figura 4.7 b) nebulosidade estratiforme em todo litoral desde a Região Sul do Brasil até o Rio de Janeiro, inclusive. Tal nebulosidade baixa foi responsável pela precipitação pós-frontal gerada no município do Rio de Janeiro. Na sequência das imagens de satélite (figuras não apresentadas) entre 8/04 – 12 Z e 9/04 – 12 Z, verifica-se que a frente fria e o ciclone extratropical deslocaram-se para norte, predominando apenas nebulosidade estratiforme sobre o oceano e litoral do Brasil. Em 09/04 – 12 Z (Figuras

4.7 c e d) observa-se a presença do SF sobre o norte do Nordeste do Brasil e apenas um resquício do vórtice ciclônico sobre o oceano, a direita da imagem.

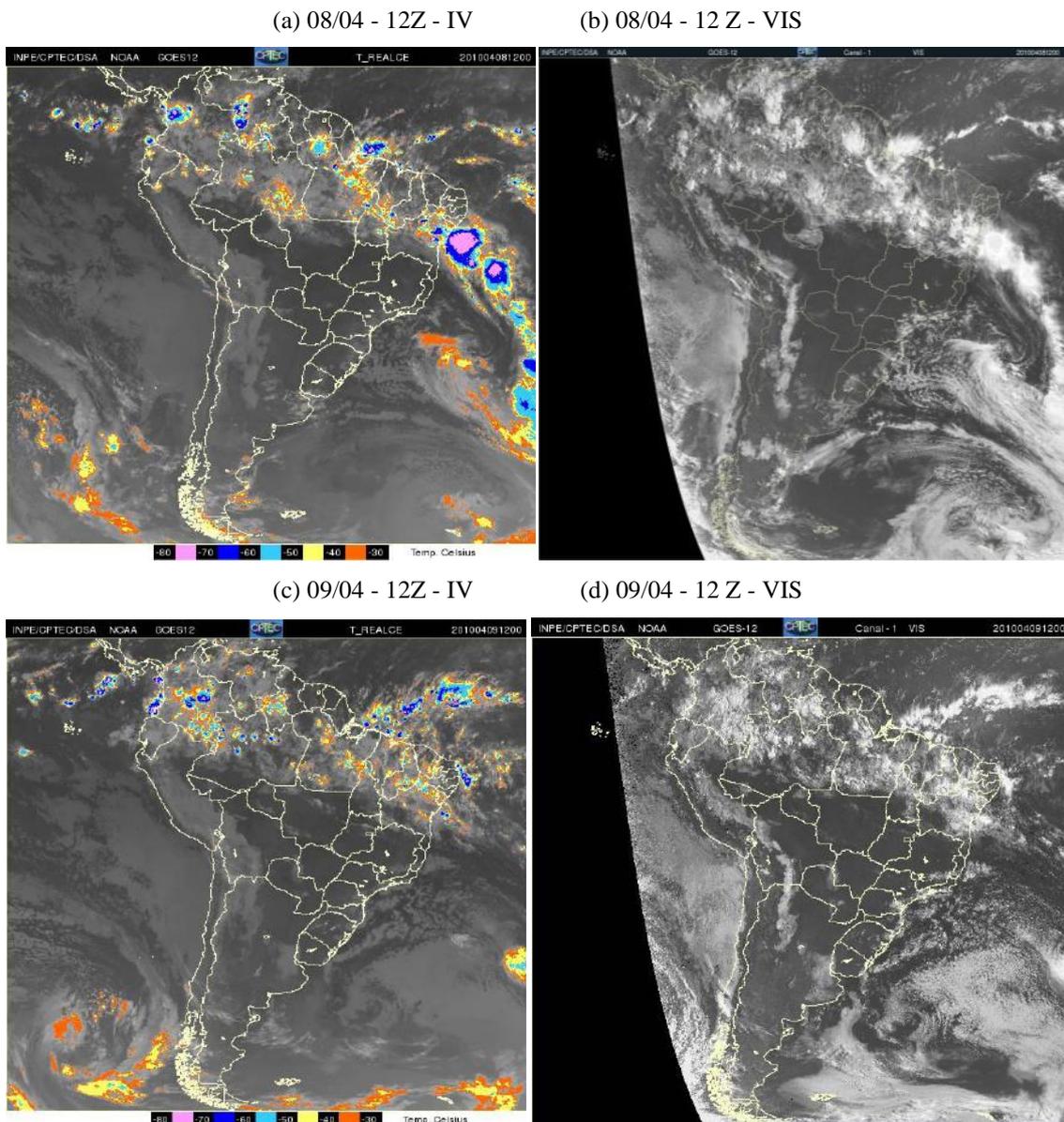


Figura 4.7 -Imagens de satélite dos dias 08 (a e b) e 09 (c e d) de abril de 2010 – 12 Z nos canais do infravermelho - IV (esquerda) e do visível - VIS (direita).

Os totais pluviométricos acumulados no período de 08/04/2010 - 12 Z até 09/04/2010 - 12 Z, bem como sua distribuição na RMRJ são apresentados na Tabela 4.4 e na Fig. 4.8, respectivamente. Pode-se observar que a precipitação foi uniformemente distribuída pelo município, variando entre 10 e 15 mm na maior parte das estações pluviométricas e com alguns pontos máximos nas Zonas Norte e Oeste da cidade, atingindo 24,2 mm no Grajaú, 22,4 mm em Bangu e 20,8 mm em Madureira. Este

padrão é diferente do que se observou em dois estudos de casos deste tipo de sistema em 21/02/2005 (Domingues e Dereczynski, 2005) e em 07/09/2006 (Mello, 2009) quando os máximos concentraram-se no litoral.

Tabela 4.4: Precipitação (mm) acumulada em 24 h no período entre os dias 08/04/10 12Z e 09/04/10 12 Z. Fonte: Alerta-Rio

Estação	Precipitação(mm)	Estação	Precipitação(mm)
ANCHIETA	4,4	LARANJEIRAS	5,8
BANGU	22,4	MADUREIRA	20,8
CACHAMBI	13,0	MENDANHA	9,0
CAMPO GRANDE	10,0	PENHA	7,6
CIDADE DE DEUS	12,6	PIEIDADE	13,8
COPACABANA	5,0	RIO CENTRO	7,0
GEORIO	6,4	SANTA CRUZ	12,0
GERICINÓ	10,2	SANTA TERESA	5,4
GRAJAÚ	24,2	SÃO CONRADO	7,6
GROTA FUNDA	13,8	SAÚDE	6,2
GUARATIBA	6,4	SEPETIBA	9,0
ILHA	7,4	SUMARÉ	14,8
IRAJÁ	12,8	TANQUE	12,2
ITANHANGÁ	20,4	TIJUCA	11,4
ITAÚNA	2,6	URCA	3,6
JARDIM BOTÂNICO	5,0	VIDIGAL	5,0
Fonte: Georio			

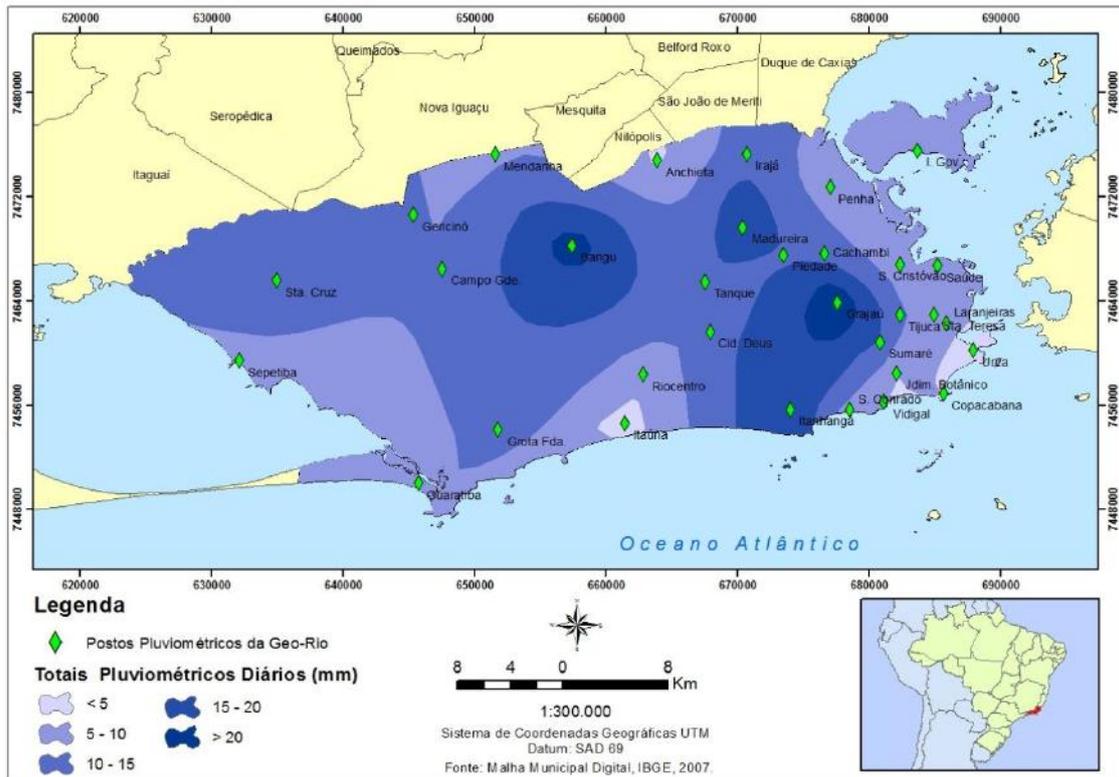


Figura 4.8 - Distribuição espacial da precipitação acumulada entre os dias 08/04/2010 12Z e 09/04/2010 12Z.

A Figura 4.9 apresenta a série temporal do acumulado de precipitação no período de 08 à 09/04/2010 - 12 Z para as estações de Bangu, Madureira e Grajaú onde os totais pluviométricos foram mais elevados. Pode ser observado que a precipitação pós-frontal foi mais forte no período da tarde e noite, chegando a 9,8 mm em 15 minutos em Bangu.

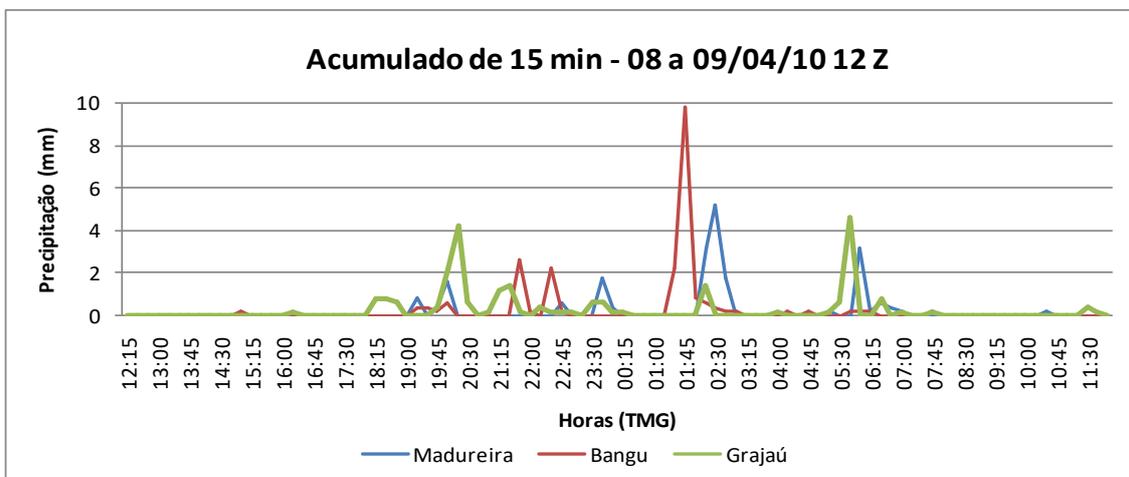


Figura 4.9 - Gráfico da série temporal do acumulado de 15 minutos de precipitação (mm) no período de 08 a 09/04/2010 - 12 Z para as estações de Bangu, Madureira e Grajaú.

A Fig. 4.10 apresenta o comportamento dos ventos nos Aeroportos do Campo dos Afonsos (SBAF), Galeão (SBGL), Jacarepaguá (SBJR) e Santos Dumont (SBRJ), no período de 07/04/2010 - 12 Z até 09/04/2010 - 12 Z. A localização dos aeroportos encontra-se na Fig. 2.2. Comparando-se as séries temporais da Figura 4.10 com a climatologia geral dos ventos no Rio de Janeiro, apresentada no capítulo 3, nota-se inicialmente que o padrão de brisas terrestre e marítima (com ventos fracos de norte e nordeste na madrugada e manhã, e ventos moderados de sul e sudeste na tarde e noite) não foi estabelecido, uma vez que o padrão sinótico predominou. Além disso, de forma geral os ventos sofreram intensificação com relação à climatologia e sopraram predominantemente de quadrante oeste.

Analisando com maior detalhe o comportamento dos ventos na estação do Galeão, nota-se que entre 03 e 08 Z (madrugada), período em que climatologicamente ocorrem ventos de norte, com intensidade predominante entre 0,5 e 3,1 m/s; ocorreram neste horário no dia 08/04 ventos com intensidade média de 5,7 m/s e direção oeste. Ainda na estação do Galeão, período da tarde/noite (entre 15 e 23 Z), os ventos no dia 08/04 sopraram de oeste com velocidade média de 6,3 m/s, enquanto pela climatologia ocorrem velocidades predominantemente entre 3,1 e 5,7 m/s e direção sudeste. Em todo o período pós-frontal analisado os ventos apresentaram-se com maior intensidade do que os valores médios climatológicos.

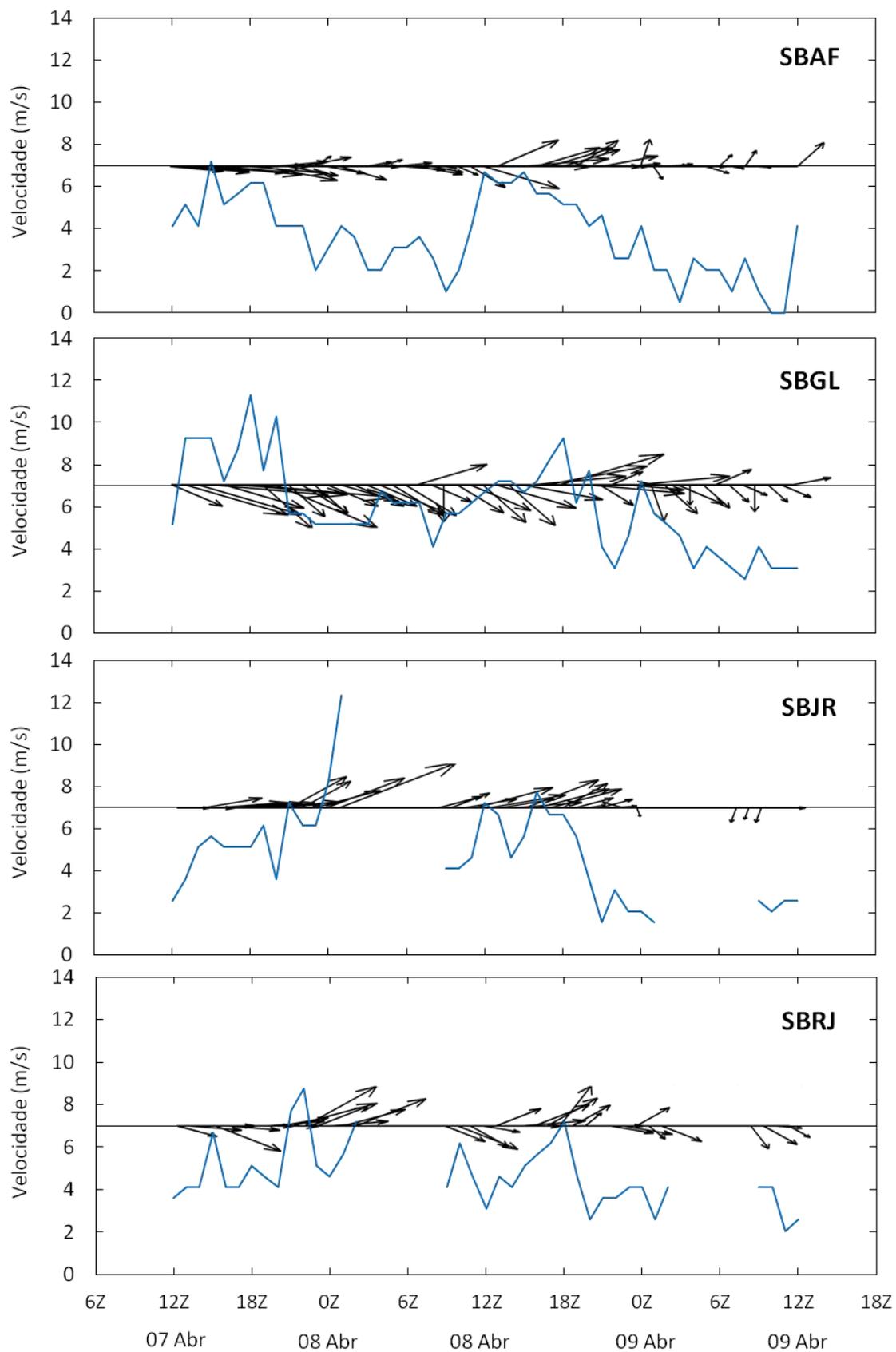


Figura 4.10 - Série temporal do vento nos Aeroportos do Campo dos Afonsos (SBAF), Galeão (SBGL), Jacarepaguá (SBJR) e Santos Dumont (SBRJ), no período de 07/04/2010 - 12 Z até 09/04/2010 - 12 Z .

As características da atmosfera durante o evento de chuva do período de 08 a 09/04/2010 - 12 Z são apresentadas a seguir, inicialmente para os níveis inferiores (superfície e 1000 hPa) e em seguida também para os baixos, médios e altos níveis troposféricos.

A Figura 4.11 mostra os campos de pressão ao nível médio do mar e divergência do vento à superfície para os dias 08 e 09/04 - 12 Z. Nota-se na figura uma intensa convergência na costa do Brasil nos dois dias, desde o Rio Grande do Sul até o Rio de Janeiro, associada à confluência dos ventos provenientes do AM e do centro da baixa pressão sobre o oceano, que acompanha o SF. Do dia 08 para o dia 09 ocorreu apenas um leve deslocamento do SF e do AM para o norte. O ciclone extratropical deslocou-se para leste, de aproximadamente 35°W (dia 08) para 25°W (dia 09) e tornou-se menos profundo (pressão no centro aumentou de 992 hPa para 996 hPa). O centro do AM localizava-se ao sul do Uruguai com pressão central de 1030 hPa no dia 08 e de 1028 hPa no dia seguinte.

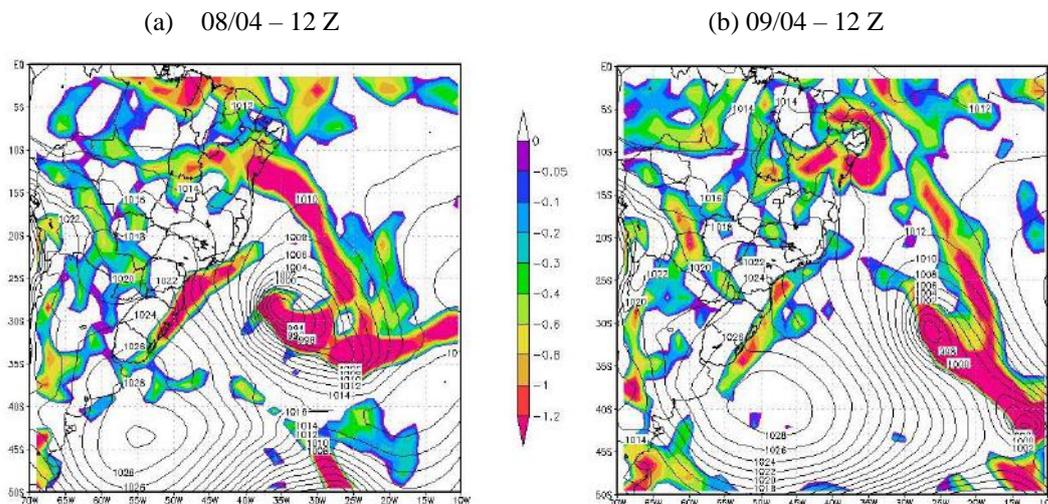


Figura 4.11 – Campos de pressão ao nível médio do mar (isolinhas a cada 2hPa) e valores negativos de divergência do vento à superfície ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) para (a) 08/04/10 - 12 Z e (b) 09/04/10 - 12 Z.

O campo de Omega e linhas de corrente em 1000 hPa (Figura 4.12) apresenta, como na figura anterior, um padrão semelhante ao longo do litoral, com movimento ascendente (que chegam a $-10 \text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$) desde a costa do Rio Grande do Sul até o litoral do RJ, onde predominam ventos perpendiculares à linha da costa.

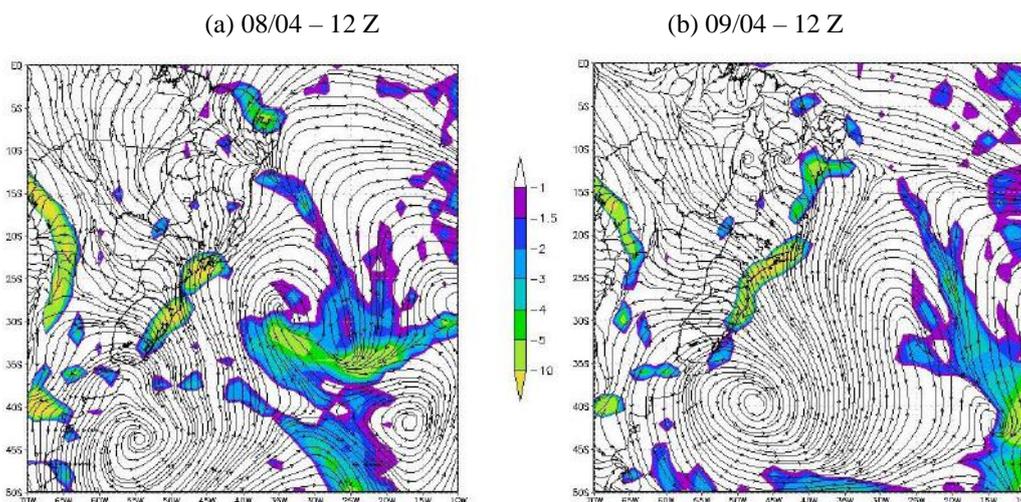


Figura 4.12 – Campos de Omega (sombreado - valores negativos em $\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$) e linhas de corrente em 1000 hPa para (a) 08/04/10 – 12 Z e (b) 09/04/10 – 12 Z.

A partir dos campos de umidade específica (Figura 4.13) em 1000 hPa, é possível observar um forte gradiente de umidade sobre o oceano aproximadamente entre 20 e 30°S, com ar mais seco (úmido) ao sul (norte). Contudo, como a massa de ar seco não avança uniformemente em direção ao norte, a entrada de ar mais seco é mais pronunciada sobre o continente, permanecendo ar mais úmido sobre o oceano e litoral do Rio de Janeiro. No dia 08, tal gradiente de umidade próximo ao Rio de Janeiro é mais intenso (com umidade em torno de 12 a 14 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) do que no dia 09, quando já ocorreu maior mistura entre as massas de ar. O centro de baixa pressão apresentava valores de umidade em torno de 16 e 18 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

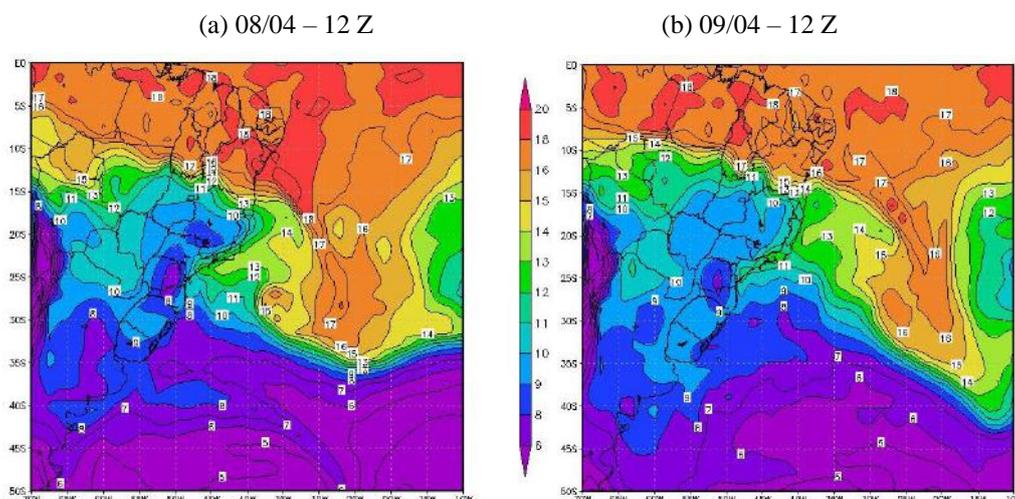


Figura 4.13 – Campos umidade específica (intervalos a cada 1 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) ao nível de 1000 hPa, para (a) 08/04/10 – 12 Z e (b) 09/04/10 – 12 Z.

A Figura 4.14 apresenta os campos de temperatura do ar e ventos e também os campos de advecção térmica, todos em 1000 hPa. Nota-se que ao longo do litoral brasileiro, desde o Rio Grande do Sul até o sul do Rio de Janeiro, ocorreu advecção térmica positiva (negativa) sobre o continente (oceano). A temperatura oscilou em torno de 20 e 21 °C. Nos campos de vento nota-se, como dito anteriormente, que a direção dos mesmos era perpendicular à linha da costa e, além disto, com elevada intensidade (em relação aos ventos que sopram sobre o continente na mesma faixa latitudinal, $> 10 \text{ m.s}^{-1}$), concordando com o observado na Fig. 4.10. Ao penetrar no continente, o giro ciclônico dos ventos, promove ventos de quadrante oeste sobre o Rio de Janeiro.

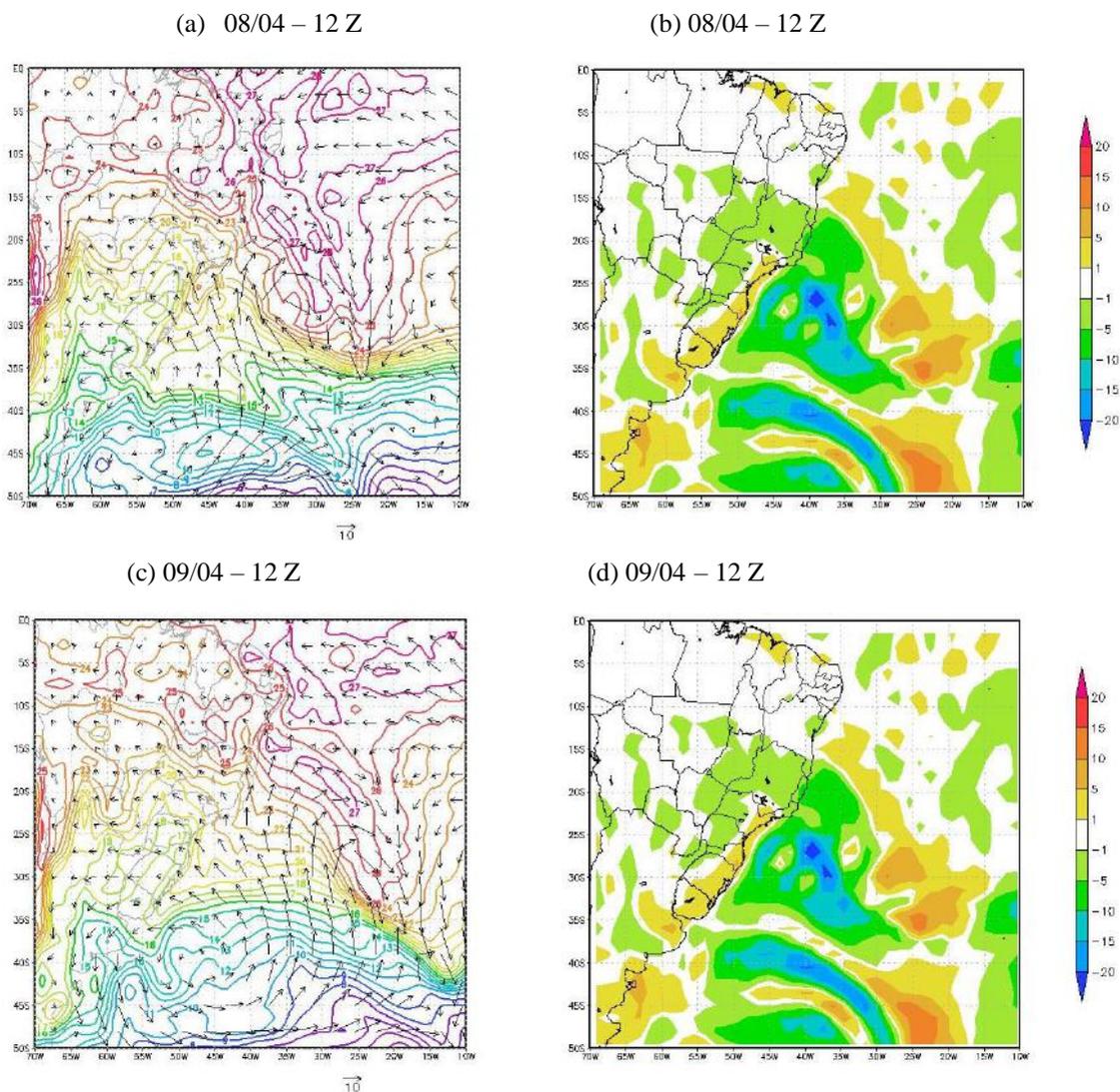


Figura 4.14 – Campos de temperatura do ar (intervalos de 1 °C) e direção e intensidade do vento em 1000 hPa (a) e (c) e advecção de temperatura ($^{\circ}\text{C.dia}^{-1}$) (b) e (d) para 08/04 – 12 Z (superior) e 09/04 – 12 Z (inferior).

Esta primeira parte da análise, restrita à superfície e 1000 hPa, mostrou que as chuvas pós-frontais que ocorreram no litoral do Rio de Janeiro entre os dias 08 e 09/04/10 provenientes de nuvens estratiformes estavam associadas com ventos fortes de sul, que sopravam perpendiculares à linha da costa. Tais ventos convergiram na faixa litorânea, promovendo movimento ascendente. Além disso, as baixas temperaturas na costa favoreceram à saturação do ar, apesar dos baixos valores de umidade específica, pois quanto mais frio o ar, menor sua capacidade de conter vapor de água.

A seguir apresentam-se as análises dos campos meteorológicos em altitude, considerando-se os baixos, médios e altos níveis da troposfera.

Campos de fluxo de umidade verticalmente integrada (na camada 1000-300 hPa) são apresentados na Figura 4.15 para 08 e 09/04 – 12 Z. Nota-se que o fluxo é mais intenso próximo ao vórtice ciclônico ($> 900 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$), onde os ventos são mais fortes e é maior o conteúdo de umidade, permanecendo intenso durante o período estudado. Contudo, na borda leste do ciclone, próximo ao litoral brasileiro o valor do fluxo oscilou entre 300 e 350 $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ no dia 08/04, decaindo para 100 $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ no dia seguinte (09/04).

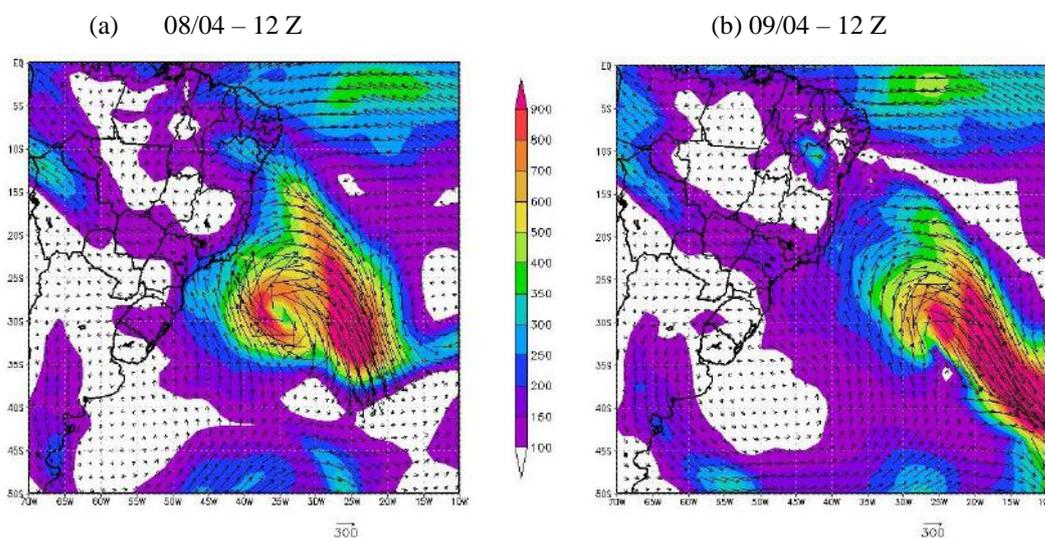


Figura 4.15 – Campos de fluxo de umidade verticalmente integrado na camada 1000-300 hPa (intervalos a cada $50 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$) para (a) 08/04 – 12 Z e (b) 09/04 – 12 Z.

A Figura 4.16 apresenta os campos de omega e linhas de corrente nos níveis 850, 700, 500 e 300 hPa para 08/04 – 12 Z. A partir da figura pode-se observar que o movimento ascendente próximo ao litoral das Regiões Sul e Sudeste do Brasil

predominou apenas nos baixos níveis (até o nível de 850 hPa, $> -10 \text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$, em módulo) e que o escoamento de sul no litoral do Rio de Janeiro persistiu desde a superfície até o nível de 500 hPa. O centro de baixa pressão (alta pressão) associado ao SF, descrito anteriormente à superfície, se estendeu até o nível de 300 hPa (700 hPa), com características barotrópicas. O cavado que intensificou o SF na alta troposfera, ao nível de 500 hPa, ainda era possível de ser observado, mas com sua região leste localizando-se sobre o Oceano e distante do Rio de Janeiro, não fornecendo suporte dinâmico de altos níveis à geração de convecção.

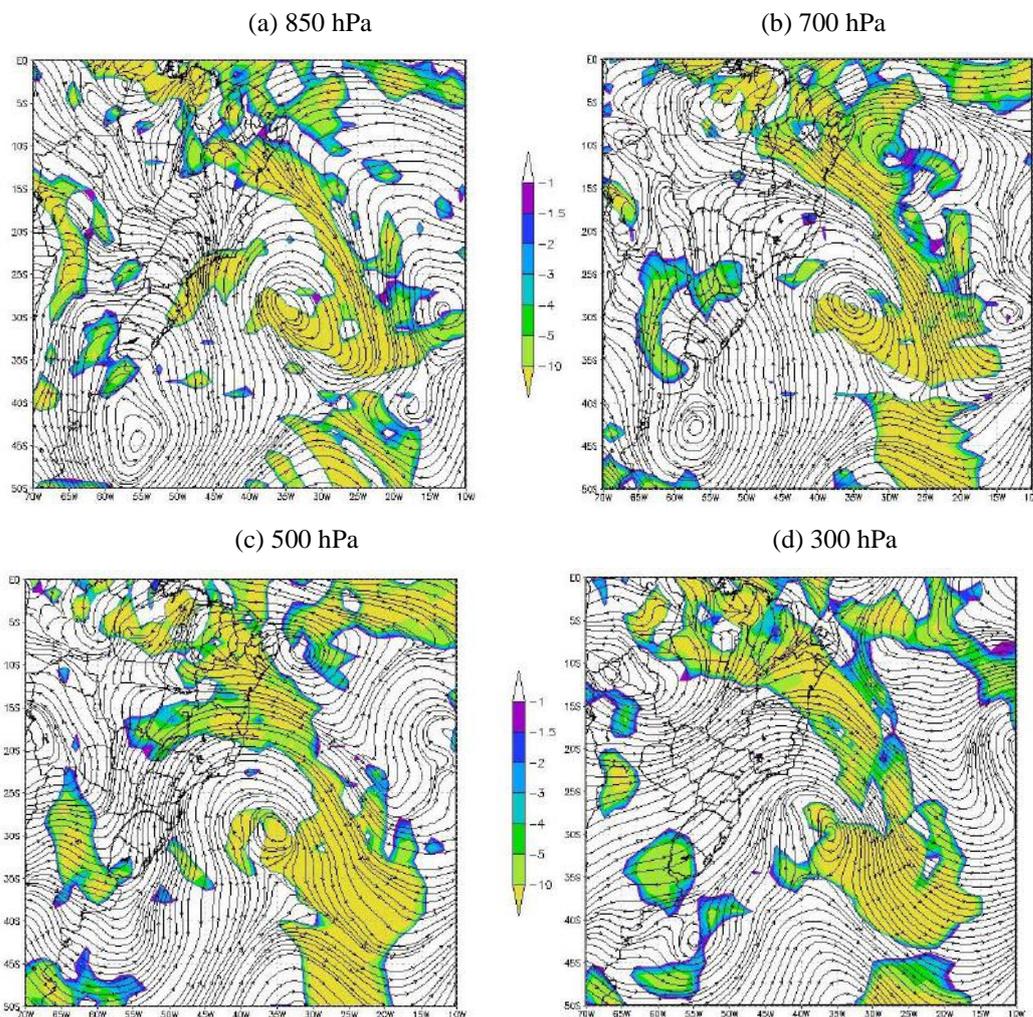


Figura 4.16 – Campos de omega (valores negativos em $\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$) e linhas de corrente em 08/04/10 - 12 Z nos níveis: (a) 850 hPa; (b) 700 hPa; (c) 500 hPa; (d) 300 hPa.

A Figura 4.17 apresenta os campos de temperatura do ar e direção e intensidade do vento e também advecção térmica para 08/04 – 12 Z nos níveis 850 hPa, 700 hPa, 500 hPa e 300 hPa. Observa-se que a advecção quente no litoral da Região Sul do Brasil

e de São Paulo (como observado também no nível de 1000 hPa) se estende apenas até o nível de 850 hPa. Nos demais níveis predomina advecção fria (entre -1 e -5 °C.dia⁻¹ em 850 hPa e entre -5 e -10 °C.dia⁻¹ nos demais níveis), devido ao escoamento vindo do AM, que apresentava ar mais frio que o entorno.

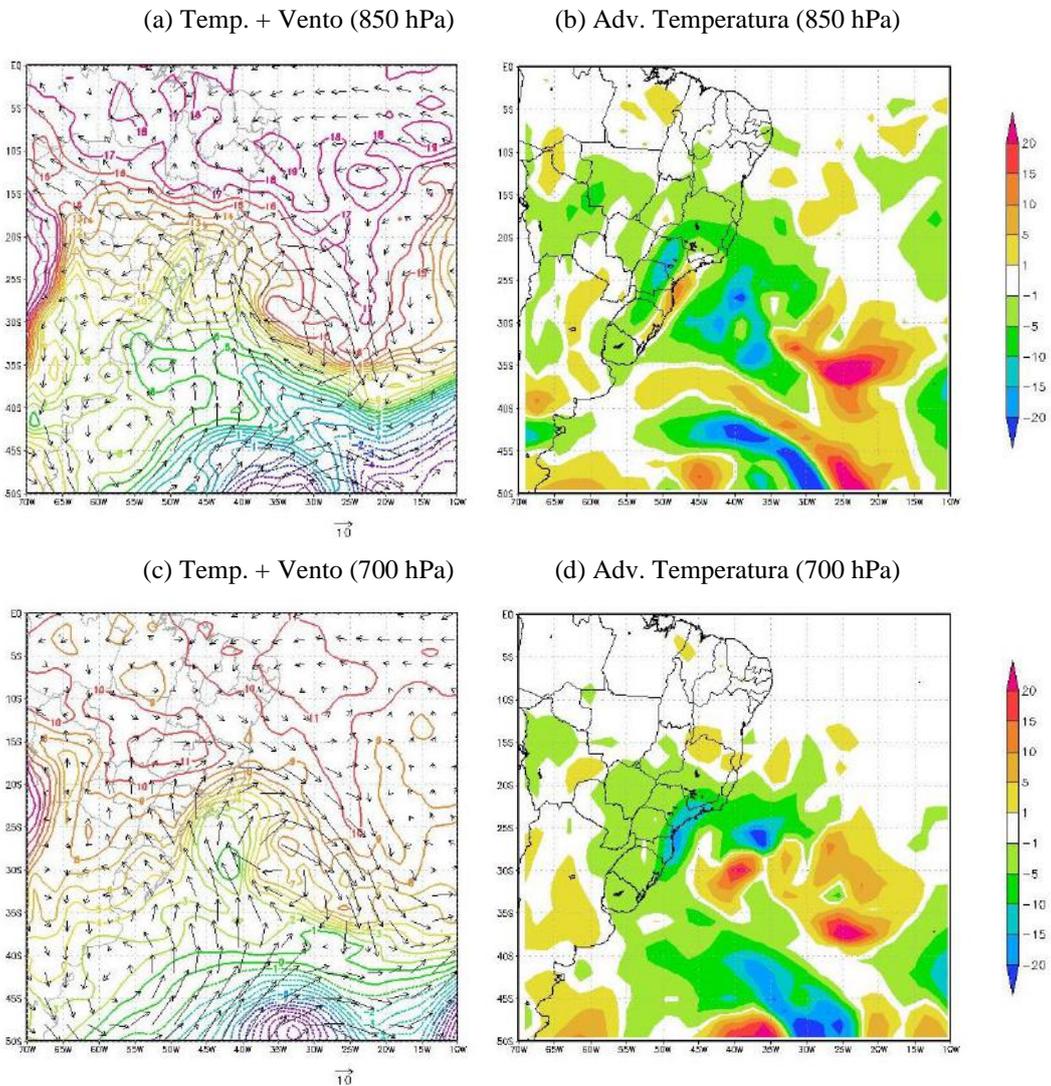


Figura 4.17 – Campos de temperatura do ar (intervalos a cada 1 °C) e direção e intensidade do vento (coluna esquerda) e advecção térmica (°C.dia⁻¹) (coluna direita) em 08/04/10 - 12 Z para os níveis de 850 hPa (a e b), 700 hPa (c e d), 500 hPa (e e f) e 300 hPa (g e h).

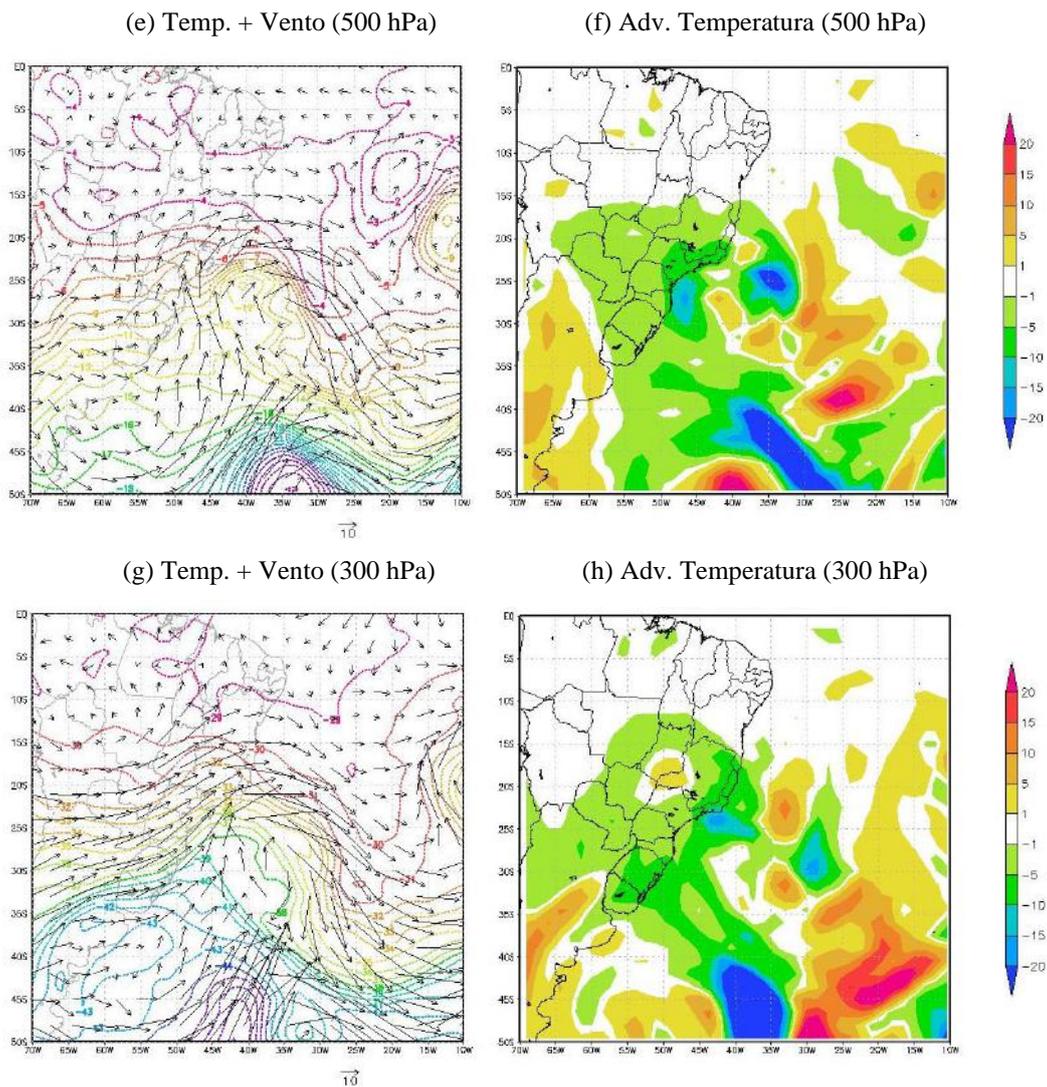


Figura 4.17 – Final.

O campo de espessura da camada entre 500 e 1000 hPa (Figura 4.18) confirma o que foi notado no campo de temperatura do ar em 1000 hPa. Pode-se observar a entrada de ar frio (menores valores de espessura) sobre o continente e Oceano, a partir do sul do continente e penetração de ar quente (maiores valores de espessura), a partir das baixas latitudes.

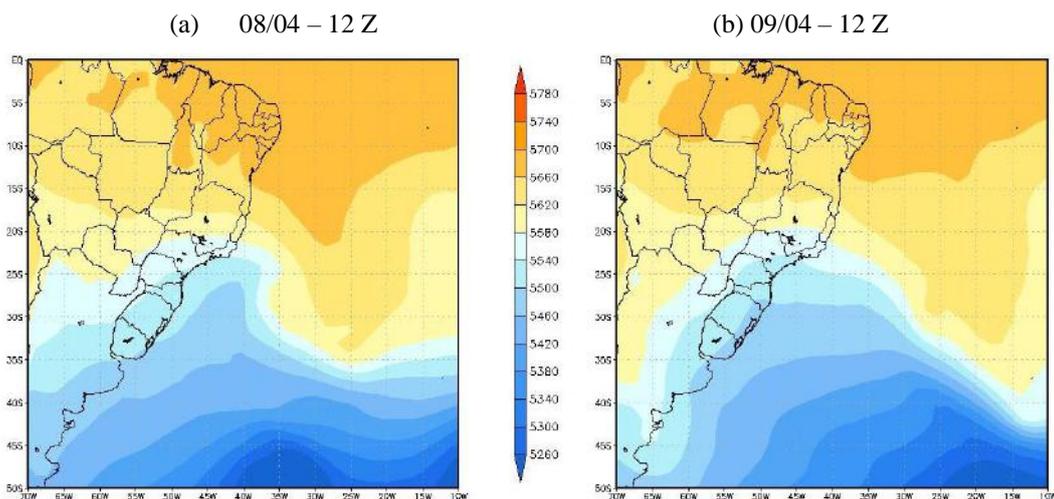


Figura 4.18 – Campo de espessura (mgp) da camada 500 – 1000 para (a) 08/04 – 12 Z e (b) 09/04 – 12 Z.

Os campos de vorticidade relativa e linhas de corrente ao nível de 300 hPa (Figura 4.19) para os dias 08 e 09/04 – 12 Z, mostram forte vorticidade ciclônica nos altos níveis (maior que $-15 \cdot 10^{-5} \cdot s^{-1}$ - em módulo), na posição do centro da baixa pressão, gerando com isto vorticidade ciclônica também sobre o Rio de Janeiro (entre -1 e $-3 \cdot 10^{-5} \cdot s^{-1}$).

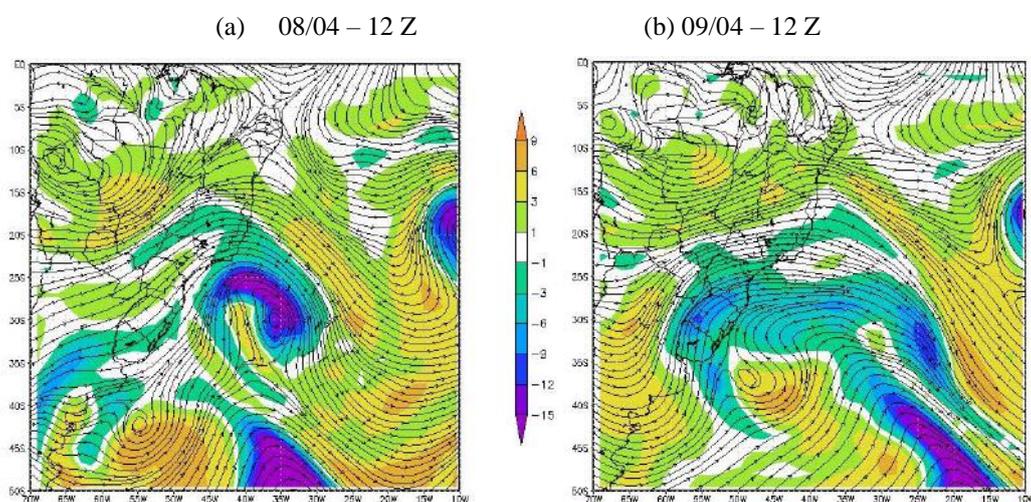


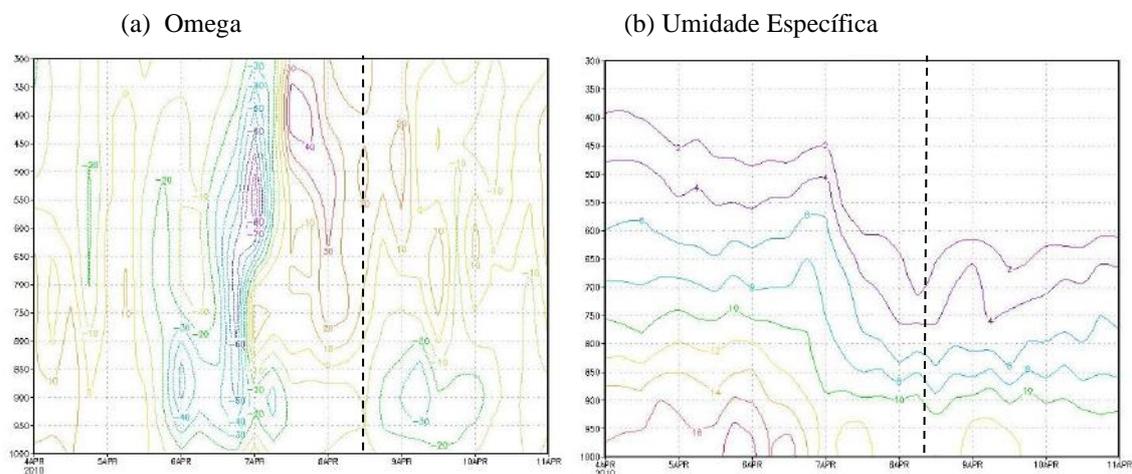
Figura 4.19 – Campos de vorticidade relativa ($10^{-5} \cdot s^{-1}$) e linha de corrente em 300 hPa para (a) 08/04 – 12 Z e (b) 09/04 – 12 Z.

A Figura 4.20 apresenta a evolução temporal (entre os dias 04 e 11/04) dos perfis verticais de omega, umidade específica, temperatura do ar e direção e intensidade do vento horizontal, sobre um ponto localizado no município do Rio de Janeiro ($22,5^{\circ}S/43,5^{\circ}W$).

Nota-se inicialmente a passagem do SF no dia 06/04, mais aparente no perfil de Omega (Figura 4.20 a), com intensificação do movimento ascendente (máximo de -90 hPa.s^{-1} entre 500 e 600 hPa) e posterior predomínio do movimento subsidente nos altos e médios níveis (máximo de 40 hPa.s^{-1} em 400 hPa). Contudo, nota-se também na Figura 4.20a que no período pós-frontal analisado (entre 08 e 09/04), continuou predominando movimento ascendente (apesar de fraco $< -30 \text{ hPa.s}^{-1}$, em módulo) desde superfície até 850 hPa.

No perfil de umidade específica (Fig. 4.20 b), nota-se uma queda acentuada da umidade após a passagem do SF a medida que o ar frio e seco penetra na região, sendo que tal variação temporal ocorreu primeiramente nos níveis inferiores e somente depois nos níveis médios (dia 06/04). Por exemplo, ao nível de 900 hPa a umidade específica caiu de 16 g/kg no dia 06/04 para 10 g/kg no dia 07/04. Por outro lado, entre 750 e 450 hPa, a umidade declinou somente um dia depois (no dia 07/04) e também de forma bem abrupta. As condições de umidade atingidas no dia 07/04 perduraram durante o período pós-frontal. No perfil de temperatura do ar (Fig. 4.20 c) também ocorreu rápida queda no dia 07/04, no entanto, para esta variável a mudança ocorreu em todos os níveis da atmosfera ao mesmo tempo, desde a superfície até 300 hPa. No período das chuvas pós-frontais (entre 08 e 09/04) o ciclo diurno da temperatura do ar já estava estabelecido, observando-se mínimas próximo às 06 Z e máximas às 18 Z.

A partir da Figura 4.20d nota-se que os ventos permaneceram de quadrante sul em todos os níveis e com elevada intensidade após a passagem do SF. Além disso, nota-se um giro horário do vento com a altitude no dia 08/04, indicando advecção fria desde os baixos até os altos níveis.



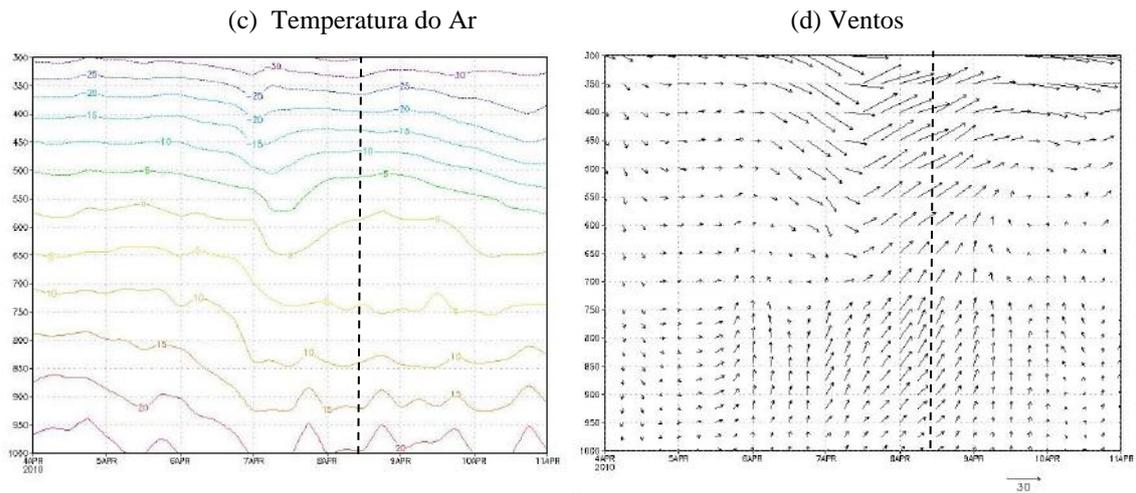


Figura 4.20 – Evolução temporal dos perfis verticais de (a) omega ($\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$); (b) umidade específica ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$); (c) temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) e (d) vento horizontal (m/s) para o período de 04 a 11/04 sobre o ponto de grade da Reanálise ERA-Interim localizado em $22,5^{\circ}\text{S}/43,5^{\circ}\text{W}$.

4.4 Estudo do Caso de 14/05/2010

Neste subitem são apresentados os resultados do estudo de caso tipo A (sem chuva) ocorrido em 14/05/2010.

De acordo com o Boletim Climanálise do CPTEC de maio de 2010, o SF que atingiu o Rio de Janeiro no dia 12/05 foi o segundo do mês e formou-se a partir da intensificação de um vórtice ciclônico em médios e altos níveis próximo à costa da Região Sul do Brasil, no dia 11. O sistema provocou chuvas mais intensas principalmente no leste de Santa Catarina e no nordeste do Rio Grande do Sul, ocasionando, inclusive, granizo no Paraná. A massa de ar frio que acompanhava o sistema afetou principalmente as Regiões Sul e Sudeste. Após o dia 13/05 o sistema, posicionado na altura do Espírito Santo, deslocou-se para o oceano. O período pós-frontal considerado para este evento foi de 14/05 12 Z até 15/05 12Z, quando o SF já estava sobre o oceano, na altura do litoral da Bahia.

Aqui são analisados os mesmos campos meteorológicos do caso tipo B ocorrido em 08/04/2010 12 Z, como forma de comparação entre as duas situações.

A Figura 4.21 apresenta as imagens de satélite GOES-13, realçadas no canal infravermelho e no canal visível, para os dias 14 e 15/05/2010 12 Z. Observa-se o posicionamento do SF sobre o Oceano no dia 14 na altura do centro da Bahia e sem nebulosidade sobre o Rio de Janeiro, contrariamente ao caso tipo B. No dia 15/05, pode-se notar a presença de um sistema que se deslocava a leste da Argentina, mas ainda não provocava influências no Rio de Janeiro.

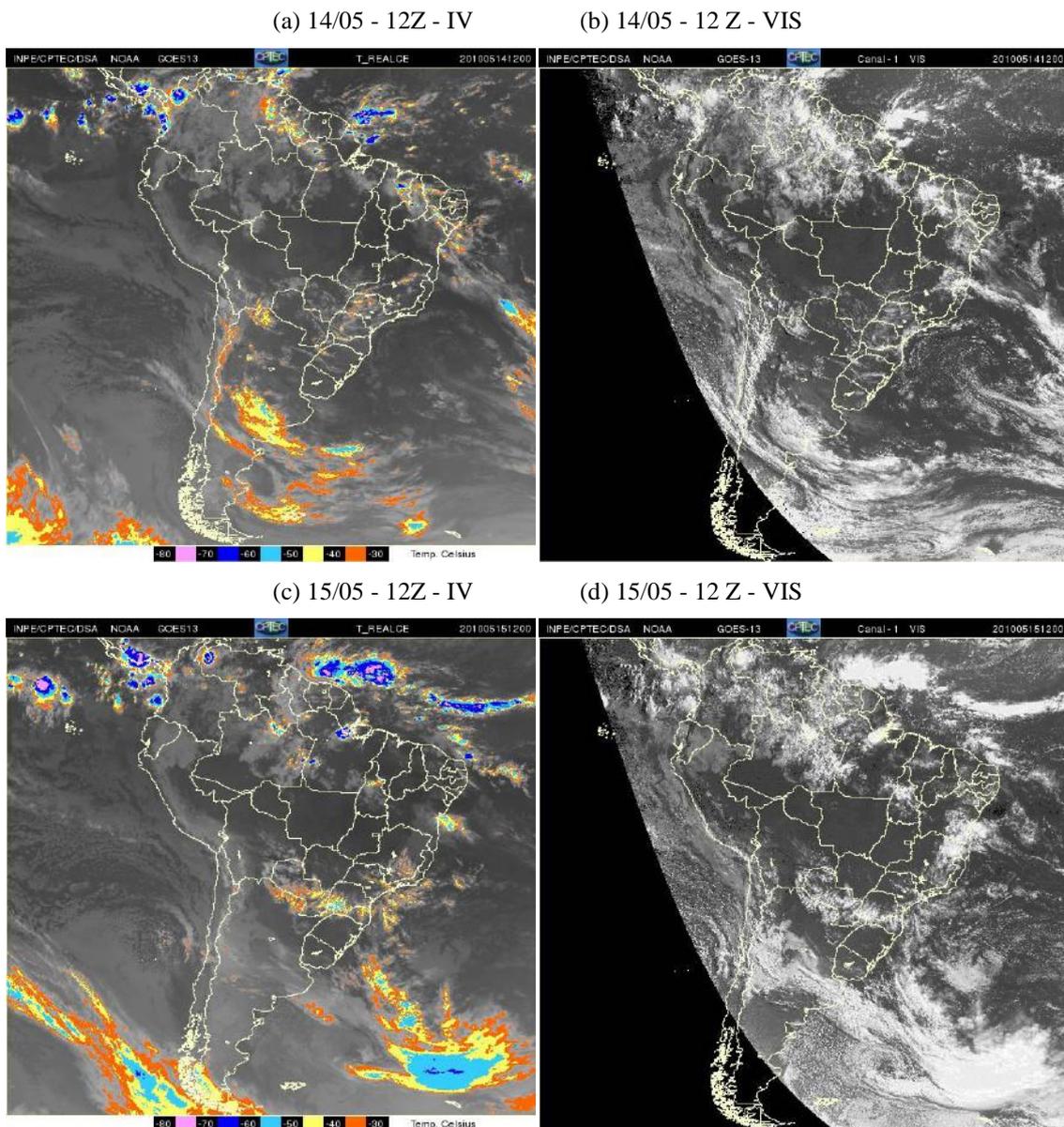


Figura 4.21 – Imagens de satélite dos dias 14 (a e b) e 15 (c e d) de maio de 2010 – 12 Z nos canais do infravermelho - IV (esquerda) e do visível - VIS (direita).

A Figura 4.22 apresenta o comportamento do vento nos Aeroportos do Campo dos Afonsos (SBAF), Galeão (SBGL), Jacarepaguá (SBJR) e Santos Dumont (SBRJ), no período de 13/05/2010 - 12 Z até 15/05/2010 - 12 Z.

Comparando-se a série temporal do vento com a climatologia para os aeroportos SBGL e SBRJ, apresentada ao fim do capítulo 3, pode-se observar que para SBRJ a série temporal é semelhante à climatologia, já para SBGL nota-se vento de norte antes das 12 Z, o que não é observado na climatologia.

SBJR apresenta comportamento de brisa (também discutido no capítulo 3), com ventos de sul no período tarde-noite e ventos de norte e de intensidade reduzida, no

período madrugada-manhã. O mesmo pode ser observado para SBAF, mesmo este se encontrando em uma posição mais ao norte, afastado da costa.

Comparando-se o comportamento dos ventos entre os casos A (14/05) e B (08/04), observa-se como característica principal a diferença entre a intensidade do vento, que é maior no caso B.

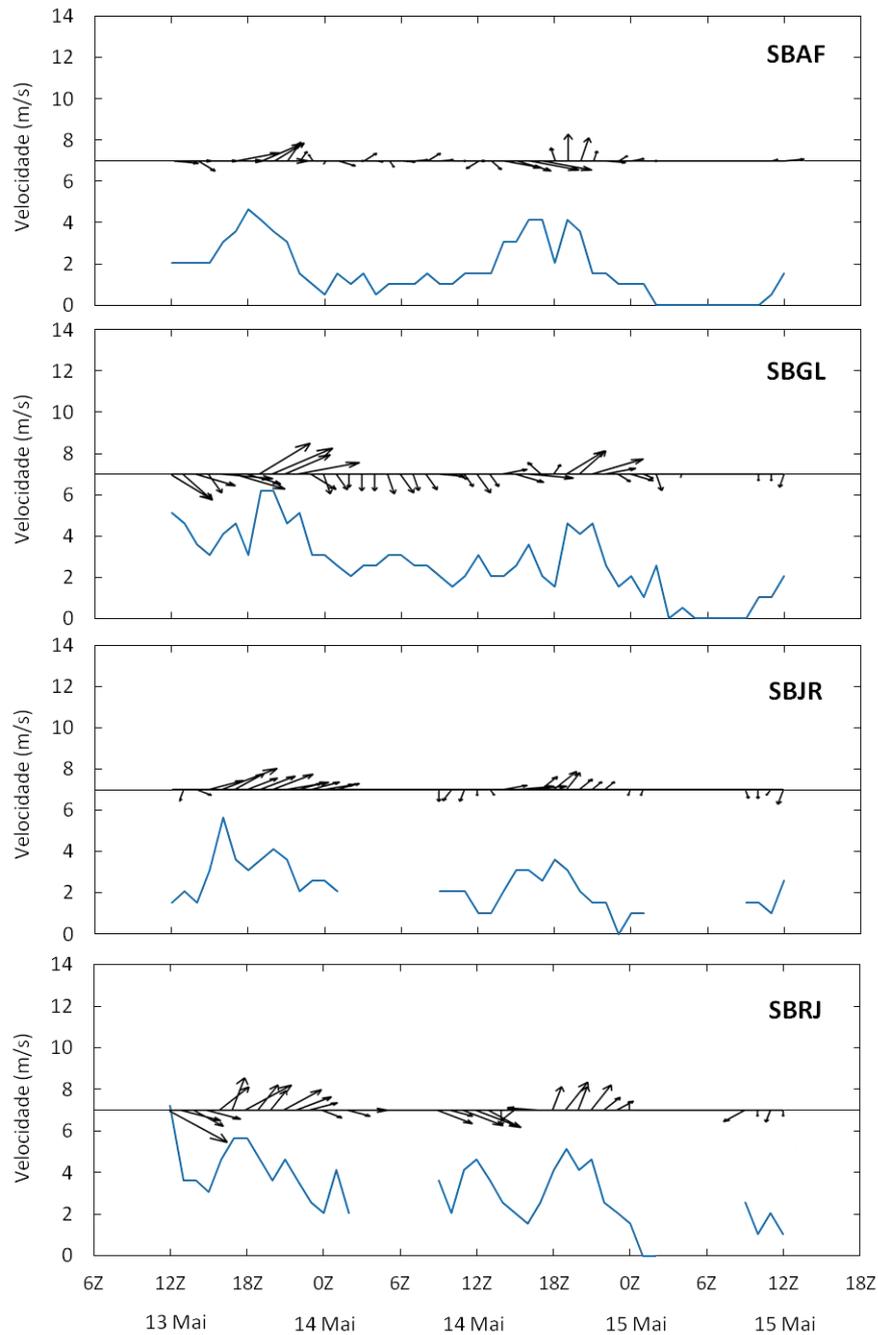


Figura 4.22 - Série temporal do vento nos Aeroportos do Campo dos Afonsos (SBAF), Galeão (SBGL), Jacarepaguá (SBJR) e Santos Dumont (SBRJ), no período de 13/05/2010 - 12 Z até 15/05/2010 - 12 Z .

A seguir são apresentadas as características da atmosfera durante o evento sem chuva pós-frontal no período de 14 a 15/05/2010 - 12 Z, inicialmente para os níveis inferiores (superfície e 1000 hPa) e posteriormente para os baixos, médios e altos níveis troposféricos.

A Figura 4.23 mostra os campos de pressão ao nível médio do mar e divergência do vento à superfície para os dias 14 e 15/05 - 12 Z. No dia 14/05, a borda do AM encontrava-se sobre o Rio de Janeiro (que apresentava valor de pressão em torno de 1019 hPa), mas ainda havia interação entre o sistema de baixa pressão e o AM (com pressão central de 1022 hPa sobre o leste de SC). Pode-se notar que, ainda no dia 14/05, havia convergência na costa sul do Brasil até o Rio de Janeiro, devido à confluência dos ventos de quadrante sul provenientes do AM e do centro de baixa pressão associado ao SF, contudo os valores são inferiores aos observados no caso B. No dia 15/05 observa-se o deslocamento dos sistemas para leste e o aprofundamento do sistema de baixa pressão, de 1010 hPa no dia 14/05 para 1008 hPa. Nota-se que as intensidades do AM e do ciclone associado ao SF, foram maiores no caso tipo B (1030 e 992 hPa, respectivamente) do que no caso tipo A (1022 e 1008 hPa), promovendo assim maiores gradientes de pressão e consequentemente ventos mais intensos no caso tipo B do que no caso tipo A, o que confirma a análise comparativa dos ventos observados para os dois casos.

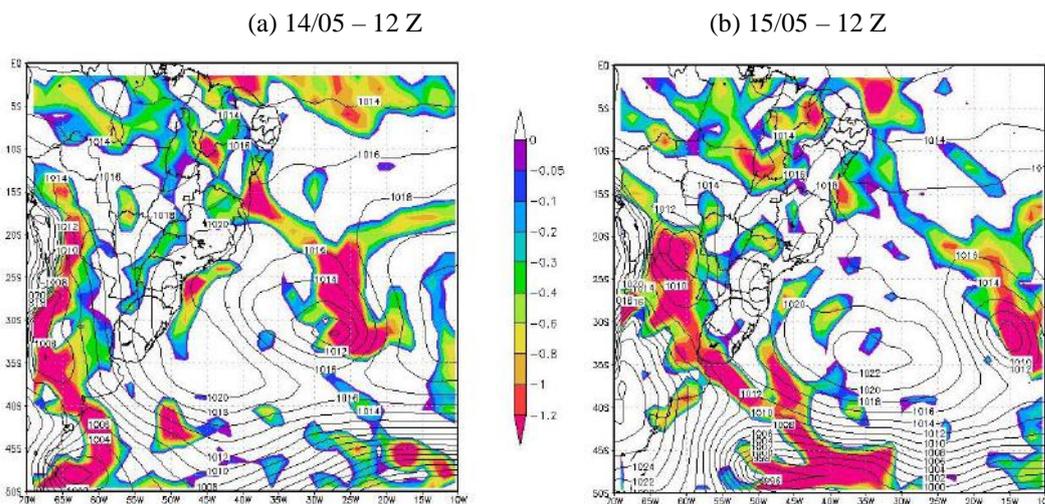


Figura 4.23 – Campos de pressão ao nível médio do mar (isolinhas a cada 2 hPa) e valores negativos de divergência do vento à superfície ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) para (a) 14/05/10 - 12 Z e (b) 15/05/10 - 12 Z.

O campo de Omega e linhas de corrente em 1000 hPa (Figura 4.24) mostra que, em associação à convergência que estava ocorrendo na costa sul do Brasil no dia 14/05,

ocorreu movimento ascendente na costa de São Paulo, embora não houvesse movimento ascendente sobre o Rio de Janeiro ao longo do período pós-frontal. Ainda no dia 14/05, devido ao posicionamento do centro de baixa pressão, o vento no Rio de Janeiro era de SW, devido a um desvio proveniente da confluência dos ventos do AM e do sistema de baixa pressão. No dia 15/05 o vento no Rio de Janeiro era de SE, proveniente do AM, que se deslocou. No caso tipo B, o vento próximo ao Rio de Janeiro também era proveniente do AM e do ciclone, mas a direção predominante do vento era perpendicular à costa do Rio de Janeiro (vento de sul), o que contribuiu para o movimento ascendente na linha de costa ($\sim -10 \text{ hPa.s}^{-1}$).

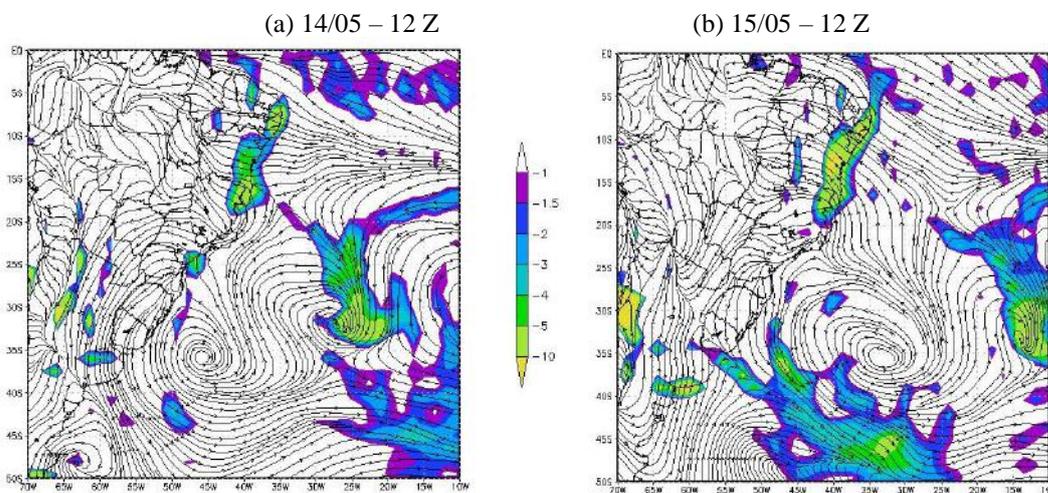


Figura 4.24 – Campos de Omega (sombreado - valores negativos em hPa.s^{-1}) e linhas de corrente em 1000 hPa para (a) 14/05/10 - 12 Z e (b) 15/05/10 - 12 Z.

A partir do campo de umidade específica (Figura 4.25) em 1000 hPa, observa-se baixo teor de umidade na região em estudo (entre 11 e 12 g.kg^{-1}). Entre os dias 14 e 15/05 houve diminuição no gradiente de umidade, que se encontrava sobre o continente no norte do Espírito Santo. No sistema de baixa pressão a umidade não era muito elevada, com valores entre 15 e 16 g.kg^{-1} , diferente do caso tipo B, em que o ciclone apresentava valores entre 16 e 18 g.kg^{-1} . No caso tipo B, o gradiente de umidade encontrava-se sobre o Rio de Janeiro, associado a uma língua de ar úmido no litoral e oceano adjacente.

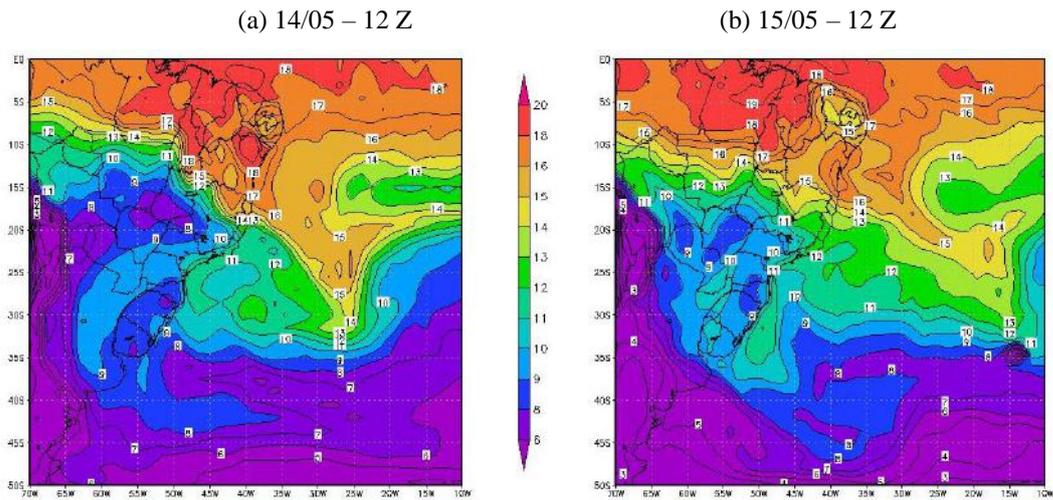
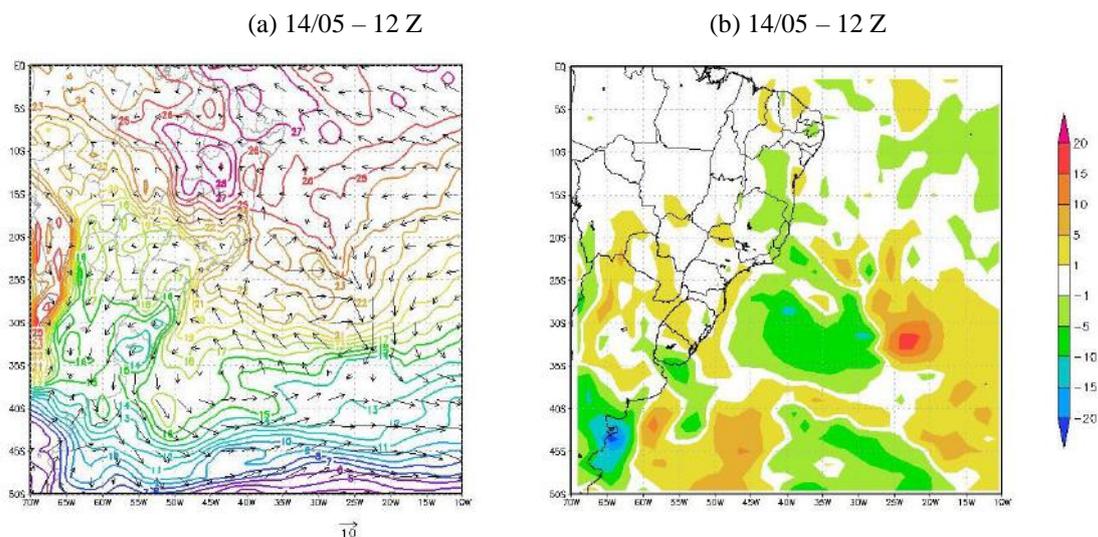


Figura 4.25 – Campos umidade específica (intervalos a cada 1 g.kg^{-1}) ao nível de 1000 hPa, para (a) 14/05/10 – 12 Z e (b) 15/05/10 – 12 Z.

A Figura 4.26 apresenta os campos de temperatura do ar e vetor vento e também os campos de advecção térmica, todos em 1000 hPa. No dia 14/05, associado à convergência dos ventos (Fig. 4.23), ocorreu advecção térmica positiva na costa sul do Brasil. No Rio de Janeiro a advecção térmica foi neutra e a temperatura oscilou entre 20 e 21 °C ao longo do período. Nos campos de vento, nota-se a mudança no sentido dos mesmos de um dia para outro, como dito anteriormente e com fraca intensidade ($< 10 \text{ m.s}^{-1}$), o que concorda com o vento observado (Fig. 4.22). No caso tipo B ocorreu advecção térmica positiva (negativa) sobre o litoral (oceano) e o vento era intenso ($> 10 \text{ m.s}^{-1}$) e de sul, sobre o Rio de Janeiro a advecção foi negativa (entre -5 e $-1 \text{ }^\circ\text{C.dia}^{-1}$).



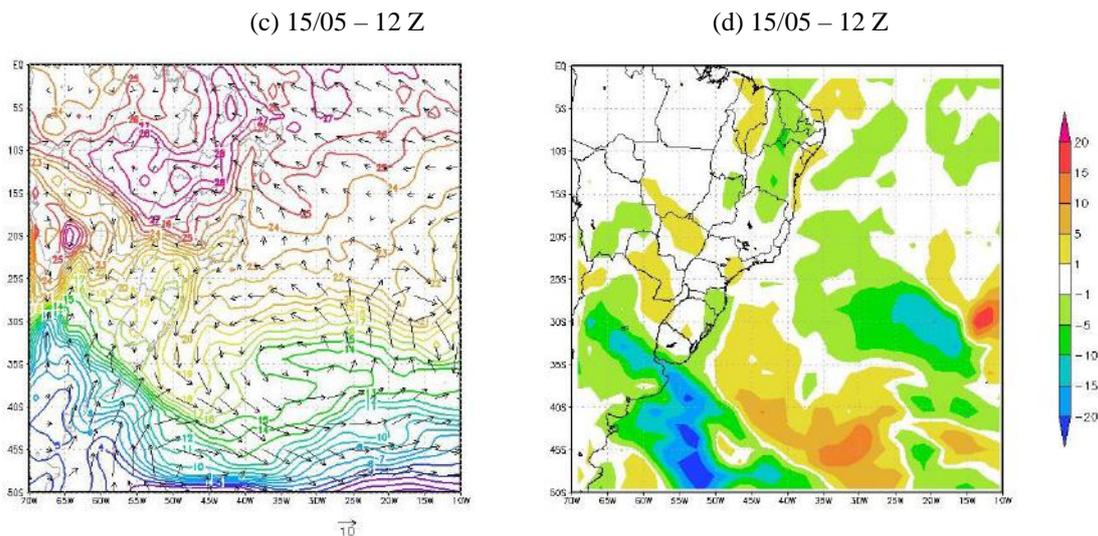


Figura 4.26 – Campos de temperatura do ar (intervalos de 1 °C) e direção e intensidade do vento em 1000 hPa (a) e (c) e advecção de temperatura (°C.dia⁻¹) (b) e (d) para 14/05 – 12 Z (superior) e 15/05 – 12 Z (inferior).

Esta primeira parte da análise, restrita entre a superfície e 1000 hPa, mostrou que, no caso sem chuva pós-frontal ocorrido entre os dias 14 e 15/05/10 no Rio de Janeiro, não estava ocorrendo convergência de vento no litoral, o movimento vertical era subsidente e advecção de temperatura era nula. Além disso, o posicionamento do AM ao sul da região em estudo e o ciclone sobre o oceano, ambos não muito intensos, estavam gerando ventos fracos de componente oeste que mantinham a estabilidade da atmosfera. Em comparação com o caso do tipo B ocorrido em 08/04/10, em que o vento era de sul e forte, pode-se afirmar que a direção e intensidade do vento na região é fator determinante para a caracterização do evento de chuva ou não chuva, pois auxilia no transporte de umidade, convergência e movimento ascendente junto à costa.

A seguir apresentam-se as análises dos campos meteorológicos em altitude, considerando-se os baixos, médios e altos níveis da troposfera.

A Figura 4.27 apresenta os campos de fluxo de umidade verticalmente integrada (na camada 1000-300 hPa) para os dias 14 e 15/05 – 12 Z. Pode-se notar grande fluxo de umidade (entre 800 e 900 kg.m⁻¹.s⁻¹) a nordeste do vórtice ciclônico, enfraquecendo ao longo do período. Nota-se que sobre o Rio de Janeiro não há transporte de umidade durante o período estudado, provavelmente devido à fraca intensidade dos ventos e ao baixo teor de umidade na camada. No caso tipo B, o fluxo de umidade próximo ao ciclone era mais alto (> 900 kg.m⁻¹.s⁻¹) e no Rio de Janeiro oscilava em torno de 300 e 350 kg.m⁻¹.s⁻¹.

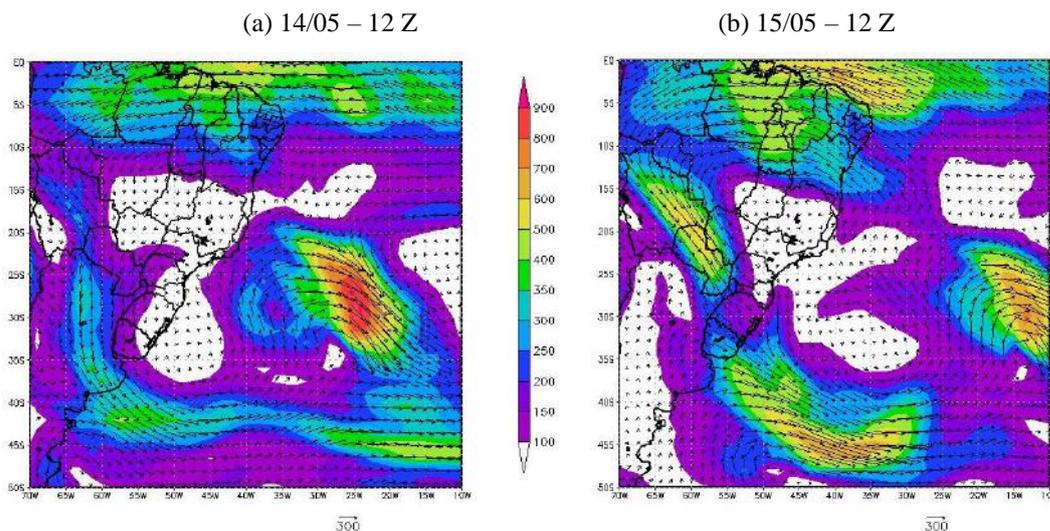


Figura 4.27 – Campos de fluxo de umidade verticalmente integrado na camada 1000-300 hPa (intervalos a cada $50 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) para (a) 14/05 – 12 Z e (b) 15/05 – 12 Z.

A Figura 4.28 apresenta os campos de omega e linhas de corrente nos níveis 850, 700, 500 e 300 hPa para 14/05 – 12 Z. Pode-se observar que o movimento ascendente na costa de São Paulo predominou até o nível de 700 hPa, devido ao AM que se estendeu até 700 hPa com ventos perpendiculares a costa brasileira nesta área, no entanto não houve movimento ascendente sobre o Rio de Janeiro em nenhum nível. O escoamento sobre o Rio de Janeiro predominou de oeste em toda a troposfera. O vórtice ciclônico associado ao SF ficou configurado apenas até o nível de 850 hPa, com sua região à leste do cavado sobre o Oceano e distante do Rio de Janeiro, desfavorecendo a geração de convecção na região. No caso tipo B, o movimento ascendente na costa Sul e parte da costa Sudeste do Brasil se estendeu apenas pelos níveis baixos (até 850 hPa). Em contrapartida, o centro de baixa pressão (alta migratória) associado ao SF, atingiu o nível de 300 hPa (700 hPa), com características barotrópicas e o vento de sul no litoral do Rio de Janeiro persistiu desde a superfície até o nível de 500 hPa.

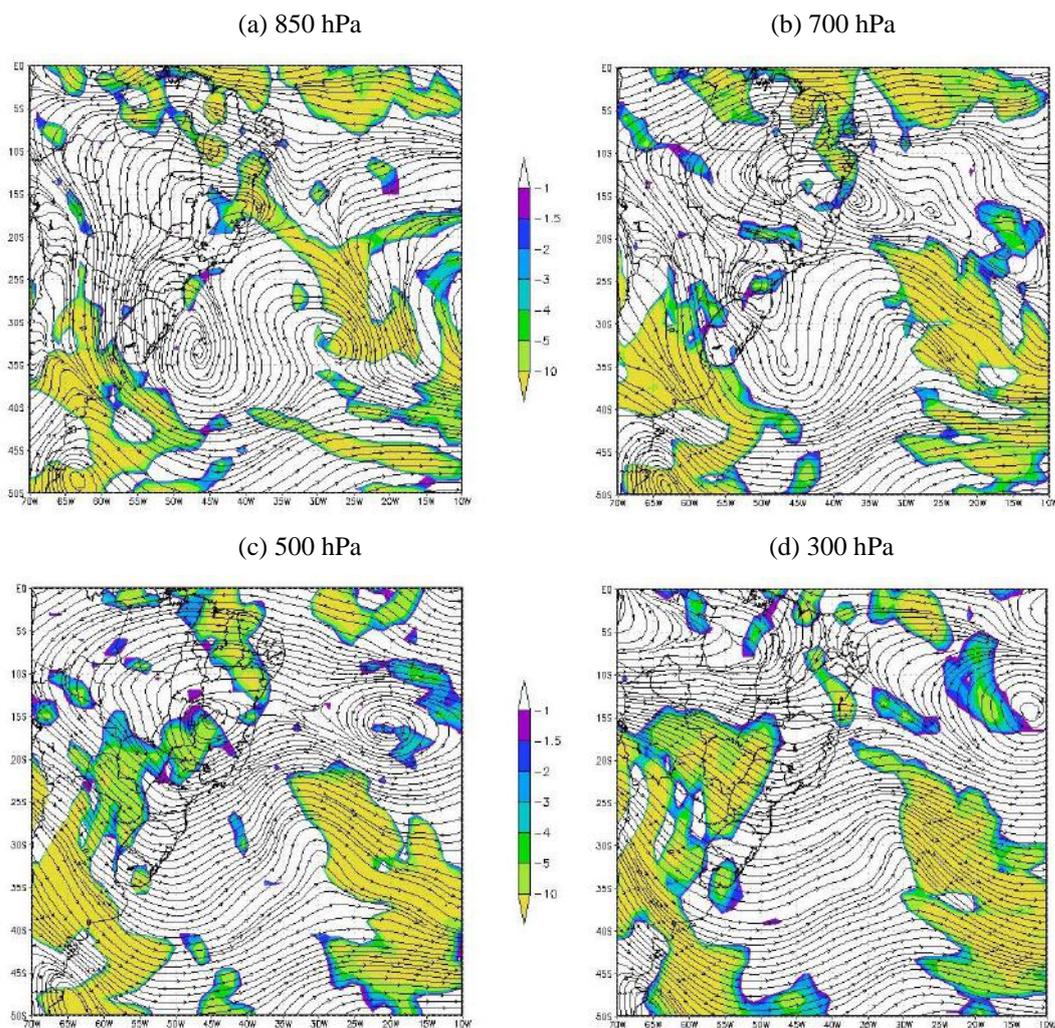


Figura 4.28 – Campos de omega (valores negativos em $\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$) e linhas de corrente em 14/05/10 - 12 Z nos níveis: (a) 850 hPa; (b) 700 hPa; (c) 500 hPa; (d) 300 hPa.

A Figura 4.29 apresenta os campos de temperatura do ar e vetor vento e também advecção térmica para o dia 14/05 – 12 Z nos níveis 850 hPa, 700 hPa, 500 hPa e 300 hPa. Observa-se que, devido à curvatura das isotermas e à fraca intensidade do vento em baixos níveis (constatado anteriormente), a advecção de temperatura era nula sobre o Rio de Janeiro. Em médios e altos níveis esta situação se reverteu, pois o vento estava mais intenso proveniente da crista do AM em níveis superiores, provocando advecção fria (entre -1 e -5 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{dia}^{-1}$) nestes níveis. As mesmas características foram mais intensas no caso B, começando em 850 hPa e atingindo área maior (advecção fria mais forte, entre -5 e -10 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{dia}^{-1}$), também associado ao escoamento do AM e com a advecção quente na costa Sul e parte da Sudeste do Brasil.

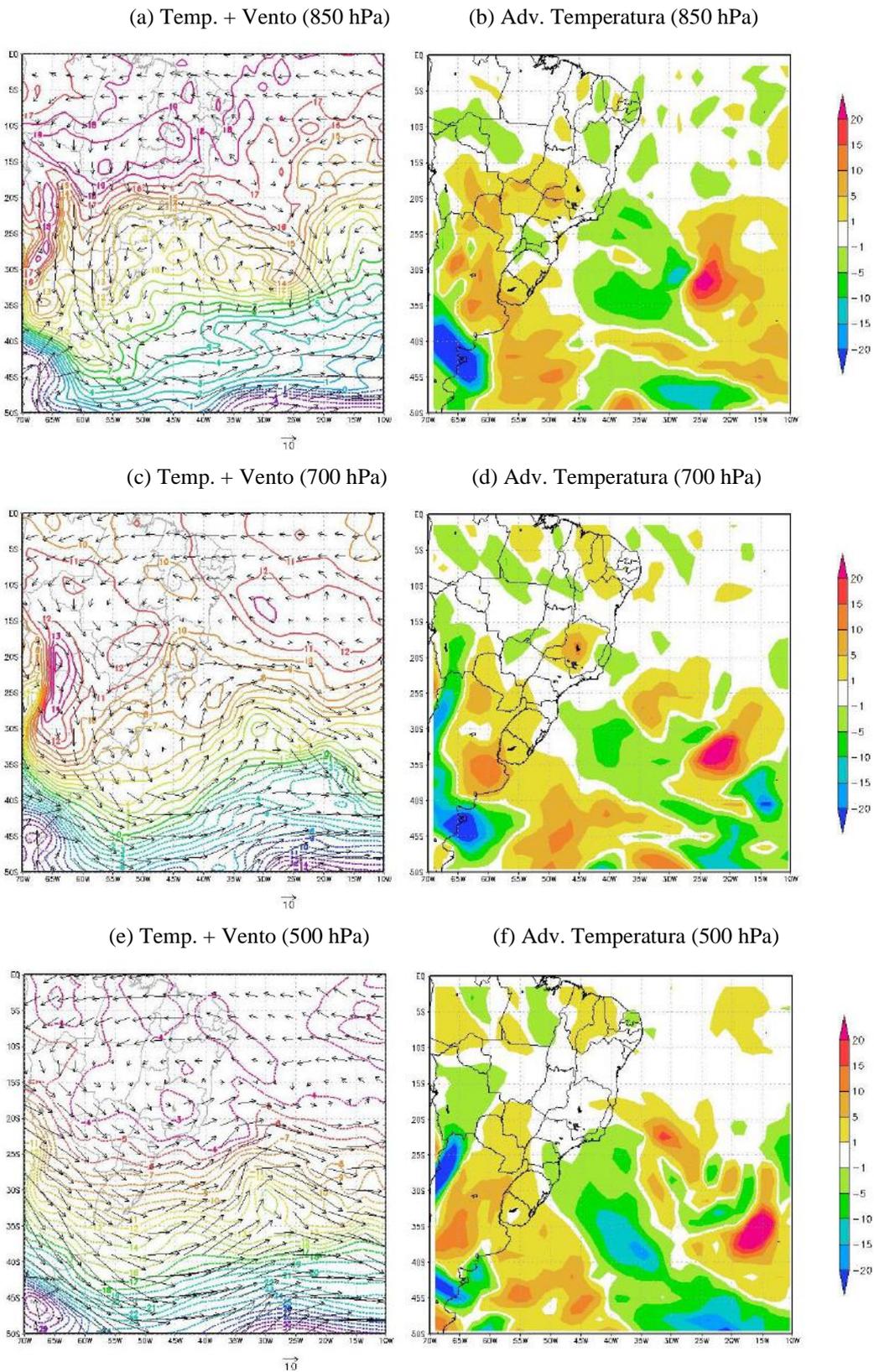


Figura 4.29 – Campos de temperatura do ar (intervalos a cada 1 °C) e direção e intensidade do vento (coluna esquerda) e advecção térmica ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{dia}^{-1}$) (coluna direita) em 14/05/10 - 12 Z para os níveis de 850 hPa (a e b), 700 hPa (c e d), 500 hPa (e e f) e 300 hPa (g e h).

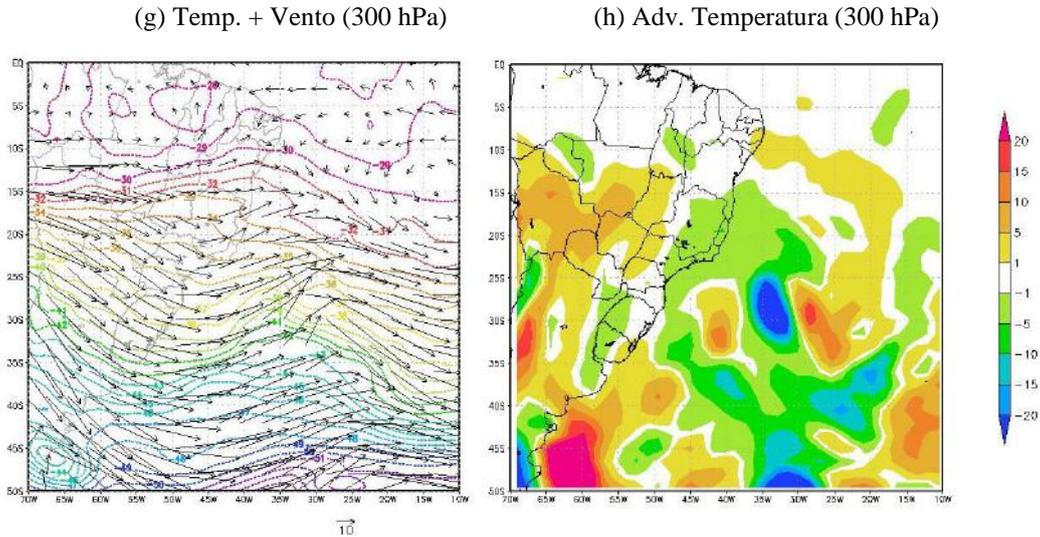


Figura 4.29 – Final.

O campo de espessura da camada entre 500 e 1000 hPa para o caso do dia 14/05/10 (Figura 4.30) mostra uma situação de estabilidade, onde nota-se apenas o controle latitudinal sobre a temperatura do ar na camada, uma vez que, nos casos sem chuva pós-frontal, não existem fortes gradientes térmicos. Para o caso tipo B, este campo se mostrou como um bom diferencial, pois marcou a diferença da massa fria (AM) adentrando sobre o continente e da massa quente (sistema de baixa associado ao SF).

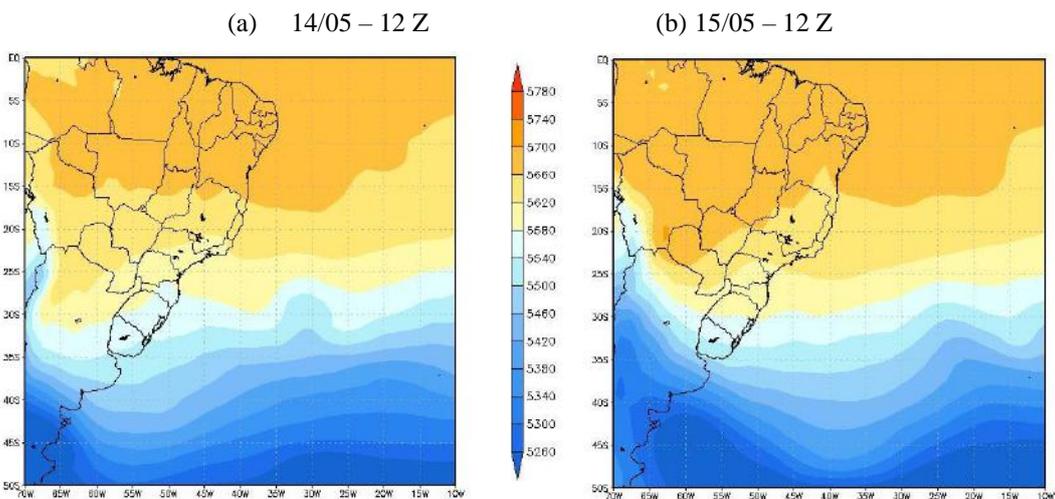


Figura 4.30 – Campo de espessura (mgp) da camada 500 – 1000 para (a) 14/05/10 – 12 Z e (b) 15/05/10 – 12 Z.

Os campos de vorticidade relativa e linhas de corrente ao nível de 300 hPa (Figura 4.31) para os dias 14 e 15/05 - 12 Z apresentam vorticidade anticiclônica sobre o Rio de Janeiro (entre $1,0$ e $3,0 \times 10^{-5} \cdot s^{-1}$), devido a crista associada ao AM em altitude. A vorticidade ciclônica associada ao cavado era intensa (maior que $-15,0 \times 10^{-5} \cdot s^{-1}$ em módulo), enfraquecendo no dia seguinte (entre $-6,0$ e $-9,0 \times 10^{-5} \cdot s^{-1}$). No caso tipo B havia vorticidade ciclônica sobre o Rio de Janeiro, com valores entre $-1,0$ e $-3,0 \times 10^{-5} \cdot s^{-1}$.

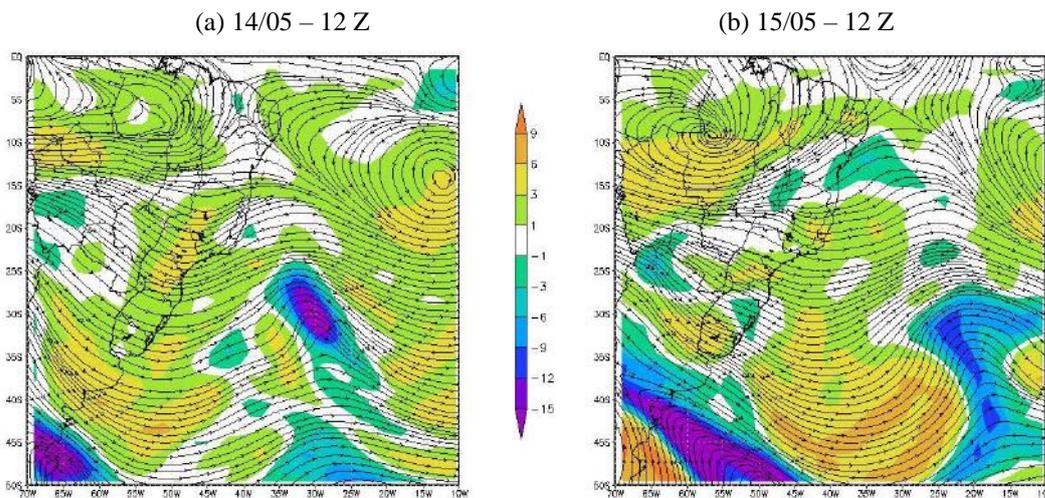


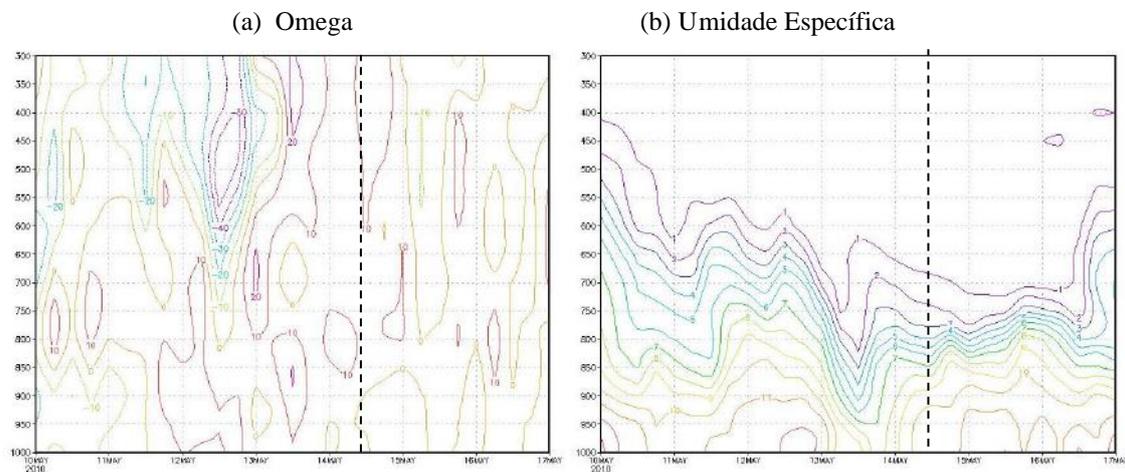
Figura 4.31 – Campos de vorticidade relativa ($\times 10^{-5} \cdot s^{-1}$) e linha de corrente em 300 hPa para (a) 14/05 – 12 Z e (b) 15/05 – 12 Z.

A Figura 4.32 apresenta a evolução temporal (entre os dias 10 e 17/05) dos perfis verticais de omega, umidade específica, temperatura do ar e direção e intensidade do vento horizontal, sobre um ponto localizado no município do Rio de Janeiro ($22,5^{\circ}S/43,5^{\circ}W$).

Na Figura 4.32a nota-se a passagem do SF no dia 12/05, com intensificação do movimento ascendente (máximo de $-50 \text{ hPa} \cdot s^{-1}$ entre 400 e 600 hPa) e posterior predomínio do movimento subsidente nos altos e médios níveis (máximo de $20 \text{ hPa} \cdot s^{-1}$ em 400 hPa). Contudo, nota-se também o predomínio de movimento subsidente fraco ($< 10 \text{ hPa} \cdot s^{-1}$) desde a superfície até 800 hPa durante a passagem da frente e no período pós-frontal. No caso tipo B (ocorrido entre 08 e 09/04/10), ao nível da superfície até 850 hPa predominava um contínuo movimento ascendente, apesar de fraco ($< -30 \text{ hPa} \cdot s^{-1}$, em módulo) e nos médios e altos níveis, devido ao AM, permaneceu o movimento subsidente em torno de $20 \text{ hPa} \cdot s^{-1}$.

No perfil de umidade específica (Fig. 4.32 b) pode-se notar que durante o período analisado a atmosfera encontrava-se seca como um todo (isolinhas próximas, forte gradiente vertical), com valores em torno de 10 e 11 g.kg⁻¹ próximos à superfície. O perfil de umidade no caso tipo B não apresentava um gradiente tão intenso, ou seja, a atmosfera estava mais úmida e à superfície não houve variação da umidade, ficando em torno de 10 e 12 g.kg⁻¹. No perfil de temperatura do ar (Fig. 4.32 c) observa-se um ciclo diurno característico ao nível da superfície, ao longo do período apresentado no gráfico. Pode-se observar que houve um aumento da temperatura com a altura após a passagem da frente, mas no período pós-frontal a temperatura se manteve. O mesmo pôde ser observado no caso tipo B, com ciclo diurno ao nível da superfície.

A partir da Figura 4.32d observa-se a fraca intensidade dos ventos em baixos níveis (superfície até 850 hPa) durante e após a passagem do SF. A componente oeste do vento se estendeu por toda a camada ao longo dos dias. Contrariamente, o caso tipo B apresentou ventos de quadrante sul em todos os níveis e com elevada intensidade após a passagem do SF, o giro do vento com a altura também mostrou a advecção fria desde os baixos até os altos níveis.



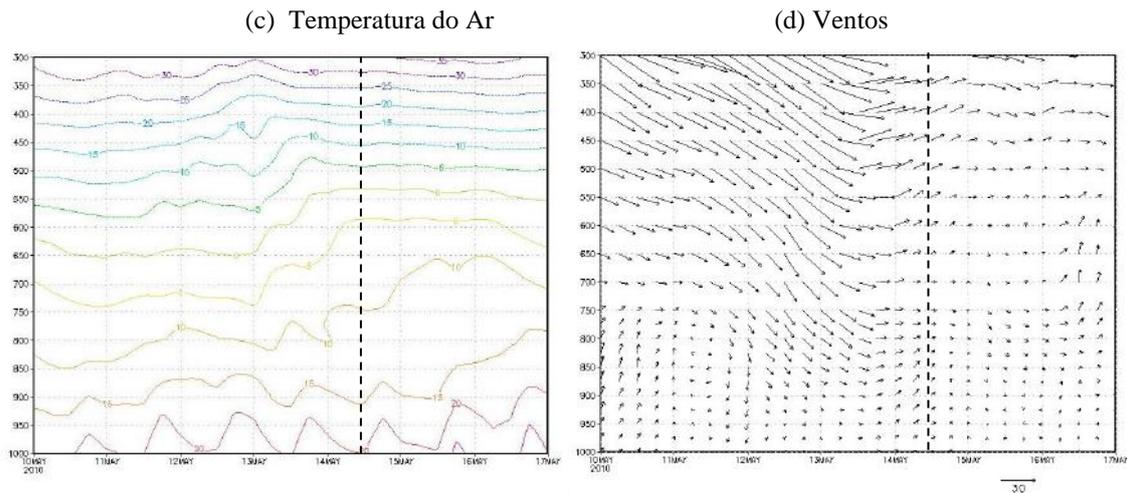


Figura 4.32 – Evolução temporal dos perfis verticais de (a) omega ($\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$); (b) umidade específica ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$); (c) temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) e (d) vento horizontal (m/s) para o período de 10 a 17/05 sobre o ponto de grade da Reanálise ERA-Interim localizado em $22,5^{\circ}\text{S}/43,5^{\circ}\text{W}$.

A Tabela 4.5 resume as principais diferenças entre os casos estudados do tipo A, ocorrido em 14/05/2010 e do tipo B, ocorrido em 08/04/2010. Quando não especificado os valores são referentes ao Rio de Janeiro.

Tabela 4.5 - Resumo das principais diferenças entre o caso A (14/05) e o caso B (08/04), estudados.

Quando não especificado os valores são referentes ao Rio de Janeiro.

	Campos analisados	Caso A (14/05)	Caso B (08/04)
Superfície e 1000 hPa	Vento Observado (superfície)	fraco	moderado
	Pressão atm. [hPa]	AM - 1022; Baixa - 1008 ; RJ - 1019	AM - 1030; Baixa - 992 ; RJ - 1015
	Divergência de vento [$\times 10^{-5} \cdot s^{-1}$]	entre -0,05 e -0,1	entre -0,3 e -0,4
	Vento em 1000 hPa	SW; $< 10 \text{ m.s}^{-1}$	Sul (perpendicular à costa); > 10 m.s^{-1}
	Omega [hPa.s^{-1}]	> -1	~ -10
	Umidade específica [g.kg^{-1}]	Baixa - 15 e 16	Baixa - 16 e 18
	Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	Advecção térmica nula	Adv. térmica negativa (-1 e -5 $^{\circ}\text{C.dia}^{-1}$)
Níveis baixos, médios e altos da Troposfera (até 300 hPa)	Fluxo de umidade (1000 - 300 hPa) [$\text{kg.m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$]	Baixa - 800 e 900 ; RJ - $<$ 100	Baixa - > 900 ; RJ - 300 e 350
	Omega [hPa.s^{-1}]	> -1	Mov. asc até 850 hPa
	Vento	Oeste; fraco	Sul até 500 hPa
	Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	Adv. fria entre 500 e 300 hPa ~ -1 e -5 $^{\circ}\text{C.dia}^{-1}$	Adv. fria a partir de 850 hPa - -5 e -10 $^{\circ}\text{C.dia}^{-1}$
	Espessura	Ausência de gradiente térmico anômalo	Diferenças entre massa fria (AM) e massa quente (Baixa)
	Vorticidade [$\times 10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$]	positiva, entre 1 e 3	negativa, entre -3 e -1
Evolução temporal dos perfis verticais	Omega [hPa.s^{-1}]	mov. subsidente da sup. até 800 hPa (< 10)	mov. ascendente da sup. até 850 hPa (> -30)
	Umidade específica [g.kg^{-1}]	grad. vertical de umidade intenso	ausência de grad. vertical de umidade intenso
	Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	ciclo diurno de temp. à sup.	ciclo diurno de temp. à sup.
	Vento	Oeste da sup. até 850 hPa; fraco	Sul em todos os níveis, com elevada intensidade após a passagem do SF

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal desta monografia é identificar o padrão sinótico característico das situações pós-frontais em que a precipitação continua a ocorrer sobre o município do Rio de Janeiro mesmo quando o SF encontra-se bastante afastado do Estado, aproximadamente no sul da Bahia. Além disto, objetiva-se estabelecer uma climatologia sazonal de passagem de sistemas frontais (SFs) pela região para determinar a frequência de ocorrência de tais casos.

Para isto, foi feito inicialmente um levantamento de todos os casos de passagens de SFs pelo Estado do Rio de Janeiro no período de 2000 a 2007, a partir do Boletim Climanalise do CPTEC, totalizando 347 eventos nos 8 anos pesquisados. Os casos obtidos foram analisados com o uso de imagens dos satélites, juntamente com dados de precipitação dos postos pluviométricos do Sistema Alerta Rio, sendo finalmente classificados em 3 categorias: casos do tipo A, B e E. Os casos do tipo A são aqueles em que o SF desloca-se para norte e a precipitação cessa logo após sua passagem. Nos casos do tipo B o SF se desloca para norte, e após a ocorrência da chuva frontal, verifica-se a ocorrência de chuva estratiforme, mesmo sem a presença do SF e de sua nebulosidade convectiva associada, que muitas vezes já se encontra no sul da Região Nordeste. Casos em que o SF se desloca de forma lenta, configurando a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) ou casos em que a banda de nebulosidade frontal se desloca pelo oceano, sem penetrar no continente; e ainda casos em que o SF se dissipa sobre o Rio de Janeiro e não se pode definir a situação de passagem da frente, são denominados casos tipo E (excluídos da análise), nos quais não se pode classificar o evento como A ou B. A separação resultou em 90 casos do tipo A, 60 casos do tipo B e 197 casos do tipo E. Este resultado é bastante relevante, pois mostra que a mais da metade (aproximadamente 57%) dos sistemas frontais que atingem o Rio de Janeiro não evoluem de forma clássica para norte, permanecendo semi-estacionários na região, ou deslocando-se para leste sobre o oceano, ou ainda se integrando à convecção da ZCAS.

Evidencia-se que os casos tipo A (aproximadamente 26% do total) são mais frequentes do que os do tipo B (aproximadamente 17% do total). O inverno é a estação do ano em que ocorre a maior parte dos casos do tipo B, seguido do outono e primavera. A causa provável para a ocorrência preferencial de eventos do tipo B no inverno está relacionada à posição e intensidade preferenciais nesta época do ano do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e do Anticiclone Migratório (AM), na retaguarda

do SF. Para os casos tipo A, a estação do ano de maior ocorrência é a primavera, seguida do inverno, outono e por último o verão. O verão é o período do ano em que ocorrem menos casos pós-frontais de ambos os tipos (A e B) devido à maior atividade convectiva na região nesta época, aumentando a proporção de casos classificados como tipo E, que totaliza 76,4% do período de verão. Comparativamente aos casos do tipo B, os casos do tipo A ocorrem em maior número em todas as estações do ano, sendo que na primavera esta diferença é mais acentuada, sendo quase o dobro.

Após a identificação dos eventos nas categorias A e B, foram elaborados compostos com os 90 casos tipo A e os 60 casos tipo B, usando os dados da Reanálise ERA-Interim, com objetivo de obter uma climatologia sinótica de tais eventos. A análise de compostos mostrou que nos casos tipo B, o campo de PNMM apresentou características mais definidas de uma situação pós-frontal, com os sistemas ASAS, AM e SF bem definidos e valores mais elevados de PNMM sobre o Rio de Janeiro em comparação aos casos tipo A. Em tais casos (tipo A) o ASAS, AM e SF não apresentam-se bem caracterizados no campo de PNMM (perderam suas características ou foram suavizadas pela média). Nos casos tipo B também há convergência de vento e o movimento ascendente é mais intenso sobre o Rio de Janeiro do que nos casos tipo A. Com relação ao vento, nos casos tipo B a direção é de Sul (perpendicular à costa) com maior intensidade. Já nos casos tipo A, a velocidade dos ventos é menor e a direção é variável (característico de ventos fracos) ou de SE. O campo de umidade específica não mostra diferenças significativas entre os dois compostos. Nos campos de temperatura do ar e advecção térmica nota-se advecção quente nos casos tipo B, mesmo este apresentando temperaturas inferiores do que nos casos tipo A.

Além dos compostos, também foram realizados dois estudos de casos para detalhar os eventos em superfície e em altitude. Um caso do tipo B, ocorrido em 08/04/2010 - 12 Z e outro do tipo A, ocorrido em 14/05/2010 - 12 Z, foram analisados. Para o caso tipo B observa-se maiores valores de fluxo de umidade verticalmente integrado (em torno de 300 e 350 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) e movimento ascendente maior que $-5 \text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$ até o nível de 850 hPa sobre o Rio de Janeiro em oposição ao caso tipo A, que apresentou fluxo de umidade menor que $100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ e movimento ascendente maior que $-1 \text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$. No caso tipo A o escoamento foi fraco de oeste até 850 hPa, já no caso tipo B o escoamento permaneceu de sul até o nível de 500 hPa e com maior intensidade. O campo de espessura não apresentou características significativas para o caso tipo A, mas no caso tipo B o contraste entre as massas fria e quente é bem ressaltado. Os perfis

verticais mostraram para o caso A (caso B) movimento subsidente (ascendente) próximo à superfície, gradiente vertical de umidade intenso (ausente), vento fraco (forte) de oeste (de sul) após a passagem do SF.

Pode-se concluir que a precipitação pós-frontal, que ocorre no Rio de Janeiro quando o SF já se encontra bem afastado da região, está associada à chegada de ventos de sul que aumentam a convergência na costa, gerando movimento ascendente e promovendo o levantamento da umidade da camada inferior da atmosfera. Este ar relativamente frio e úmido é forçado a ascender e se condensa, formando nuvens estratiformes que precipitam de forma contínua sobre a cidade.

Outra conclusão é em relação ao caráter superficial dos eventos tipo B, cuja instabilidade responsável pela ocorrência de chuva estratiforme concentra-se nos baixos níveis (até pouco acima de 850 hPa). As características encontradas na superfície são cruciais e decisivas para determinar e classificar o tipo de evento (A ou B), como direção e velocidade do vento em relação à costa, posicionamento dos sistemas de pressão, convergência e movimento ascendente.

Como sugestão para trabalhos futuros recomenda-se investigar o desempenho de modelos regionais e/ou de mesoescala para prever a chuva associada aos eventos tipo B. Caso a previsibilidade desses eventos seja deficiente, sugere-se elaborar uma análise criteriosa tanto nos campos de precipitação, quanto nos campos de ventos e advecção térmica nos baixos níveis, movimento ascendente e fluxo de umidade verticalmente integrado, a fim de identificar se tais campos estão sendo previstos corretamente nas situações de chuvas pós-frontais (casos tipo B). Além disso, seria interessante estender a climatologia de sistemas frontais, utilizando a mesma metodologia aplicada neste trabalho, de janeiro de 2008 até os dias atuais.

CAPÍTULO 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Atlas Eólico do Estado do Rio de Janeiro. Secretaria de Estado de Energia, da Energia, da Indústria Naval e do Petróleo. Elaborado por Camargo Schubert Engenharia Eólica, 2002.
- BYERS, H. R. General Meteorology. McGraw-Hill Book Company. 3rd edition. 540 p. 1959.
- CALADO, R. N. Estudo de caso de tempestade severa no Rio de Janeiro em abril de 2010. Rio de Janeiro. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ. 2012.
- CAVALCANTI, I. F. A.; KOUSKY, V. E. Climatology of South American cold fronts. In: VII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOUTHERN HEMISPHERE METEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY, 2003, Wellington, New Zeland. *Proceedings...* Wellington: Amer. Meteor. Soc. 2003.
- COSSICH, William. Estudo da ocorrência de nevoeiros no Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 81p. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ. 2009.
- Dados de Precipitação CMAP fornecidos pela NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, EUA. disponível em: < <http://www.esrl.noaa.gov/psd> >.
- DEE, D. P.; Coautores. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 137, 553-597. 2011.
- DERECZYNSKI, C. P.; OLIVEIRA, J. S.; MACHADO, C. O. Climatologia da precipitação no município do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 24, n.1, p. 24-38, 2009.
- DOMINGUES, I. P. e C. P. DEREZYNSKI. *Estudo de caso de chuva no Rio de Janeiro por efeito de circulação marítima*. IX Congresso Argentino de Meteorologia (IX CONGREGMET), 2005.
- FIDERJ. 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), 156 p, 1978.

- GRIMM, A. M. Variabilidade interanual do clima no Brasil. In: IRACEMA F. A. CAVALCANTI... [et al.] organizadores. *Tempo e Clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, p. 353 - 374. 2009.
- GRIMM, A. M. e FERRAZ, S. E. T. Sudeste do Brasil: uma região de transição no impacto de eventos extremos da Oscilação Sul. Parte I: El Niño. Anais do X Congresso Brasileiro de Meteorologia. Sociedade Brasileira de Meteorologia. 1998.
- IAG/USP Tópicos de ensino. Disponível em:
<<http://www.master.iag.usp.br/ensino/Sinotica/AULA17/AULA17.HTML>>.
- Informações topográficas Rio de Janeiro. Disponível em:
<www.educacaopublica.rj.gov.br>.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Banco de Dados. Cidades. 2010.
- JOURDAN, P. Caracterização do regime de ventos próximo à superfície na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Monografia (Graduação em Meteorologia) – Departamento de Meteorologia. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.
- KODAMA, Y. –M. Large-scale common features of subtropical precipitation zones (the Baiu frontal zone, the SPCZ, and the SACZ) Part I: Characteristics of subtropical frontal zones. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 70(4), 813-836, 1992.
- KOUSKY, V. E. Pentad Outgoing Longwave Radiation Climatology for the South American Sector. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 3, p. 217–231, 1988.
- LEMOS C. F.; CALBETE, N. O. Sistemas Frontais que atuaram no litoral de 1987 a 1995. *Climanálise Especial, Edição Comemorativa de 10 anos*. 1986.
- LUTGENS, F.K. e TARBUCK, E.J. *The Atmosphere: An Introduction to Meteorology*. (Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1995), ed. 6.
- MARTINS, F. R., R. A. GUARNIERI e E. B. PEREIRA. O aproveitamento da energia eólica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 30, n. 1, 1304, p. 13, 2008.
- Mapa do Município do Rio de Janeiro. Disponível em:
<http://www.terrabrasil.org.br/media/Nova_pasta/maparelevomunic.jpg>.
- METAR, Comando da Aeronáutica. Disponível em: < <http://www.redemet.aer.mil.br/> >

- MELLO, G. M. S. Estudo de casos de precipitação no Rio de Janeiro provocados pela intensificação da brisa marítima. Rio de Janeiro. 114p. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ. 2009.
- MORAES, N. O.; MARTON, E. & PIMENTEL, L. C. G. Simulações Numéricas da Formação de Ilha de Calor na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ, Vol. 28 - 2/2005, p. 116-138, 2005.
- NOBRE, C. A.; MATTOS, L.F.; DEREZYNSKI, C. P.; TARASOVA, T. A.; TROSNIKOV, I.V. Overview of atmospheric conditions during the Smoke, Clouds, and Radiation-Brazil (SCAR-B) field experiment. Journal of Geophysical Research, v. 103, n. D24, p. 31809-31820, 1998.
- NOBRE, C. A. e MOLION. *Climanálise Especial*. 1986.
- NUNES, L. H.; VICENTE, A. K; CANDIDO, D. H. Clima da Região Sudeste do Brasil. In: IRACEMA F. A. CAVALCANTI... [et al.] organizadores. *Tempo e Clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, p. 243 - 258. 2009.
- OLIVEIRA, A. S. Interações entre sistemas frontais na América do Sul e a convecção na Amazônia. 115 p. Dissertação de Mestrado - INPE/SJC, São José dos Campos – SP, 1986.
- PEIXOTO, J.P. e OORT, A.H. Physics of Climate. American Institute of Physics, New York, 520 pp. 1993.
- QUADRO, M. F. L., L. H. R. MACHADO, S. CALBETE, N. N. M. BATISTA, G. SAMPAIO. Climatologia de Precipitação e Temperatura. *Climanálise Especial* - Edição comemorativa de 10 anos. MCT/INPE/CPTEC. Cap. 9, 1996.
- Reanálise ERA-Interim. Disponível em < http://data-portal.ecmwf.int/data/d/interim_moda/ >.
- RIEHL, Herbert. "Varying Structure of Waves in the Easterlies," Proceedings of the International Symposium of Large-Scale Atmospheric Processes, Moscow, U.S.S.R., June 23-30, 1965, IzdatvoNauka, Moscow, pp. 411-416. 1965.
- ROPELEWSKI, C. F.; HALPERT, M. S. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, v. 115, p. 1606 – 1626, 1987.

SATYAMURTY, P.; NOBRE, C. A.; SILVA DIAS, P. L. South America. *Meteorology of the Southern Hemisphere*, D. J. Karoly e D. G. Vincent, Eds., American Meteorological Society, 119-139, 1998.

SERRA, A. B. Clima da Guanabara. *Boletim Geográfico*, ano 29, n. 214, jan/fev 1970, Fundação Instituto Brasileiro de Geografia, p. 80-111, 1970.