UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA TERRA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE METEOROLOGIA

HANA CAROLINA VIEIRA DA SILVEIRA

ESTUDO DE AQUECIMENTOS NOTURNOS NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO – UM RARO EVENTO DE *HEAT BURST*?

RIO DE JANEIRO-RJ
Setembro, 2018

HANA CAROLINA VIEIRA DA SILVEIRA

ESTUDO DE AQUECIMENTOS NOTURNOS NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO – UM RARO EVENTO DE *HEAT BURST*?

Trabalho de conclusão do curso de Meteorologia para obtenção do título de Bacharel em Meteorologia.
Orientadora: D.Sc. Ana Cristina Pinto de Almeida Palmeira.

ESTUDO DE AQUECIMENTOS NOTURNOS NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO – UM RARO EVENTO DE *HEAT BURST*?

Hana Carolina Vieira da Silveira

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:

_____

Profº. D.Sc Wallace Figueiredo Menezes
Departamento de Meteorologia – IGEO – UFRJ

_____

M.Sc. Marcelo Pinheiro Garcia

_____

Profª. D.Sc Ana Cristina Pinto de Almeida Palmeira
Departamento de Meteorologia – IGEO – UFRJ

_____

Departamento de Meteorologia – IGEO – UFRJ

RIO DE JANEIRO-RJ
Setembro, 2018

"Obstáculos e dificuldades fazem parte da vida. E a vida é a arte de superá-los."
Mestre DeRose

Ficha Catalográfica

Silveira, Hana Carolina Vieira da

“ESTUDO DE AQUECIMENTOS NOTURNOS NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO – UM RARO EVENTO DE *HEAT BURST*?”

Rio de Janeiro, 2018.

53p. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ

1. *Heat Burst*. 2. Aquecimento noturno. 3. Rio de Janeiro

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela conquista e por me manter firme em todos os momentos. Só Deus sabe intimamente o que sentimos em cada momento e Ele esteve presente em cada um deles.

Agradeço aos meus pais pelo suporte de sempre, desde o vestibular. Não foi fácil mas vocês estiveram comigo e sou muito grata a isso. Agradeço a todos os meus familiares que, de alguma forma, contribuíram para esse momento. Agradeço ao meu namorado, Álvaro Cardoso, que sempre me apoiou e soube me motivar quando mais precisei.

Aos professores do Departamento de Meteorologia pelo conhecimento passado e dedicação ao ensino. Em especial, à minha orientadora, que o mais correto e adequado seria chamá-la de mãe. Ter uma mãe na graduação faz toda a diferença pois só ela pode entender todas as angústias e compreender cada sentimento e, é claro, aquelas puxadas na orelha que foram necessárias. Essas atitudes vão além de além de professora, além de meteorologista, além de orientadora: É coisa de mãe.

Aos meus amigos Ana Carolina, Ana Rosas, Geraldo, Ricardo, Maria Eduarda e tantos outros, sem vocês seria impossível. Quantas vezes nos desesperamos e sempre tinha alguém para nos acalmar. Espero que essa amizade dure pra sempre, mesmo que cada um vá por um caminho distinto.

RESUMO

A ocorrência de um aquecimento anômalo de até 8°C em um intervalo de 4 horas, às 21h do dia 02 de agosto de 2011 na cidade do Rio de Janeiro-RJ, detectada por várias estações meteorológicas e comunicada a comunidade científica pela empresa Climatempo, foi o gatilho da investigação para esta pesquisa.

O ciclo diurno de temperatura costuma ser caracterizado de forma que as temperaturas mais baixas e mais altas podem ser observadas no início da manhã e a tarde, respectivamente. Entretanto, algumas perturbações na atmosfera podem alterar esse ciclo, como por exemplo, a passagem de sistemas frontais. Porém, além dos fenômenos meteorológicos mais convencionais, têm-se o *Heat Burst* (HB), que é caracterizado pelo aumento repentino da temperatura do ar simultaneamente com a diminuição da umidade. Além disso, o HB é de natureza noturna e está associado com a dissipação de tempestades.

Desta forma, este trabalho buscou avaliar a ocorrência deste fenômeno, com ênfase na análise detalhada dos dados observacionais em superfície de estações meteorológicas da rede AlertaRio e INMET, dados METAR dos aeroportos Tom Jobim e Santos Dumont, além de sondagem do aeroporto Tom Jobim, bem como nos aspectos sinóticos e de mesoescala associados a ele. Posteriormente, foi feita uma climatologia de cerca de 15 anos, para verificar a frequência desses aquecimentos. Para finalizar, foi feita uma investigação por modelagem numérica através do WRF, para melhor compreender a dinâmica e a termodinâmica deste evento.

Os resultados confirmaram o fenômeno como HB, bem como a frequência de ocorrência desses aquecimentos anômalos de forma não tão rara, embora nem sempre intensa. Isso sugere que, de acordo com a literatura, este fenômeno é altamente dependente de cada localização geográfica, não possuindo fronteiras fixas de taxas de aquecimento.

A modelagem numérica apresentou uma excelente ferramenta para caracterizar este fenômeno, sequer detectado por reanálises disponíveis.

ABSTRACT

The occurrence of an anomalous heating of up to 8 ° C in about 4 hours, at 9pm on August 02, 2011 in the city of Rio de Janeiro-RJ, detected by several meteorological stations and communicated to the scientific community by the company Climatempo, was the trigger for investing in this research.

The daytime cycle of temperature is usually characterized so that the lowest and highest temperatures can be observed in the early morning and afternoon, respectively. However, some disturbances in the atmosphere can change this cycle, for example, the passage of frontal systems. However, besides the more conventional meteorological phenomena, there is the Heat Burst (HB), which is characterized by the sudden increase of the air temperature simultaneously with the decrease of the humidity. In addition, HB is nocturnal in nature and is associated with storm dissipation.

In this way, this work sought to evaluate the occurrence of this phenomenon, with emphasis on the detailed analysis of the observational data on the surface of meteorological stations of the AlertaRio and INMET network, data from the Tom Jobim and Santos Dumont airports, as well as the soundings of Tom Jobim airport, as in the synoptic and mesoscale aspects associated with it. Subsequently, a climatology of about 15 years was made to verify the frequency of these warm-ups. Finally, a numerical modeling investigation was made through the WRF to better understand the dynamics and thermodynamics of this event.

The results confirmed the phenomenon as HB, as well as the frequency of occurrence of these anomalous warming in a not so rare, although not always intense, form. This suggests that, according to the literature, this phenomenon is highly dependent on each geographic location, not having thin boundaries of heating rates.

Numerical modeling presented an excellent tool to characterize this phenomenon, not even detected by available reanalysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Ilustração do município do Rio de Janeiro. Fonte: Adaptado do Google Maps, 2018. 14

Figura 1.2 Precipitação média mensal acumulada (mm) para estações da rede INMET (1981-2010). 15

Figura 1.3 Ciclo diurno de temperatura média para o mês de agosto para a estação meteorológica de São Cristóvão da rede AlertaRio. (2012-2016).....15

Figura 2.1 Evolução temporal da camada limite atmosférica (CLA). Fonte: Adaptado de Stull, 1988. 18

Figura 2.2 Ilustração de um microburst que produz *Heat Burst* em superfície. A linha grossa preta representa o perfil de temperatura do ambiente; a linha grossa cinza representa o perfil de Td; a linha clara cinza representa a adiabática seca; a linha média cinza representa a adiabática úmida; e a linha com flechas representa a dinâmica da corrente descendente. Fonte: McPherson et al., 2011. 19

Figura 2.3 Sondagem exemplificada por Wakimoto (1985), disponibilizada pela Universidade de Wyoming a esquerda e, sondagens estudadas por Johnson (1983) a direita. 20

Figura 4.1. Carta sinótica de superfície disponibilizada pelo CPTEC-INPE (esquerda) e pela Marinha do Brasil (direita), para o dia 03 de agosto 00Z, 21h do dia 02. 25

Figura 4.2 Imagem de satélite nos canais de vapor d'água (a) e infravermelho (b), para a América do Sul, para o dia 03 de agosto 00Z (21h do dia anterior). Fonte: GOES 12 CPTEC/INPE. 26

Figura 4.3 Imagem de satélite nos canais de vapor d'água (esquerda) e infravermelho (direita) para o setor São Paulo-Rio de Janeiro. A primeira linha é de 22Z, a segunda de 23Z do dia 02 de agosto e terceira linha 00Z do dia 03. Fonte: GOES 12 CPTEC/INPE. 26

Figura 4.4 Linhas de corrente e magnitude do vento em 200hPa (cores), altura geopotencial em 500hPa (contorno vermelho) e pressão ao nível médio do mar (contorno preto) a partir do CFSR. a) 00Z, b) 06Z, c) 12Z e d) 18Z do dia 02 de agosto e e) 00Z e 06Z do dia 03 de agosto. 28

Figura 4.5 Temperatura do ar (T) e do ponto de orvalho (Td) em Celsius e magnitude do vento em nós para: a) os aeroportos Tom Jobim (SBGL) e b) Santos Dumont (SBRJ) e c) estação meteorológica do Forte de Copacabana. d) todos os locais. 29

Figura 4.6 Temperatura do ar (T) em Celsius e umidade relativa (UR) em porcentagem para as estações meteorológicas: a) Alto da Boa Vista e b) Guaratiba e c) São Cristóvão. d) Magnitude do vento para Guaratiba e São Cristóvão. 31

Figura 4.7 Imagens de radar meteorológico para os horários a) 18Z (15h) e b) 21Z (18h) do dia 02 de agosto de 2011, c) 00Z (21h do dia 02) e d) 03Z (00h) do dia 03 de agosto de 2011. Fonte: AlertaRio. 33

Figura 4.8 Sondagem para o aeroporto Tom Jobim para o dia 03 de agosto de 2011 00Z, 21h do dia 02. Fonte: University of Wyoming. 34

Figura 4.9 Linhas de corrente e magnitude do vento (cores) em 200hPa, altura geopotencial no nível de 500hPa (contorno vermelha) e pressão ao nível médio do mar (contorno branco). a) 21Z do dia 02 de agosto, b) 00Z e c) 03Z do dia 03 de agosto. 35

Figura 4.10 Temperatura do ar à 2m em graus Celsius (cores) e a diferença em relação ao dia anterior para o mesmo horário (contorno). a) 21Z do dia 02 de agosto, b) 00Z e c) 03Z do dia 03 de agosto. 36

Figura 4.11 Umidade relativa em porcentagem (cores) e a diferença em relação ao dia anterior para o mesmo horário (contorno). a) 21Z do dia 02 de agosto, b) 00Z e c) 03Z do dia 03 de agosto. 36

Figura 4.12 Vorticidade relativa em cores 10-4 (s^{-1}) e vento a 10m em barbela. a) 21Z do dia 02 de agosto, b) 00Z e c) 03Z do dia 03 de agosto. 36

Figura 4.13 Diagrama SKEW T para o aeroporto Tom Jobim (lat -22,8° lon -043,2°) para os horários de 18Z e 21Z do dia 02 de agosto e 00Z e 03Z do dia 03 de agosto. 37

Figura 4.14 Diagrama SKEW T para o ponto X (lat -22,6° lon -043,7°) para os horários de 18Z e 21Z do dia 02 de agosto e 00Z e 03Z do dia 03 de agosto. 38

Figura 4.15 Perfil vertical de temperatura potencial equivalente (Θ_E), em Kelvin, e sua evolução temporal, para o a) aeroporto Tom Jobim – SBGL (lat -22,8° lon -043,2°) e b) para o ponto X (lat -22,6° lon -043,7°).....38

Figura 4.16 Linhas de corrente e magnitude do vento (cores) em 200hPa, altura geopotencial no nível de 500hPa (contorno vermelha) e pressão ao nível médio do mar (contorno branco). a) 18Z do dia 02 de agosto, b) 00Z e c) 06Z do dia 03 de agosto. 40

Figura 4.17 Temperatura do ar à 2m em graus Celsius (cores) e a diferença em relação ao dia anterior para o mesmo horário (contorno). a) 18Z do dia 02 de agosto, b) 00Z e c) 06Z do dia 03 de agosto. 40

Figura 4.18 Umidade relativa em porcentagem (cores) e a diferença em relação ao dia anterior para o mesmo horário (contorno). a) 18Z do dia 02 de agosto, b) 00Z e c) 06Z do dia 03 de agosto. 40

Figura 4.19 Vorticidade relativa em cores 10-4 (s^{-1}) e vento a 10m em barbela. a) 18Z do dia 02 de agosto, b) 00Z e c) 06Z do dia 03 de agosto. 41

Figura 4.20 Diagrama SKEW T para o aeroporto Tom Jobim (lat -22,8° lon -43,2°) para os horários de 18Z do dia 02 de agosto e 00Z e 06Z do dia 03 de agosto. 42

Figura 4.21 Perfil vertical de temperatura potencial equivalente (ΘE), em Kelvin, e sua evolução temporal, para o aeroporto Tom Jobim – SBGL (lat -22,8° lon -043,2°). 42

Figura 4.22 Frequência de aquecimentos com diminuição da umidade relativa durante a noite. 43

Figura 4.23 Frequência mensal para aquecimento de a) 0,1 °C, b) 0,2 °C, c) 0,3 °C, d) 0,4 °C e e) 0,5 °C. f) Média mensal.....44

Figura 4.24 Frequência horária para aquecimento de a) 0,1 °C, b) 0,2 °C, c) 0,3 °C, d) 0,4 °C e e) 0,5 °C. f) Média horária.....45

Figura 4.25 Distribuição mensal para os aquecimentos de: a) 0,6 a 1,2 °C, b) 1,2 a 1,8 °C, c) 1,8 a 2,4 °C, d) 2,4 a 3,0 °C, e) 3,0 a 3,6 °C, f) 3,6 a 4,2 °C e g) média mensal.....47

Figura 4.26 Distribuição horária para os aquecimentos de: a) 0,6 a 1,2°C, b) 1,2 a 1,8°C, c) 1,8 a 2,4 °C, d) 2,4 a 3,0 °C, e) 3,0 a 3,6 °C, f) 3,6 a 4,2 °C e g) média horária.....48

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Dados Observacionais. 24

Tabela 4.1 Grupo Q94%. 44

Tabela 4.2 Classes utilizadas no grupo Q06%. 46

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14

2 O *HEAT BURST* 17

2.1 Teoria 17

2.2 Casos de HB relatados no Brasil e no mundo 20

3 DADOS E METODOLOGIA 22

3.1 Dados 22

3.1.1 Rede AlertaRio 22

3.1.2 Rede INMET 23

3.1.3 Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica – REDEMET 23

3.1.4 Diagrama Skew T-log P 23

3.2 Metodologia 23

3.2.1 Caracterização e frequência de ocorrência dos HB 23

4 RESULTADOS 25

4.1 Situação sinótica 25

4.2 Avaliação do aquecimento noturno 02/08/2011 28

4.3 Modelagem numérica 34

4.3.1 WRF 9km 34

4.3.2 WRF 6km 39

4.4 Frequência de ocorrência de aquecimento norturno 43

4.4.1 Primeiro grupo Q94% 43

4.4.2 Segundo grupo Q06% 45

5 CONCLUSÃO 49

5.1 Sugestões para trabalhos futuros 50

REFERÊNCIAS 52

1. INTRODUÇÃO

O município do Rio de Janeiro-RJ é localizado na região Sudeste do Brasil entre as latitudes de 22,8°S e 23,1°S e as longitudes 043,1°W a 043,8°W (Figura 1.1). É banhado ao sul pelo oceano Atlântico, pela baía de Guanabara a leste e pela baía de Sepetiba a oeste. Além de morros, planícies e serras tem-se três maciços importantes, o da Tijuca, o da Pedra Branca e o do Mendanha (ou Gericinó). (Fonte: GeoRio)

Figura 1.1. Ilustração do município do Rio de Janeiro. Fonte: Adaptado do Google Maps, 2018.

Possui clima tropical e de monção, segundo a classificação climática de Köppen. A distribuição da precipitação e da temperatura é fortemente influenciada pela orografia e pela dinâmica dos sistemas atmosféricos que atuam na região, como por exemplo, a passagem de sistemas frontais e a atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), além de Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM). No verão, os índices pluviométricos são os mais elevados especialmente devido ao estabelecimento da ZCAS e de convecção local. No inverno, há redução brusca dos totais de precipitação, sendo a chuva neste período uma consequência maior de sistemas frontais. Através da Figura 1.2, nota-se a distribuição da precipitação média mensal acumulada para diferentes bairros do RJ, a partir dos dados da rede de estações meteorológicas do INMET, destacando a estação do Alto da Boa Vista como a mais significativa devido a orografia do local onde está instalada.

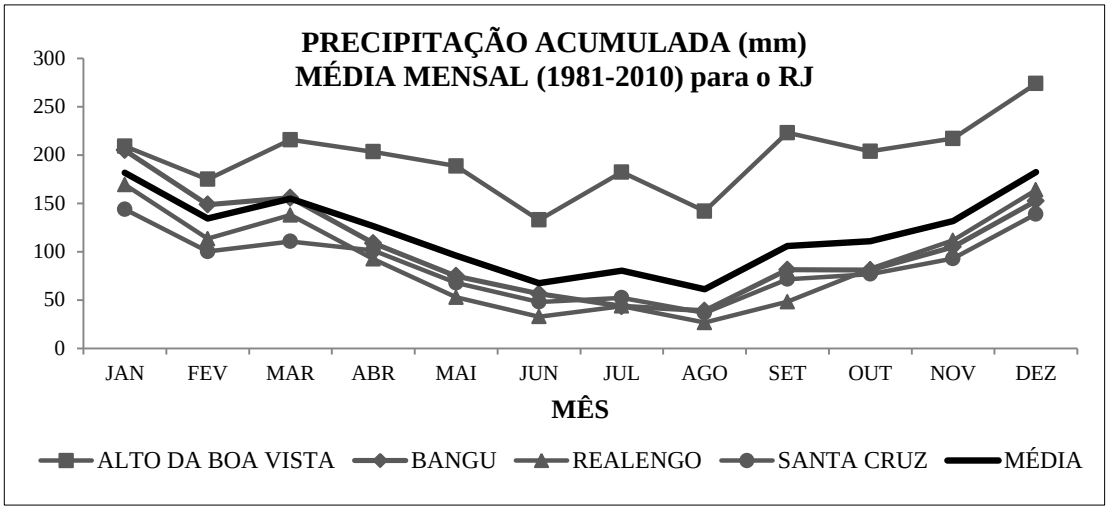


Figura 1.2. Precipitação média mensal acumulada (mm) para estações da rede INMET (1981-2010).

Segundo Andrade (2005), em média passam 5 sistemas frontais por mês, com máxima ocorrência em outubro (6) e mínima em janeiro (4) e fevereiro (3) na região Sudeste do Brasil. As temperaturas variam entre 17,0 e 23,0 °C no inverno e, entre 26,0 e 33,5 °C no verão. Além da altitude e da proximidade com o mar, as ilhas de calor urbana também podem ser consideradas um fator que altera o campo de temperatura (Silva e Dereczynski, 2014).

Em média, as mínimas temperaturas ocorrem ao amanhecer e as máximas durante a tarde, obedecendo o ciclo diurno imposto pelo balanço da radiação solar, sob condições sem nuvens e sem a atuação de sistemas sinóticos transientes. Um exemplo do padrão do ciclo diurno de temperatura para a cidade do Rio de Janeiro é apresentado na Figura 1.3. Nesse sentido, a princípio, não é esperado que a temperatura volte a aumentar após o pôr-do-sol.

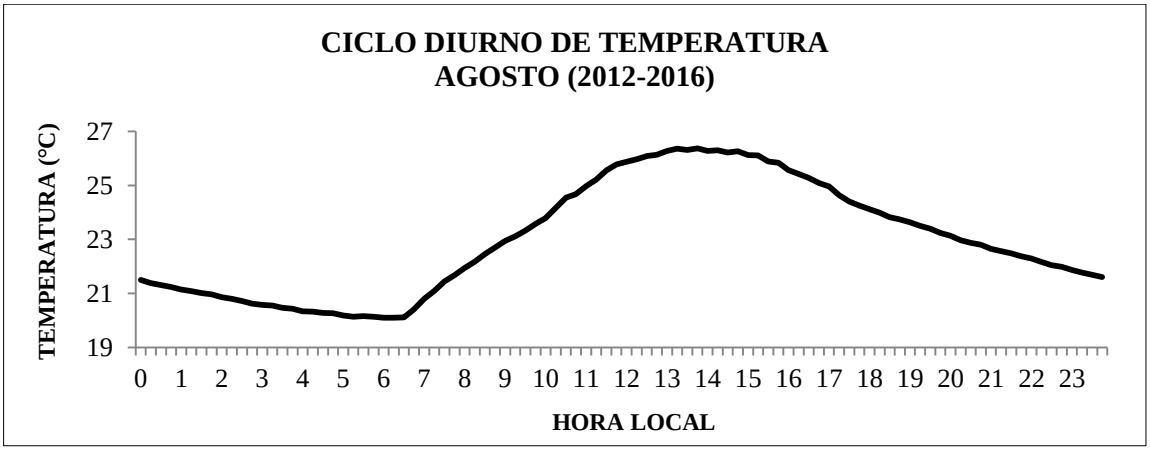


Figura 1.3. Ciclo diurno de temperatura média para o mês de agosto para a estação meteorológica de São Cristóvão da rede AlertaRio. (2012-2016).

Com relação às variações de temperatura devido a passagens de sistemas frontais, sabe-se que sobre a região Sudeste do Brasil, a passagem deles é caracterizada por um giro

anti-horário do vento. A mudança da direção do vento de NE para NW, causa um aquecimento do ar, e que, seguindo do giro de NW para SW/SE há uma diminuição da temperatura do ar devido a chegada da massa de ar frio.

Dametto e Rocha (2006) realizaram um estudo das características climáticas dos sistemas frontais na cidade de São Paulo, também na região Sudeste, e encontraram que o aquecimento pré-frontal médio para o verão é de 0,5 °C enquanto que para o inverno é de 0,8 °C. Ainda que sejam cidades distintas, por estarem na mesma região, espera-se alguma semelhança na escala para o Rio de Janeiro, uma vez que se trata de taxas de aquecimento devido a um sistema sinótico e não para valores absolutos.

Apesar dessas características médias, no dia 02 de agosto de 2011 na cidade do Rio de Janeiro foi registrado, simultaneamente, um rápido aquecimento noturno da ordem de 5 °C em uma hora em algumas estações meteorológicas, chegando a cerca de 8°C em quatro horas em outras. O ciclo diurno de temperatura neste dia foi tão atípico, que a temperatura máxima do dia foi observada durante a noite.

Dentre os fenômenos meteorológicos que explicariam tal aquecimento, tem-se o *Heat Burst* (HB) que é caracterizado pelo súbito aumento da temperatura do ar, com simultânea diminuição da umidade relativa e ventos fortes, com ocorrência tipicamente noturna (McPherson *et al*., 2011).

Por tratar-se de um fenômeno ainda pouco estudado, principalmente no Brasil, este trabalho tem o objetivo de confirmar se este aquecimento realmente caracterizou-se como um *Heat Burst*, buscando o entendimento físico dele enfatizando especificamente o caso ocorrido no Rio de Janeiro-RJ. Os objetivos específicos se concentram em avaliar outras possíveis ocorrências, bem como quantificar as taxas de aquecimento para o RJ. Para tal, busca-se auxílios de modelagem numérica para simular o ocorrido, enfatizando as dificuldades de identificação do *Heat Burst* em escala operacional.

2. O HEAT BURST

2.1 Teoria

O *Heat Burst* (HB) é definido pela Sociedade Americana de Meteorologia como um localizado e repentino aumento da temperatura em superfície, associado com tempestades ou sistema convectivo de mesoescala (SCM), frequentemente acompanhado pela diminuição da umidade. O aumento da temperatura pode ser tão extremo que algumas vezes é referido como um "*hot blast of air*" ou como uma explosão quente de ar, em tradução livre. Além disso, ocorre em associação com precipitação devido a correntes descendentes que penetram uma camada estável superficial atingindo a superfície.

O HB também é definido pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) como um fenômeno meteorológico no qual o ar em subisidência de uma tempestade em dissipação causa um rápido aumento da temperatura e fortes ventos em linha reta próximo à superfície. Ainda segundo a NOAA, quatro fatores são característicos de *Heat Burst*: (1) a ocorrência noturna, (2) a dissipação de tempestades, (3) uma camada profunda de ar muito seco e (4) uma inversão térmica próxima a superfície.

Os HBs são de natureza exclusivamente noturna, possivelmente porque as inversões próximas à superfície não costumam ser observadas durante o dia (McPherson *et al.*, 2011).

A camada limite atmosférica (CLA), ou planetária (CLP), é a parte inferior da atmosfera que conecta a superfície com a atmosfera livre. Devido ao resfriamento superficial noturno, causado pela emissão da radiação de onda longa na superfície, surge a Camada Limite Estável (CLE), ou noturna (CLN), com a presença de uma inversão térmica como característica marcante (Stull, 1950). Sua evolução durante o dia é ilustrada na Figura 2.1, onde após o pôr-do-sol, com o resfriamento da superfície e a diminuição da instabilidade, tem-se a formação da CLE e uma camada residual acima desta. Ao nascer do sol e com energia suficiente a camada superficial se aquece, fazendo com que o calor se distribua acima através dos processos de condução e convecção, desfazendo-a. Após esses processos a camada de mistura é gerada e o ciclo se reinicia (Stull, 1988).

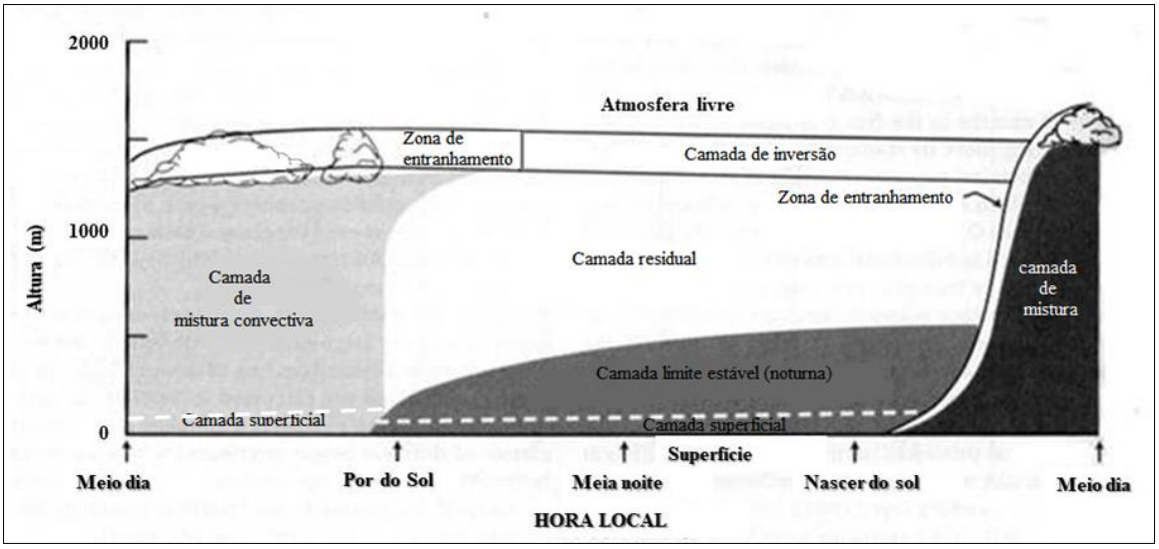


Figura 2.1. Evolução temporal da camada limite atmosférica (CLA). Fonte: Adaptado de Stull, 1988.

Durante a noite, com a CLE formada ou em processo de formação, uma parcela de ar em subsidência, devido a dissipação da tempestade, com flutuabilidade suficientemente negativa para penetrar essa camada, poderia produzir uma localizada corrente descendente de ar quente e seco (McPherson *et al.*, 2011)**.**

O HB ocorre com o decaimento de tempestades noturnas onde há evaporação (em maior parte por gotas de nuvem) e, portanto, um resfriamento latente pequeno, mas capaz de gerar uma parcela de ar mais fria e mais densa do que a vizinhança. Essa parcela subside rapidamente em direção a superfície, aquecendo por compressão adiabática (Johnson, 1983). Em superfície, tem-se algo como uma "bolha de ar quente".

Johnson (1983) propôs uma sequência que antecede o desenvolvimento do HB: (1) A chuva de uma nuvem cai adiabaticamente úmida em uma camada muito seca e, evapora completamente, resfriando uma pequena região do ar; (2) Como a parcela cai adiabaticamente seca, ela permanece mais fria que o ambiente até que encontra (3) uma camada de inversão térmica próxima a superfície. Assim, com correntes descendentes significativas, o ar em subsidência continua a descer passando do nível de equilíbrio e atingindo a superfície. Dessa forma, a parcela encontra-se mais quente do que o entorno. Assim, Johnson (1983) descreveu o *Heat Burst* como um *downburst* ou *microburst* que penetra a camada abaixo da inversão térmica (McPherson *et al*., 2011) (Figura 2.2).

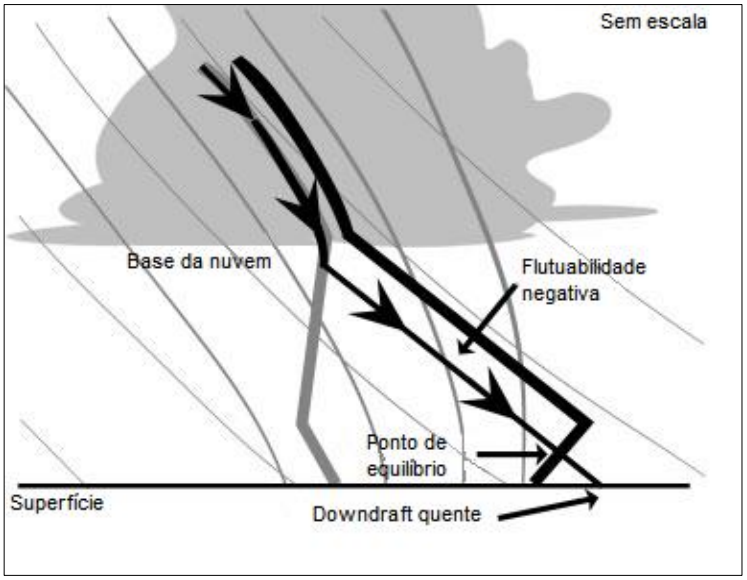


Figura 2.2. Ilustração de um *microburst* que produz *Heat Burst* em superfície. A linha grossa preta representa o perfil de temperatura do ambiente; a linha grossa cinza representa o perfil de Td; a linha clara cinza representa a adiabática seca; a linha média cinza representa a adiabática saturada; e a linha com flechas representa a dinâmica da corrente descendente. Fonte: McPherson *et al.*, 2011.

Fujita (1976 e 1985) define *downburst* como uma forte corrente descendente que produz uma explosão (*outburst*) de ventos intensos próximo ou na superfície. Ele também introduziu o *microburst*, definindo-o como um *downburst* com extensão horizontal menor que 4km e duração menor que 5min. Diversos autores como Caracena *et al*., (1983), classificaram *microbursts* em categorias secas e úmidas que dependem da quantidade de chuva durante o evento, onde o *microburst* seco se caracteriza por pouca ou nenhuma chuva (*apud* Wakimoto, 1985). Em geral, quando as gotas de chuva oriundas de uma nuvem de base alta caem em uma região seca, dissipam-se antes mesmo de atingir a superfície. Além disso, a camada seca abaixo da nuvem acelera o processo de evaporação (Fujita, 1985).

Johnson (1983) avaliou sondagens de 5 locais que experimentaram o aquecimento devido o HB ocorrido em 29 de maio de 1976 em Oklahoma - EUA, as quais apresentaram características semelhantes entre elas. Wakimoto (1985) exemplificou sondagens propícias ao desenvolvimento de *microburst* seco e apontou similaridades às estudadas por Johnson (1983) (Figura 2.3). A característica principal dessas sondagens, é a presença de uma camada seca abaixo de uma nuvem com pouco desenvolvimento vertical e fracas correntes ascendentes.

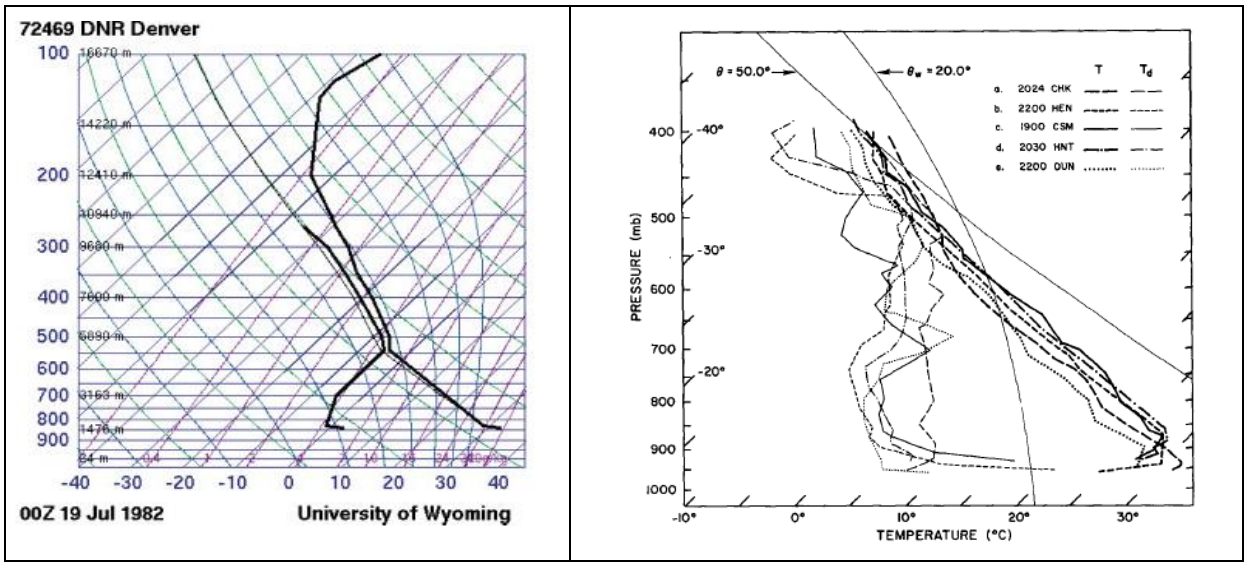


Figura 2.3. Sondagem exemplificada por Wakimoto (1985), disponibilizada pela Universidade de Wyoming a esquerda e, sondagens estudadas por Johnson (1983) a direita.

2.2 Casos de HB relatados no brasil e no mundo

McPherson *et al*., (2011) realizaram um estudo da distribuição espacial e temporal de *Heat Burst* para Oklahoma (EUA) através de uma detecção automática que utilizou os critérios apresentados por Malczewski (1999). Para isso, utilizaram informações de 20 estações meteorológicas durante o período de janeiro de 1994 a agosto de 2009, com saídas a cada 5 minutos. Como resultado da distribuição mensal, se destacam os meses de maio, junho e julho; ou seja, o verão boreal sendo o de maior ocorrência. Com relação à distribuição temporal, o período de 02 – 04 Z (20 – 22 hora local) foi o horário de maior frequência. Além disso, verificou-se que a duração média desses eventos foi de 72 minutos, enquanto que a mediana foi de 50 minutos. Entretanto, os autores destacaram eventos em que as perturbações termodinâmicas se deram em 20, 15 e até 10 minutos, concluindo que as observações horárias poderiam não ser suficientes para identificar os eventos.

O pico de atividade do HB se deu durante o início da noite, o que correspondeu ao tempo típico de dissipação da convecção durante a primavera e o verão para Oklahoma-EUA onde durante a estação quente, especialmente quando tinham forçantes sinóticas, e o cisalhamento do vento era fraco e apesar de profundo, as convecções úmidas se formavam durante a tarde (McPherson *et al*., 2011).

O autor destacou ainda exemplos de ocorrência de HB em que apresentaram riscos à segurança pública e à propriedade. Em 23 de maio de 1996, fortes ventos resultaram em aproximadamente 18 milhões de dólares em danos na região sudoeste e central de Oklahoma-EUA. Em outro evento, em 7 de julho de 1995, no Noroeste de Oklahoma-EUA, onde um

prejuízo de aproximadamente 2 milhões de dólares, e um grande ancoradouro com 20 barcos atracados com 50 pessoas a bordo, foi lançado a 15 metros.

No Brasil, especificamente no Rio Grande do Sul, moradores de pelo menos cinco cidades relataram uma sensação de calor com elevação da temperatura em curtíssimo intervalo de tempo no início da tarde do dia 05 de outubro de 2017. Todos os depoimentos apontam para uma sensação de calor incomum a ponto dos moradores verificarem seus automóveis na garagem e até mesmo se havia fogo ou incêndio nas imediações. Algumas pessoas relataram ainda, que o calor extremo veio acompanhado de fortes ventos. Três estações meteorológicas da rede INMET localizadas nos municípios de São Luiz Gonzaga, Santa Rosa e São Borja não registraram qualquer elevação de temperatura fora do normal. Entretanto, vale ressaltar que as observações nessas estações são horárias, podendo mascarar fenômenos de curtíssima duração (MetSul, 2018). Isso corrobora com uma das conclusões de McPherson *et al.,* (2011), que afirmaram que sem um sistema de observação em superfície com alta resolução espacial e temporal permanentes, a maioria dos HB continuarão não sendo identificados.

3. DADOS E METODOLOGIA

No intuito de estudar o evento de aquecimento anômalo ocorrido em 02 de agosto de 2011, foram feitas algumas investigações no período do evento, utilizando dados observados, variáveis meteorológicas reanalisadas a partir do Climate Forecast System versão 2 (CFS v2) e simulações a partir do modelo numérico *Weather Research and Forecasting* – WRF, para análise do fenômeno.

3.1 Dados

Os dados observados tiveram diferentes fontes, englobando estações meteorológicas de superfície e de altitude, de acordo com a disponibilidade das informações, seguem algumas especificações.

3.1.1 Rede AlertaRio

O Alerta Rio é o sistema de alerta de chuvas intensas e de deslizamentos em encostas da cidade do Rio de Janeiro. Foi criado em 25 de setembro de 1996 (Decreto Nº 15142) e desde então é gerenciado pela Fundação GEO-RIO, com o objetivo de emitir BOLETINS DE ALERTA à população, sempre que houver previsão de chuvas intensas que possam gerar inundações de vias públicas e/ou deslizamentos.

O Sistema é composto por 33 estações telemétricas espalhadas por todas as regiões do Município do Rio de Janeiro. Estas estações enviam dados em tempo real, a cada 15 minutos, para a central do Alerta Rio. Deste total de 33 estações, 26 são pluviométricas; ou seja, enviam apenas informações de chuva. Cinco delas são estações meteorológicas que enviam além das informações de chuva, temperatura e umidade do ar (Irajá, Jardim Botânico, Barra-Rio Centro, Santa Cruz e Alto da Boa Vista), e duas são estações meteorológicas completas que transmitem dados de chuva, vento, temperatura, umidade do ar e pressão atmosférica (Guaratiba e São Cristóvão).

Vale ressaltar que a estação de São Cristóvão apresenta uma maior continuidade, tendo sido instalada em 19 de agosto de 2000, mas somente em 2002 apresentou consistência na disponibilidade dos dados. Localizada na Rua Campo de São Cristóvão, 268 na Zona Norte do município a 25m de altitude.

Além das estações meteorológicas, utilizou-se imagens do radar meteorológico, localizado no alto da Serra da Carioca (no interior do Parque Nacional da Tijuca) e sua operação teve início em dezembro de 2010.

3.1.2 Rede INMET

O INMET possui uma ampla rede de estações meteorológicas em todo o Brasil, com disponibilização dos dados a cada 60 minutos. O Instituto armazena os dados horários dos últimos 365 dias em seu site e para ter acesso às informações mais antigas, é necessário solicitá-las no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP). Vale ressaltar que esses dados pretéritos possuem a restrição de serem disponibilizados a cada 6h e não de forma horária.

3.1.3 Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica – REDEMET

A REDEMET disponibiliza informações meteorológicas através do código METAR, que é uma mensagem de texto codificada informando condições atmosféricas de um aeródromo a cada hora. O aeroporto Tom Jobim é designado pela sigla SBGL e o Santos Dumont pela sigla SBRJ, ambos localizados no Rio de Janeiro-RJ.

3.1.4 Diagrama Skew T-log P

As sondagens atmosféricas são diariamente realizadas no aeroporto Tom Jobim (SBGL) para os horários padrões de 00Z e 12Z e disponibilizadas pela Universidade de Wyoming podendo ser encontradas facilmente através do site http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html.

3.2 Metodologia

3.2.1 Caracterização e frequência de ocorrência dos HB

Para avaliação da situação sinótica foram utilizadas as cartas sinóticas disponibilizadas pelo CPTEC-INPE e Marinha do Brasil, imagens de satélite da América do Sul nos canais infra vermelho e vapor d'água disponibilizadas pelo CPTEC/INPE para o horário de 00Z do dia 03 de agosto de 2011. Foi utilizada ainda, imagens de satélite nos mesmos canais para o Sudeste do Brasil durante o período 22Z 02AUG a 00Z do dia 03AUG2011. Para suplementar a análise, utilizou-se o Climate Forecast System – NCAR UCAR com resolução de 0,5° a cada 06 horas durante o período de 00Z 02AUG a 06Z 03AUG2011.

Para caracterizar o aquecimento noturno do dia 02 de agosto de 2011 como um fenômeno de HB foram utilizados dados meteorológicos de diferentes fontes conforme Tabela 3.1. As variáveis meteorológicas utilizadas foram temperatura do ar e do ponto de orvalho (°C), umidade relativa (%), pressão (hPa) e magnitude do vento (nós).

Tabela 3.1. Dados Observacionais.

Fonte de dados	**Período**
Código METAR aeroportos Tom Jobim (SBGL) e Santos Dumont (SBRJ)	09Z 02AUG a 06Z 03AUG2011
Diagrama Skew-T-log P para o aeroporto Tom Jobim (SBGL)	00Z 03AUG2011
Rede AlertaRio (Alto da Boa Vista, Guaratiba e São Cristóvão)	09Z 02AUG a 06Z 03AUG2011
Imagens de radar do AlertaRio	18Z 02AUG a 03Z03AUG2011
Rede INMET (Forte de Copacabana)	09Z 02AUG a 06Z 03AUG2011

Uma vez que o aquecimento observado não foi detectado por modelos operacionais na época, buscou-se uma alternativa de tentar simular o evento através do modelo WRF (*Weather Research and Forecasting)*.

O WRF foi gentilmente simulado pelo meteorologista Vinícios Almeida, então aluno de mestrado, como colaboração à prática da docência e Jornada de Iniciação Científica, incentivados pelo Departamento de Meteorologia - UFRJ. As simulações tiveram características de parametrização Kain Fritsch, microfísica WSM3, ROL, RRTM (Mlawer *et al.*, 1997), ROC (Dudhia, 1989), com dinâmica não hidrostática, domínio centrado em 21,633°S e 043,125°W e o Climate Forecast System – NCAR UCAR (CFSv2) como condição de contorno. As simulações tiveram resolução espacial de 9km e 6km, resolução temporal de 3h e 6h, respectivamente.

Posteriormente, para verificar possíveis demais ocorrências, foi utilizada a estação meteorológica de São Cristóvão da rede AlertaRio, por apresentar o maior período de dados, disponíveis a cada 15 minutos. Para tanto, o período avaliado foi de 2002 a 2016, totalizando 15 anos. Foi avaliado o aquecimento simultaneamente à diminuição da umidade relativa durante o período noturno (18:15 às 05:45 horário local), para certificar-se que não se tratava do natural aquecimento do ciclo diurno.

4. RESULTADOS

4.1 Situação Sinótica

A avaliação sinótica através das cartas sinóticas, tornou-se curiosa, uma vez que estavam muito discrepantes (Figura 4.1). O CPTEC indica uma friagem, com a região do Rio de Janeiro passando por uma situação pré-frontal, enquanto que na Marinha do Brasil, o sistema frontal passou pelo mar.

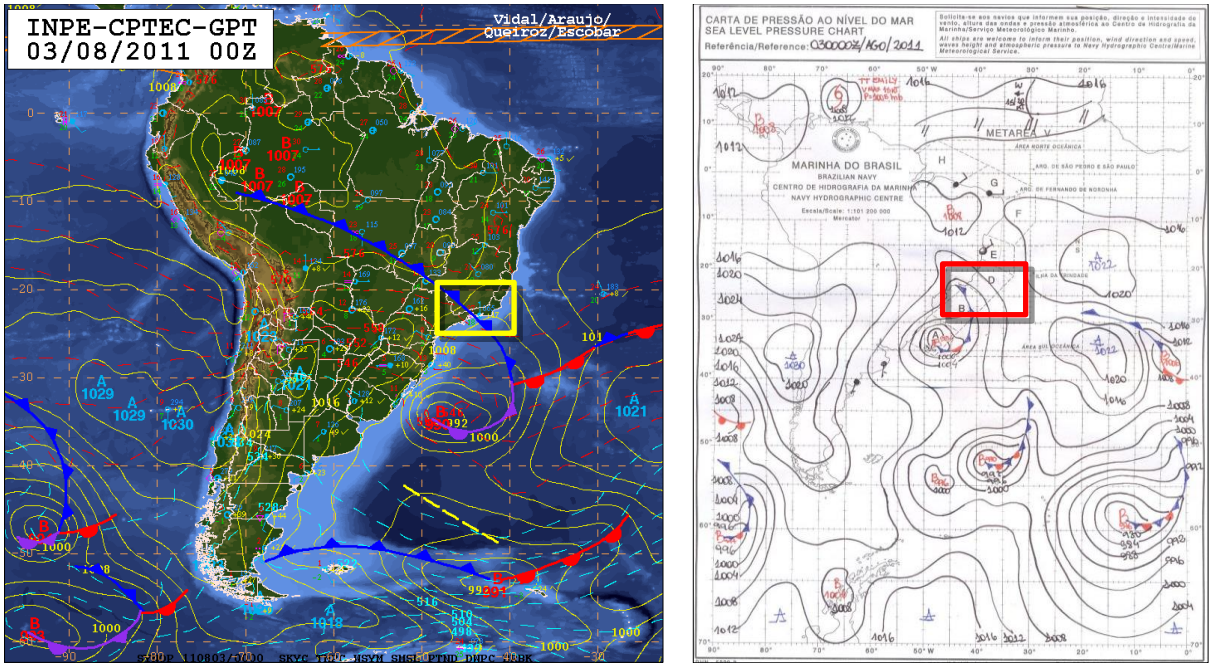


Figura 4.1. Carta sinótica de superfície disponibilizada pelo CPTEC-INPE (esquerda) e pela Marinha do Brasil (direita), para o dia 03 de agosto 00Z, 21h do dia 02.

Para diminuir essa discrepância, foram analisadas imagens de satélite no canal do vapor d'água (Figura 4.2a, 4.3a, 4.3c, 4.3e, 4.3g), não indicando contraste de massas de ar, sendo descartada a influência frontal. No canal infravermelho, que indica núcleos de nuvens Cumulonimbus (Cb), marcando uma região de nebulosidade e instabilidade (Figuras 4.2b e 4.3b, 4.3d, 4.3f, 4.3h).

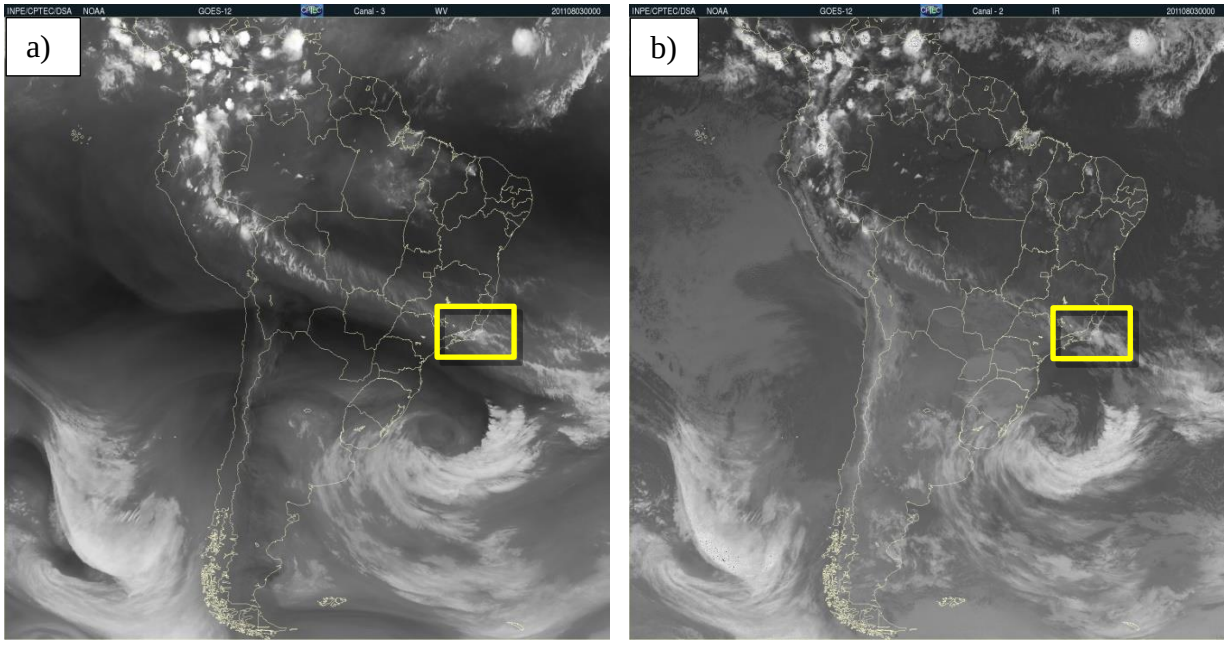
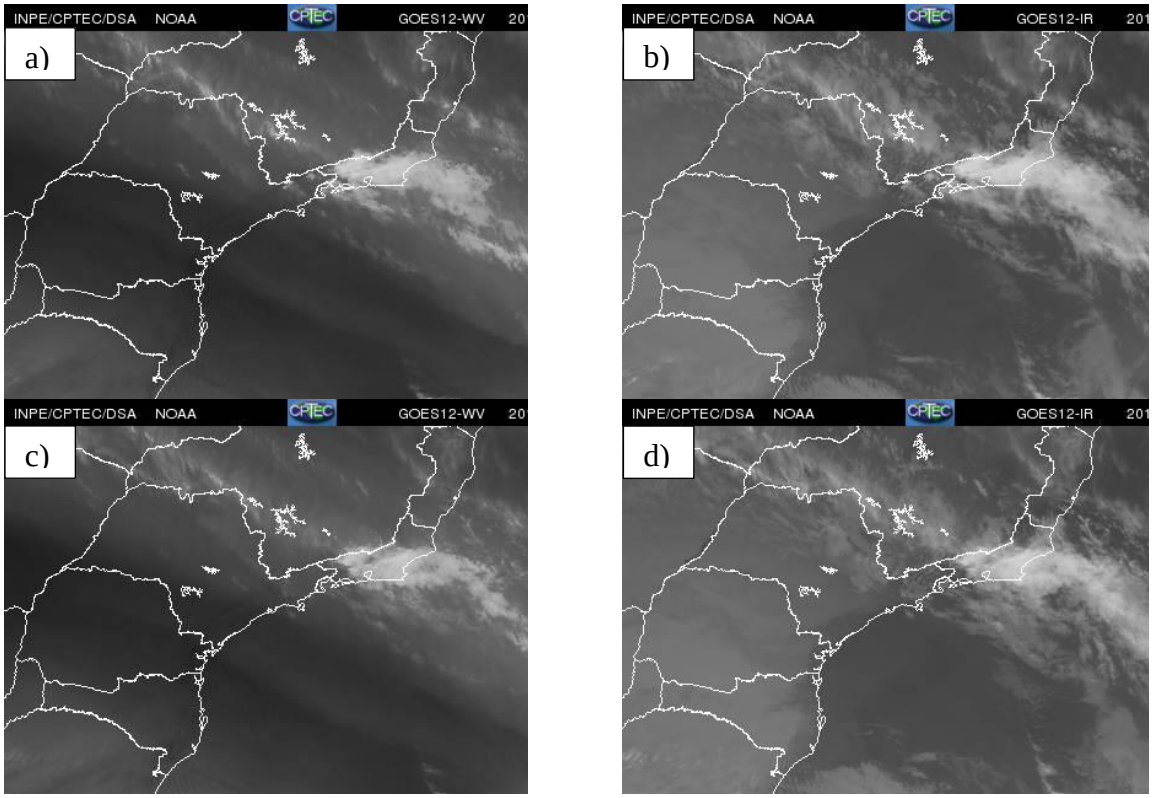


Figura 4.2. Imagem de satélite nos canais de vapor d'água (a) e infravermelho (b), para a América do Sul, para o dia 03 de agosto 00Z (21h do dia anterior). Fonte: GOES 12 CPTEC/INPE.

Na Figura 4.3, observou-se que a cobertura de nuvens sobre a cidade diminuiu com a passar das horas até que na imagem de 01Z (22h) houve exatamente sob a cidade do Rio de Janeiro uma região, quase circular, sem a presença de nuvens, como se tivessem evaporado.



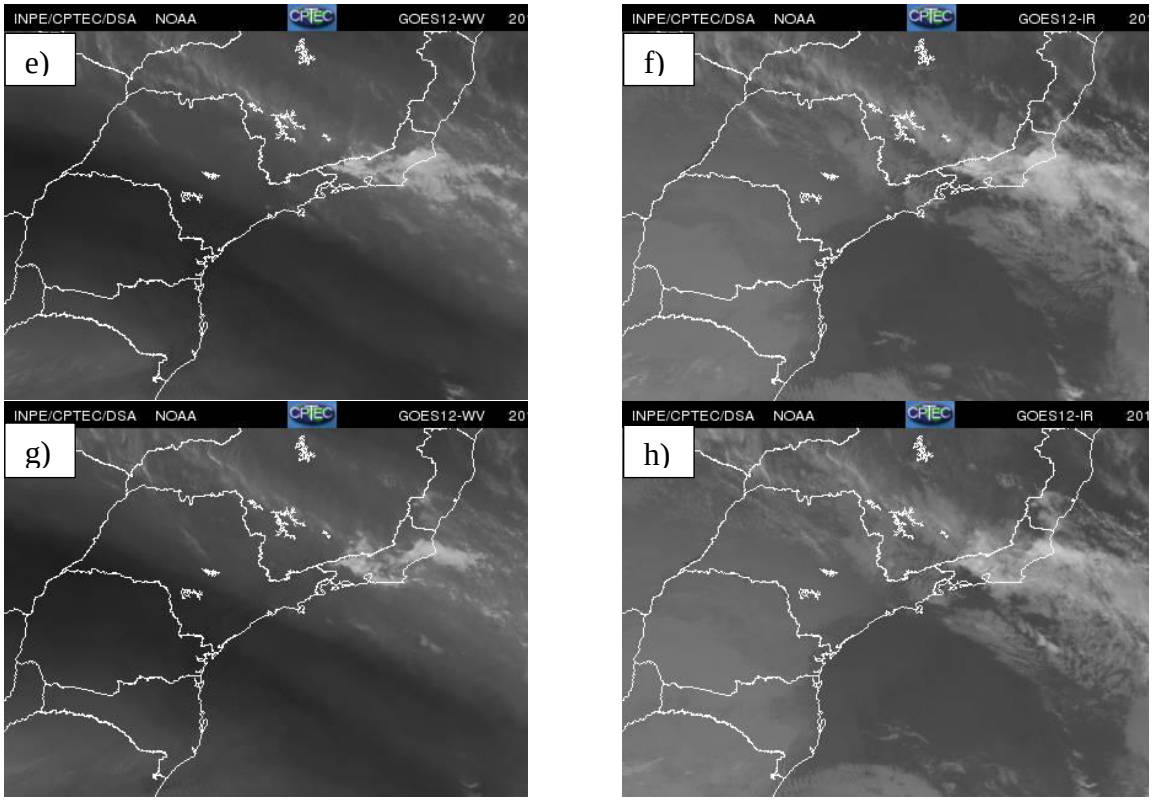


Figura 4.3. Imagem de satélite nos canais de vapor d'água (esquerda) e infravermelho (direita) para o setor São Paulo-Rio de Janeiro. A primeira linha é de 22Z, a segunda de 23Z do dia 02 de agosto e terceira linha 00Z do dia 03. Fonte: GOES 12 CPTEC/INPE.

Na Figura 4.4 são representados os 3 níveis da atmosfera, com linhas de corrente em cinza e magnitude do vento em altos níveis (200hPa) em m/s, linhas de altura geopotencial em níveis médios (500hPa) em decâmetro em linhas vermelhas e a pressão ao nível médio do mar (hPa) em linhas pretas. O período de análise compreende às 00Z do dia 02 de agosto às 06Z do dia 03 de agosto com intervalos de 6 horas.

Observa-se na Figura 4.4a uma baixa pressão com centro em 1008hPa sobre Rio Grande do Sul e Uruguai, gradiente de altura geopotencial em 500hPa e a presença do jato subtropical, indicando a presença de uma frente fria.

Nos horários subsequentes, Figura 4.4b e 4.4c, observa-se o deslocamento da frente fria com aprofundamento do ciclone e intensificação do gradiente de altura geopotencial. Às 12Z do dia 02 de agosto (Figura 4.4c), o Sudeste fica sobre condição pré frontal devido a aproximação deste sistema. A partir desse horário, a frente fria toma um deslocamento mais zonal para leste se afastando do continente. Sobre o Sudeste do Brasil, o gradiente de altura geopotencial diminui, colocando a região em condição pós frontal.

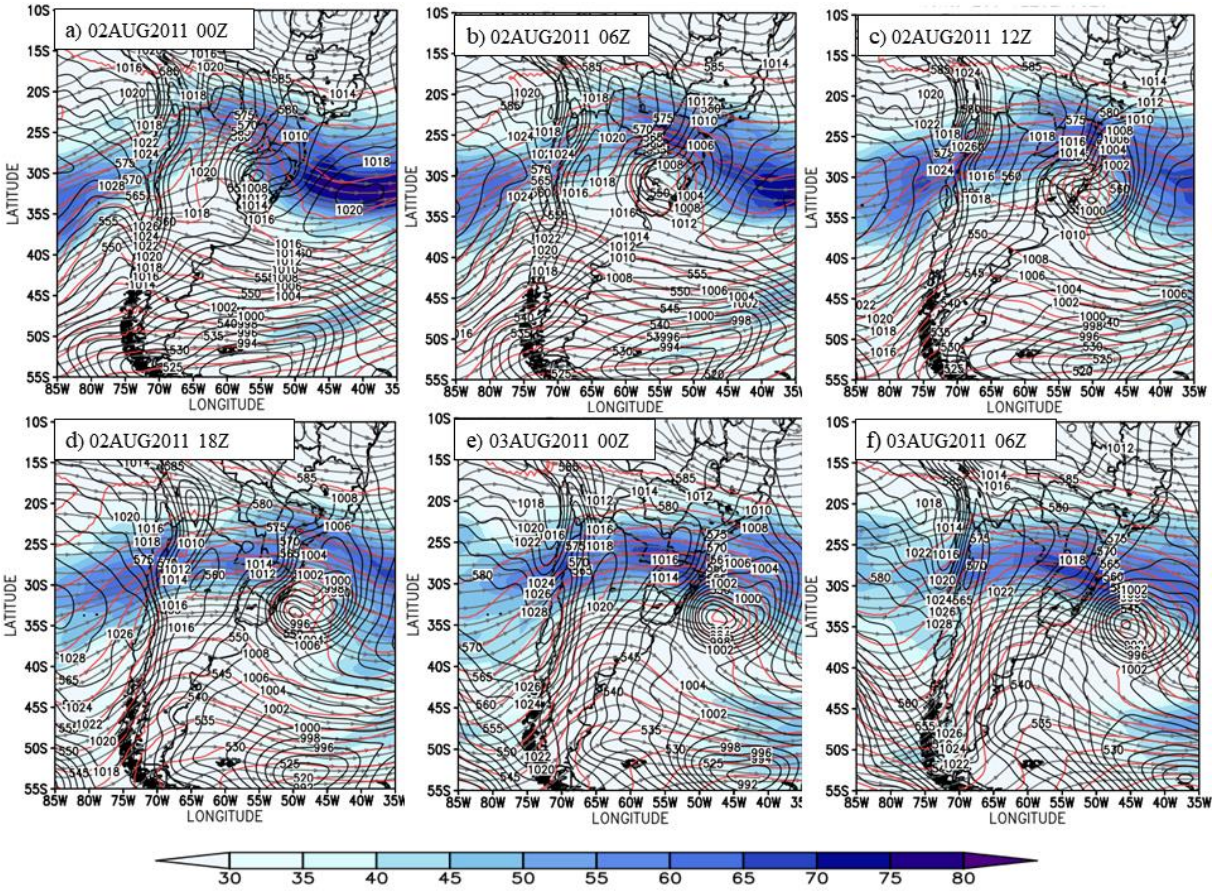


Figura 4.4. Linhas de corrente e magnitude do vento em 200hPa (cores), altura geopotencial em 500hPa (contorno vermelho) e pressão ao nível médio do mar (contorno preto) a partir do CFSR. a) 00Z, b) 06Z, c) 12Z e d) 18Z do dia 02 de agosto e e) 00Z e 06Z do dia 03 de agosto.

4.2 AVALIAÇÃO DO AQUECIMENTO NOTURNO 02/08/2011

Na Figura 4.5, são indicados séries temporais de T, Td, Vento e pressão nos aeroportos Tom Jobim (SBGL), Santos Dumont (SBRJ) e Forte de Copacabana. Nota-se que no aeroporto Tom Jobim (Figura 4.5a), a temperatura do ar (T) variou em 5 °C na primeira hora (20h às 21h) seguida do aumento de mais 1°C na próxima hora, totalizando aumento de temperatura de 6 °C em 2 horas. No mesmo momento, houve a redução da temperatura do ponto de orvalho (Td) em 3 graus de 20h às 21h seguida do decaimento em 2 graus na próxima hora. Houve um aumento em 100% da magnitude do vento em apenas uma hora, passando de de 6 nós às 21h para 12 nós às 22 horas, sem registro de rajadas.

No aeroporto Santos Dumont (Figura 4.5b), a temperatura do ar (T) aumentou 7 °C em 3 horas (18h às 21h), sendo 5 °C em apenas uma hora (20h às 21h). A temperatura do ponto de orvalho (Td) reduziu 5 °C em 2 horas, sendo o maior decaimento de 20h às 21h, onde a diminuição foi de 4 °C. O vento aumentou em 11 nós, passando de 6 nós às 20h para 17 nós na hora seguinte. Houve registro de rajada de 28 nós às 21h. Ressaltando que, segundo a

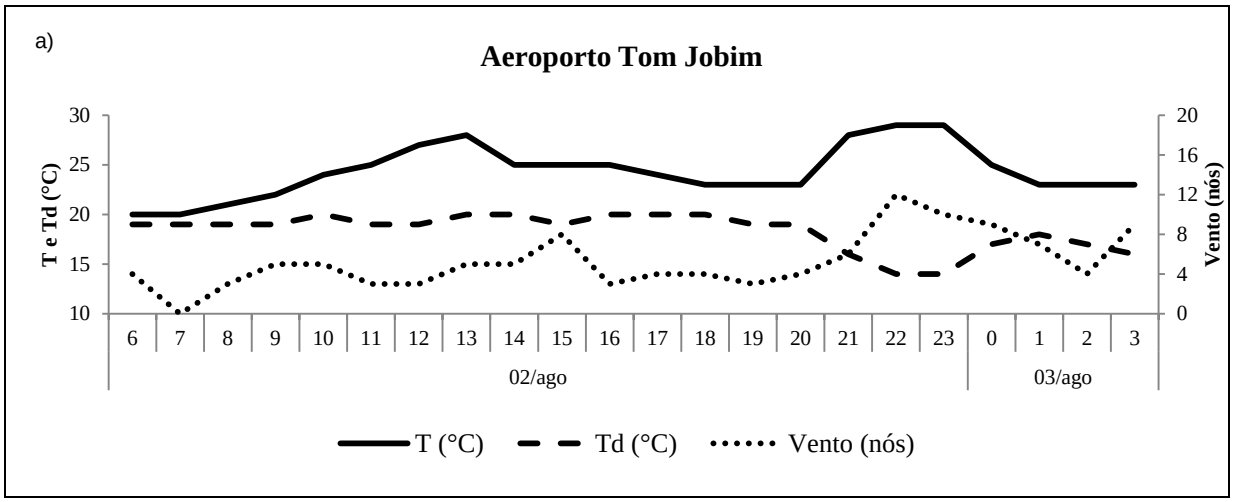
Organização Meteorológica Mundial (OMM), valores superiores a 28 nós, caracterizam a força 7 na escala Beaufort, considerado um Aviso de Mau Tempo de Vento Forte.

Quanto a cobertura do céu, as mensagens METAR indicaram que, antes do aquecimento, ela variou entre 1/8 e 7/8, enquanto que nas mensagens de 19h e 20h (22 e 23Z) informavam que não havia nenhuma nuvem abaixo de 5000 pés e, após às 20h (23Z) as mensagens indicaram o código CAVOK[1]. No aeroporto Santos Dumont, antes do aquecimento, a nebulosidade também variou entre 1/8 e 7/8, porém, nas mensagens de 21h e 23h (00 e 02 Z) indicavam o código CAVOK.

No aeroporto Tom Jobim houve registro de névoa seca nas mensagens de 20Z e 21Z (17h e 18h locais) e no Santos Dumont houve registro de névoa úmida desde a manhã até às 20Z (17h local) do dia 02 de agosto de 2011.

Na estação meteorológica do Forte de Copacabana (Figura 4.5c), a temperatura do ar (T) começou a aumentar às 17h, quando registrava 21,7 °C, e atingiu seu valor máximo às 21h com 30,4 °C, totalizando aumento de 8,7 °C em 4 horas. O aumento mais significativo foi entre 17h e 19h onde a temperatura aumentou 6,8 °C. No mesmo momento, a temperatura do ponto de orvalho (Td) era de 19,8 °C e atingiu seu menor valor às 22h com 13,8 °C. A magnitude do vento aumentou a partir de 17h e atingiu seu maior valor às 00h do dia 03 de agosto com 17,1 nós. A estação também registrou rajadas de 29 nós entre 21h e 22h do dia 02 de agosto.

Vale ressaltar que não houve registro de dados para o aeroporto Santos Dumont nos horários de 00h às 03h do dia 03 de agosto.



1 Visibilidade maior que 10km, nenhuma nuvem abaixo de 5000 pés e nehum fenômeno significativo presente.

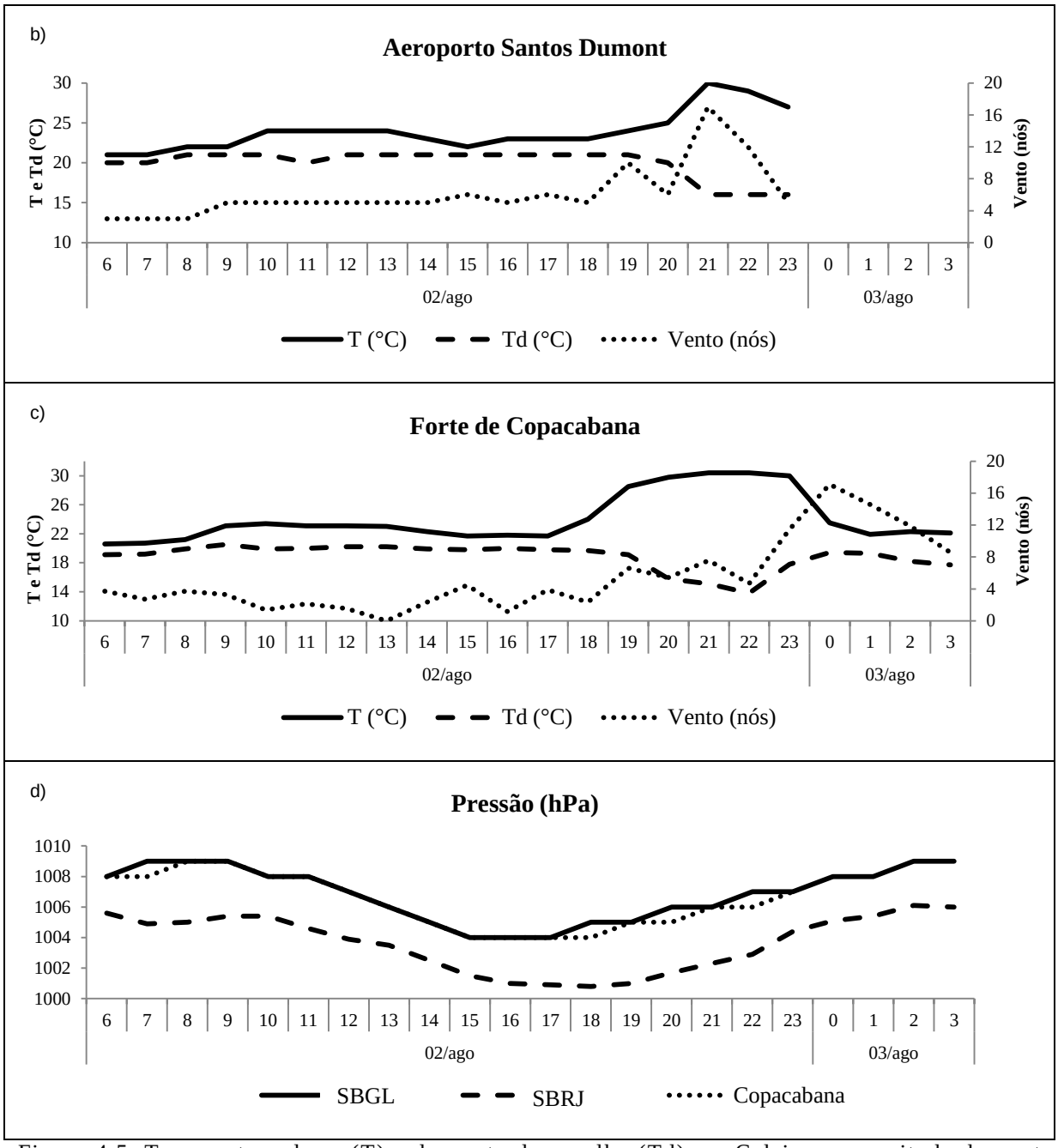


Figura 4.5. Temperatura do ar (T) e do ponto de orvalho (Td) em Celsius e magnitude do vento em nós para: a) os aeroportos Tom Jobim (SBGL) e b) Santos Dumont (SBRJ) e c) estação meteorológica do Forte de Copacabana. d) todos os locais.

Na Figura 4.6 são indicados as séries temporais de T, UR, vento e pressão para as estações meteorológicas de Guaratiba, São Cristóvão e Alto da Boa Vista seguindo dados a cada 15 minutos da rede AlertaRio. Uma diferença imediata com relação a Figura 4.5, é que surgem sinais mais nítidos de aquecimento com a maior resolução temporal. Nota-se que na estação meteorológica do Alto da Boa Vista (Figura 4.6a), o aquecimento, iniciou às 17:15 com temperatura de 24,9 °C e umidade relativa de 53%, chegando a 28,4°C e umidade relativa de 42% às 19h. A partir desse momento, a temperatura diminuiu lentamente até às

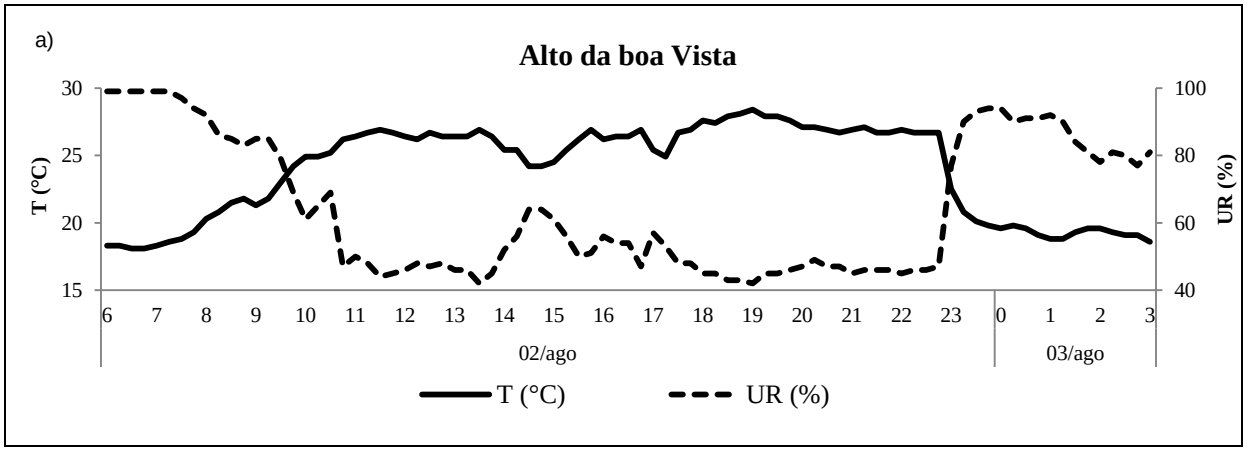
22:45 (T=26,7 °C; UR=47%) quando então, diminuiu abruptamente para 22,5 °C e umidade relativa de 77% às 23:00 e, a 19,6 °C e umidade relativa de 90% às 00 hora do dia 03 de agosto. Em resumo, pelo período de 1 hora e 45 minutos, a temperatura aumentou em 3,5 °C e a umidade relativa diminuiu em 11%. Após o aquecimento, a temperatura diminuiu em 4,5 °C e a umidade relativa aumentou em 30% (diminuição de 60% em relação a medição às 22:45) pelo período de 15 minutos.

A estação de Guaratiba (Figura 4.6b) iniciou o aquecimento às 18:30 quando registrava 24,3 °C e umidade relativa de 75%, chegando a 28,6 °C e umidade relativa de 46% às 19:45. As altas temperaturas se mantiveram até às 21:45 quando registrava 27,3 °C e umidade relativa de 48%, quando diminuiu rapidamente para 22,6 °C às 22:00 registrando umidade relativa de 87%. Em resumo, a temperatura aumentou em 4,3 °C e umidade relativa em 29% em 1 hora e 15 minutos seguida da diminuição de 4,7 °C e aumento da umidade relativa de 39%. A magnitude do vento começou a aumentar às 19h atingindo seu valor máximo às 22h com 12,1 nós.

A estação de São Cristóvão (Figura 4.6c) iniciou o aquecimento às 19:15 quando registrava 24,9 °C e 73% chegando a 28,8 °C e 50% de umidade relativa às 20:15. Continuou aquecendo quando às 20:45, registrava a temperatura de 29,5 °C e umidade relativa de 47%. Diferente das outras estações, a temperatura diminuiu lentamente com pequenos momentos onde a queda foi mais acentuada. A magnitude do vento começou a aumentar às 19h e atingiu o seu valor máximo às 20:30 com 7,8 nós.

Não houve registro da magnitude do vento e pressão na estação meteorológica do Alto da Boa Vista e em nenhuma delas há informação de rajadas.

Em todos os locais, a pressão diminuiu antes do evento de aquecimento e não houve registro de chuva em nenhum dos locais analisados.



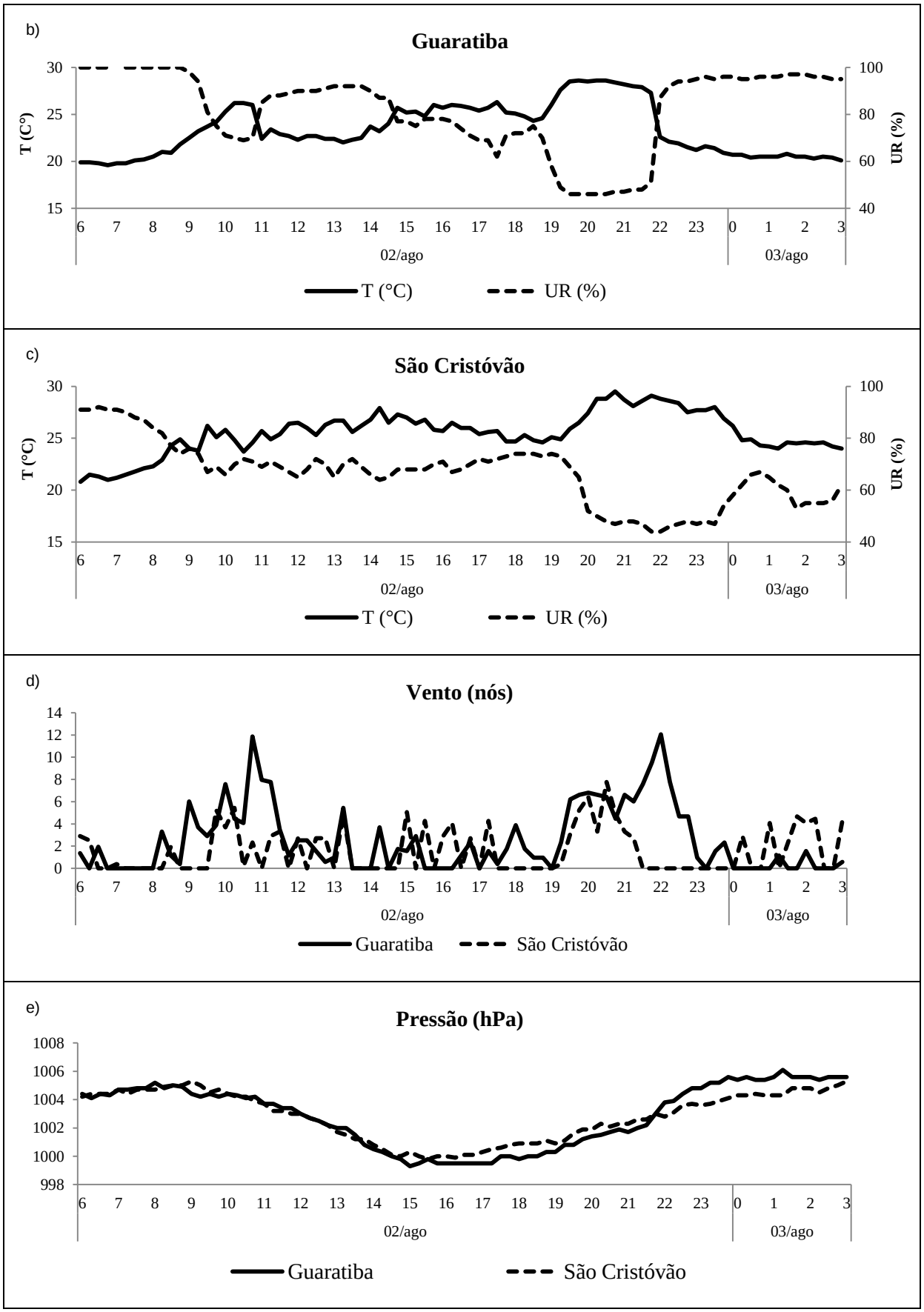


Figura 4.6. Temperatura do ar (T) em Celsius e umidade relativa (UR) em porcentagem para as estações meteorológicas: a) Alto da Boa Vista e b) Guaratiba e c) São Cristóvão. d) Magnitude do vento para Guaratiba e São Cristóvão.

A análise do radar meteorológico para o dia 02 de agosto de 2011 da GeoRio, não indicou núcleo convectivo relevante. Eventos deste tipo, justificam posteriormente a instalação do atual radar do INEA, o qual possui melhor detecção de nuvens convectivas para a área do Rio de Janeiro e região serrana.

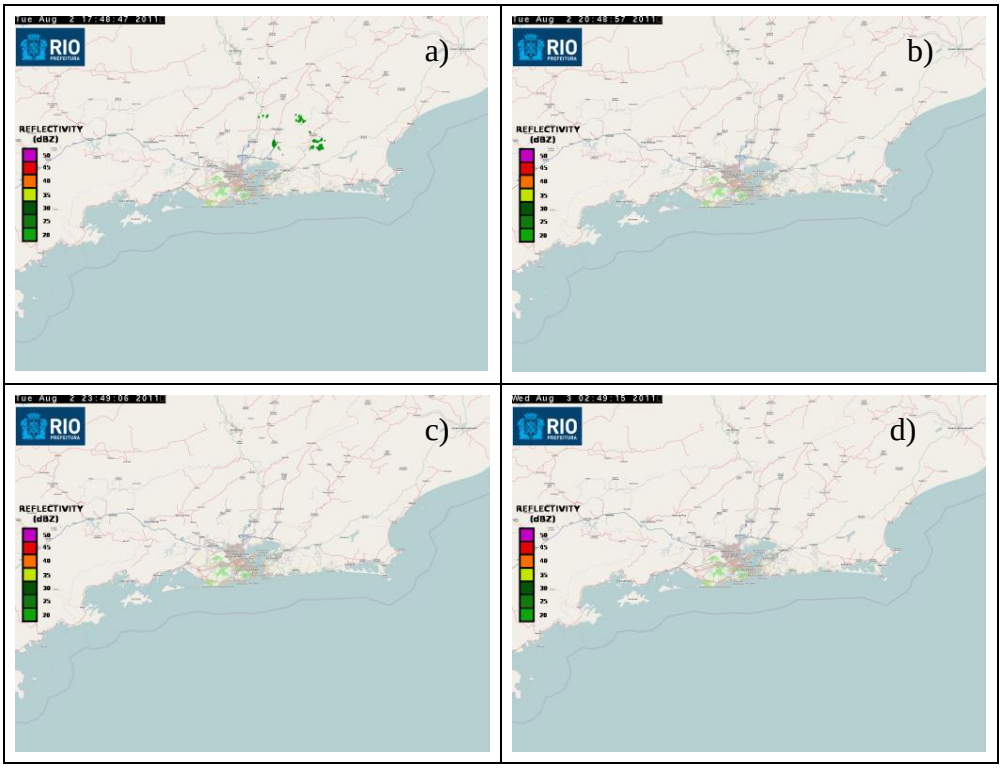


Figura 4.7. Imagens de radar meteorológico para os horários a) 18Z (15h) e b) 21Z (18h) do dia 02 de agosto de 2011, c) 00Z (21h do dia 02)e d) 03Z (00h) do dia 03 de agosto de 2011. Fonte: AlertaRio.

Outro aspecto importante foi avaliar a sondagem do dia 02 (Figura 4.8), onde pode-se observar inicialmente, que a atmosfera próxima a superfície (1000 – 980 hPa) estava absolutamente instável e a partir de 980hPa, condicionalmente estável. É possível notar que em torno de 550hPa a atmosfera encontrava-se muito seca e que próxima a superfície houve uma inversão térmica. Essa inversão indica uma parcela de ar quente em subsidência, além do fato da umidade reduzir significativamente indicar um secamento por subsidência. Portanto, é possível verificar que há uma parcela em contração adiabática.

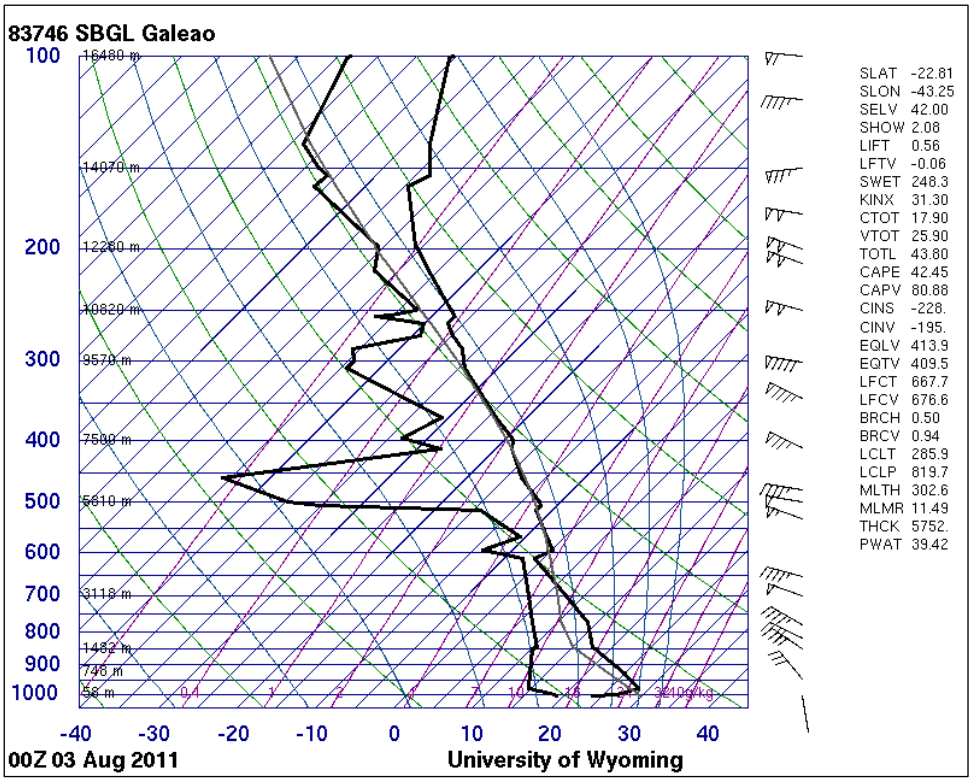


Figura 4.8. Sondagem para o aeroporto Tom Jobim para o dia 03 de agosto de 2011 00Z, 21h do dia 02. Fonte: University of Wyoming.

4.3 Modelagem Numérica

4.3.1 WRF 9km

As Figuras 4.9 a 4.12 compreendem o período de 21Z do dia 02 de agosto as 03Z do dia 03 de agosto com intervalos de 3 horas.

Na Figura 4.9 são representados os 3 níveis da atmosfera, com linhas de corrente em cinza e magnitude do vento em altos níveis (200hPa) em m/s, linhas de altura geopotencial em níveis médios (500hPa) em decâmetro em linhas vermelhas e superfície com pressão ao nível médio do mar (hPa) em linhas brancas. Observa-se que há a proximidade do jato subtropical (fora da grade), sinalizando a passagem da frente fria na vizinhança do estado do Rio de Janeiro. No horário de 21h (Figura 4.9a) nota-se a presença de um localizado núcleo com ventos mais fortes que o entorno no nível de 200hPa sobre parte do município do Rio de Janeiro indicando gradiente de temperatura em superfície. Observa-se ainda um pequeno gradiente de altura geopotencial com o aumento da pressão ao nível médio do mar com a evolução temporal.

A Figura 4.10 representa o campo de temperatura do ar a 2m, em graus Celsius, em cores e as linhas de contorno representam a diferença de temperatura em relação ao dia anterior. No horário de 21Z (Figura 4.10a) percebe-se uma região localizada sobre o

município com temperaturas mais elevadas que o entorno e consideravelmente mais elevadas do que o dia anterior, atingindo valores de até 8 °C. Essa região aquecida diminui com o passar das horas até que se torna uniforme.

A Figura 4.11 representa o campo de umidade relativa a 2m, em porcentagem, em cores e as linhas de contorno representam a diferença da umidade relativa em relação ao dia anterior. Este campo se comporta de maneira similar ao de temperatura, onde é possível observar uma região com valores menores do que o entorno, assim como em relação ao dia anterior onde a diferença atingiu valores em 40 unidades menores.

A Figura 4.12 representa o campo de vorticidade relativa a 10m (10^{-4} s^{-1}) em cores com o vento a 10m em barbelas. Valores positivos indicam movimento anticiclônico, ou seja, divergência. Observa-se valores positivos nas regiões com temperaturas elevadas conforme analisado anteriormente, principalmente às 00Z do dia 03 de agosto.

Os pontos das estações meteorológicas e dos aeroportos os quais haviam dados observados e avaliados anteriormente, foram marcados nos campos, de forma a visualizar a sua localização geograficamente. Percebe-se que esses locais estão dispostos mais próximos à costa da cidade. O ponto X, também marcado, sinaliza o ponto onde a maior diferença de temperatura em relação ao dia anterior foi observada.

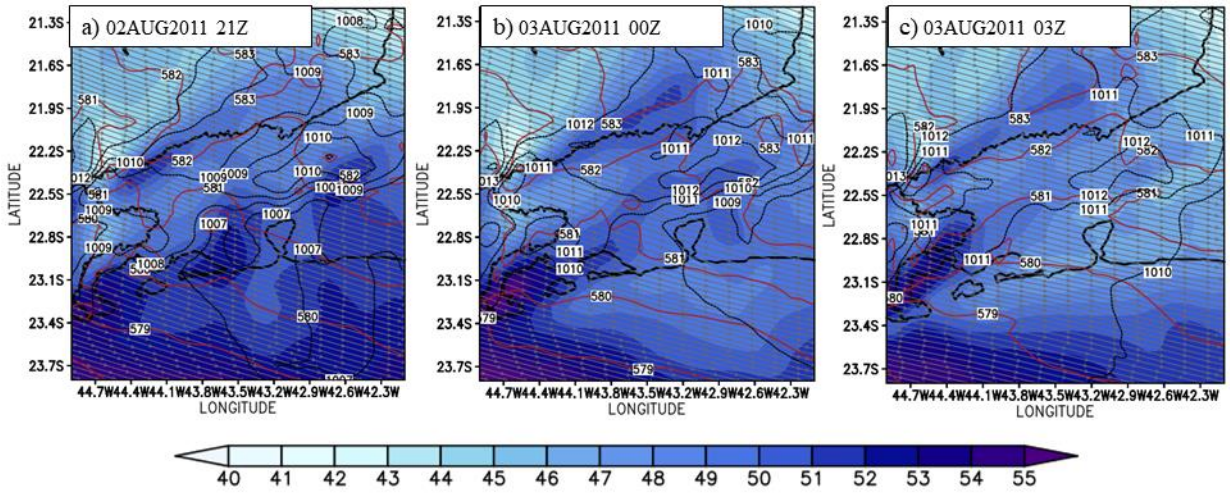


Figura 4.9. Linhas de corrente e magnitude do vento (cores) em 200hPa, altura geopotencial no nível de 500hPa (contorno vermelha) e pressão ao nível médio do mar (contorno branco). a) 21Z do dia 02 de agosto, b) 00Z e c) 03Z do dia 03 de agosto.

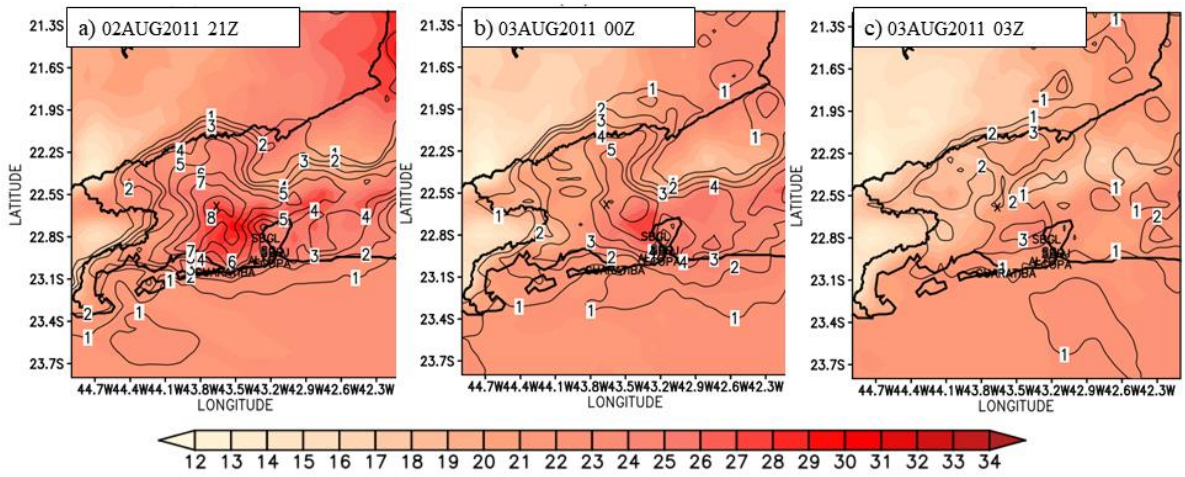


Figura 4.10. Temperatura do ar à 2m em graus Celsius (cores) e a diferença em relação ao dia anterior para o mesmo horário (contorno). a) 21Z do dia 02 de agosto, b) 00Z e c) 03Z do dia 03 de agosto.

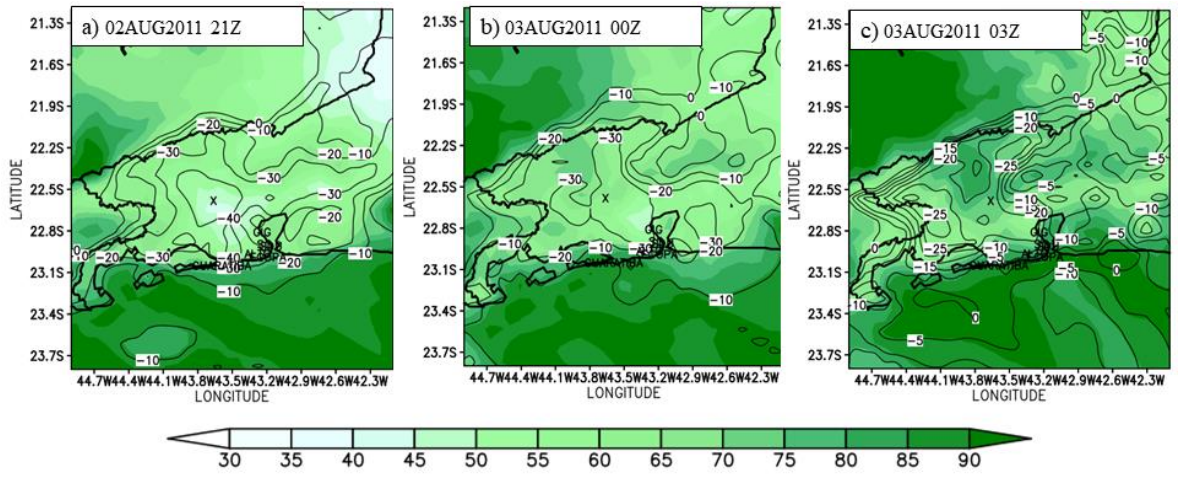


Figura 4.11. Umidade relativa em porcentagem (cores) e a diferença em relação ao dia anterior para o mesmo horário (contorno). a) 21Z do dia 02 de agosto, b) 00Z e c) 03Z do dia 03 de agosto.

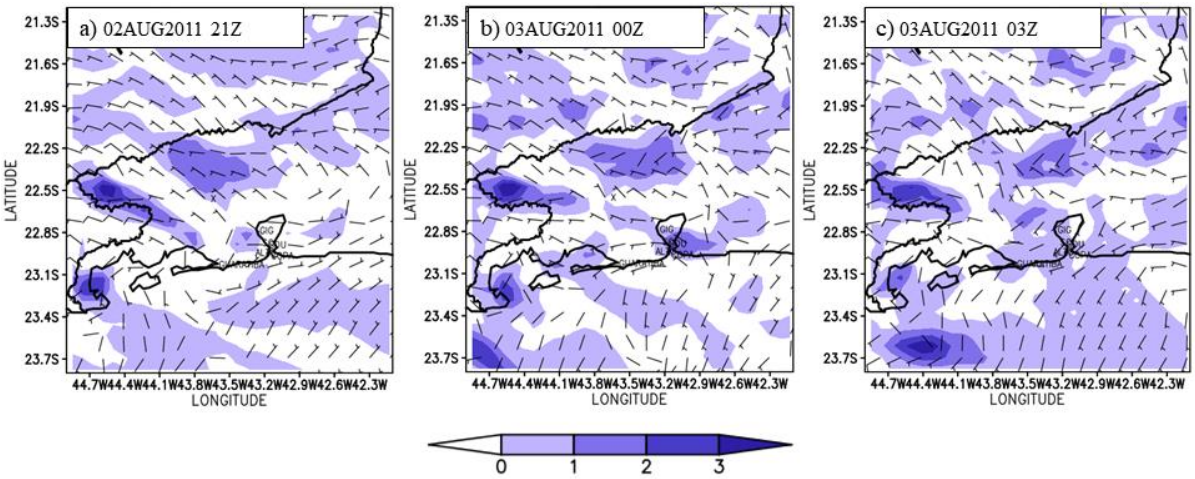


Figura 4.12. Vorticidade relativa em cores 10^{-4} (s^{-1}) e vento a 10m em barbela. a) 21Z do dia 02 de agosto, b) 00Z e c) 03Z do dia 03 de agosto.

As Figuras 4.13 e 4.14 são perfis verticais para o ponto do aeroporto Tom Jobim (lat -22,8° lon -043,2° e para o ponto X (lat -22,6° lon -043,7°), respectivamente, simulados para os horários de 18Z e 21Z do dia 02 e 00Z e 03Z do dia 03 de agosto.

Observa-se que em todos os perfis, há uma camada seca em torno de 300-500hPa. Entretanto, o mais relevante é que, com exceção da de 03Z do dia 03 de agosto, todas apresentam uma camada seca sob uma mais úmida. Esse trecho mais úmido representa uma nuvem em alguns horários como na de 18Z, 21Z e 00Z para o aeroporto Tom Jobim e 21Z e 00Z para o ponto X, visto que as linhas de Td e T se encontram. Destaca-se ainda, que em todas as sondagens, a atmosfera em sua maior parte, encontrava-se condicionalmente estável.

Especificamente, na sondagem do aeroporto Tom Jobim, para os horários de 18 e 21Z do dia 02 de agosto é possível observar a presença de uma inversão térmica próxima a superfície, a qual se intensifica às 21Z. Também é interessante destacar que, às 00Z há um pequeno aquecimento em superfície em torno de 2°C enquanto que às 03Z há um resfriamento em torno de 5°C no mesmo nível.

Nos perfis atmosféricos para o ponto X, é notório a ausência de inversão térmica assim como do aquecimento em superfície.

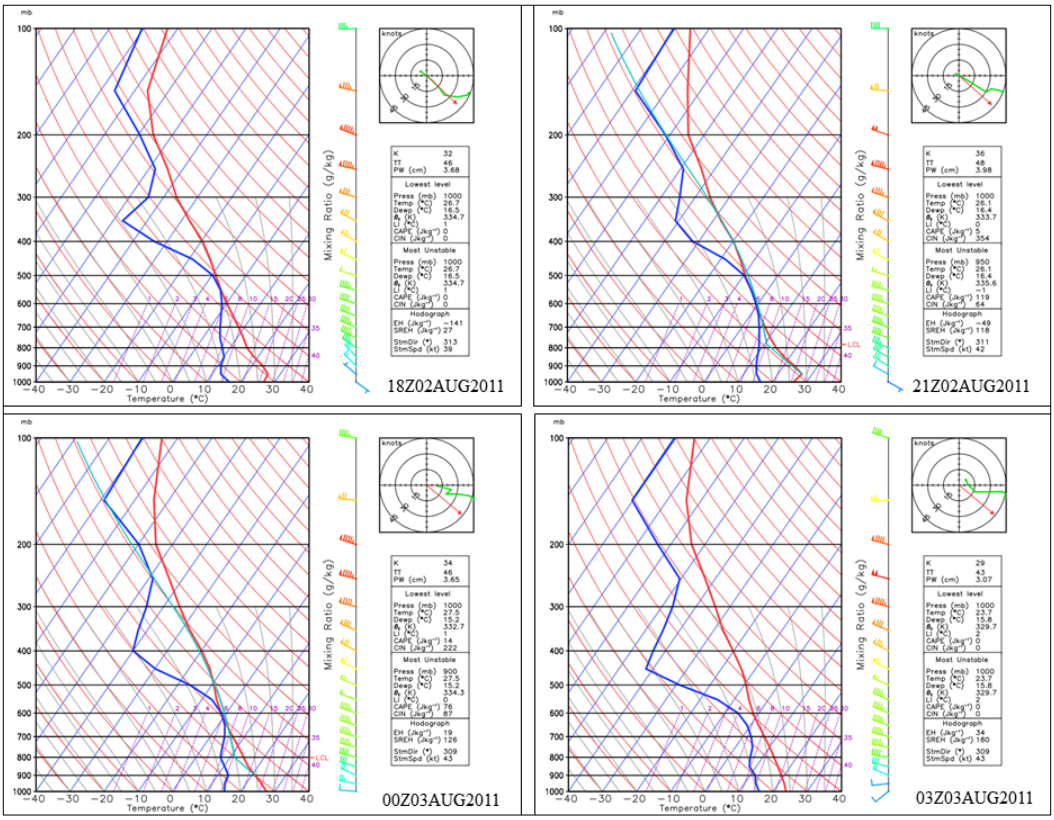


Figura 4.13. Diagrama SKEW T para o aeroporto Tom Jobim (lat -22,8° lon -043,2°) para os horários de 18Z e 21Z do dia 02 de agosto e 00Z e 03Z do dia 03 de agosto.

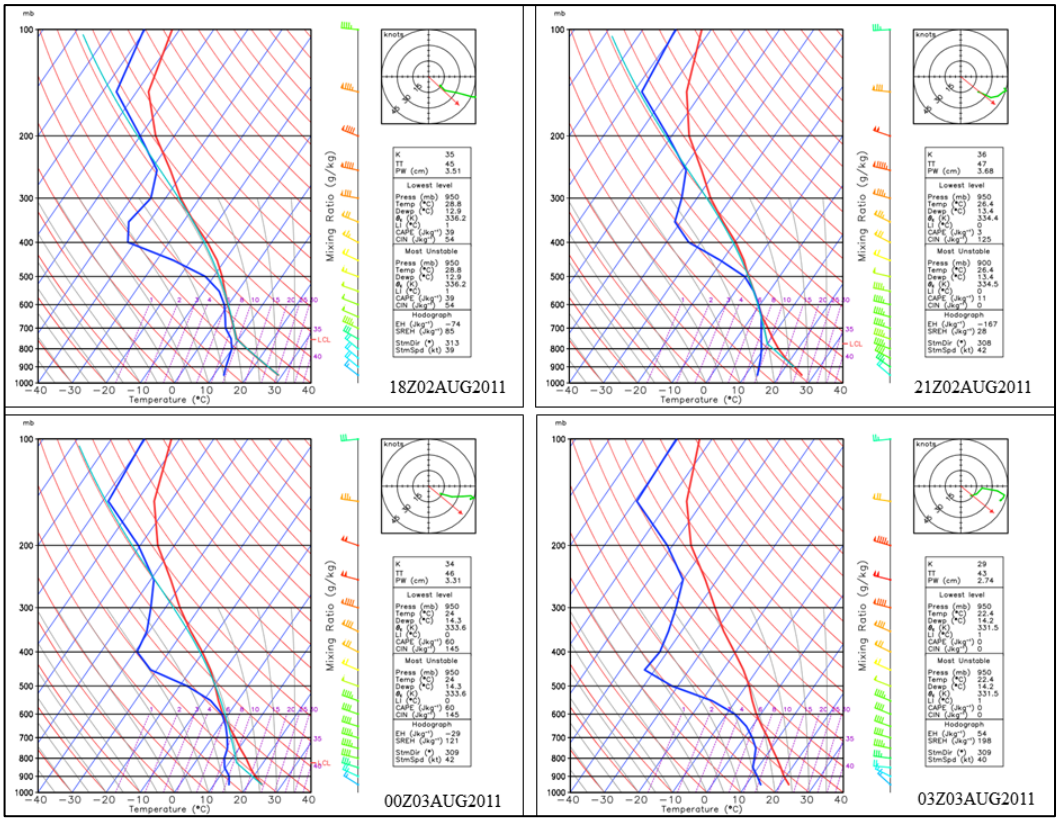


Figura 4.14. Diagrama SKEW T para o ponto X (lat -22,6° lon -043,7°) para os horários de 18Z e 21Z do dia 02 de agosto e 00Z e 03Z do dia 03 de agosto.

Com o objetivo de uma melhor visualização da subsidência do ar, o perfil vertical da temperatura potencial equivalente (Θ_E) se fez necessário. Assim, nas Figuras 4.15a e 4.15b é representado o perfil vertical Θ_E, em Kelvin, e sua evolução temporal entre 18Z do dia 02 de agosto e 12Z do dia 03 de agosto de 2011 para o aeroporto Tom Jobim – SBGL e ponto X, respectivamente. Observa-se a subsidência do ar em baixos níveis, através do aprofundamento das isolinhas de Θ_E em torno de 00Z do dia 03 de agosto, 21h local, para ambos os locais.

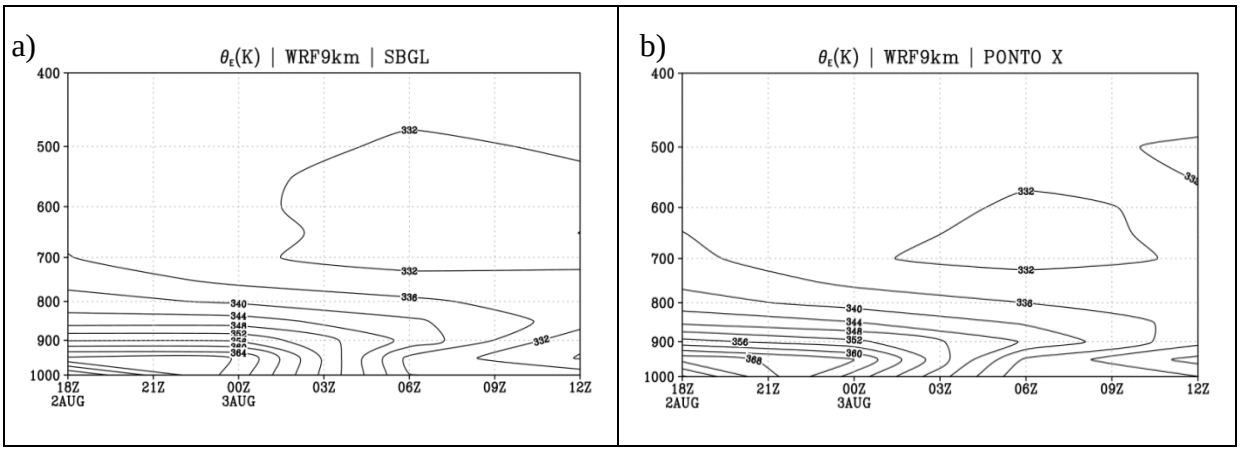


Figura 4.15. Perfil vertical de temperatura potencial equivalente (Θ_E), em Kelvin, e sua evolução temporal, para o a) aeroporto Tom Jobim – SBGL (lat -22,8° lon -043,2°) e b) para o ponto X (lat -22,6° lon -043,7°).

4.3.2 WRF 6km

As Figuras 4.16, 4.17, 4.18 e 4.19 compreendem o período de 18Z do dia 02 de agosto as 06Z do dia 03 de agosto com intervalos de 6 horas.

Na Figura 4.16 são representados os 3 níveis da atmosfera, com linhas de corrente em cinza e magnitude do vento em altos níveis (200hPa) em m/s, linhas de altura geopotencial em níveis médios (500hPa) em decâmetro em linhas vermelhas e superfície com pressão ao nível médio do mar (hPa) em linhas brancas. Observa-se que há a proximidade do jato subtropical (fora da grade), sinalizando a passagem da frente fria fora do estado do Rio de Janeiro. No horário de 18h (Figura 4.16a) nota-se a presença de uma região com ventos mais fortes que o entorno no nível de 200hPa sobre parte do município do Rio de Janeiro indicando gradiente de temperatura em superfície. Observa-se ainda um pequeno gradiente de altura geopotencial com a diminuição da pressão ao nível médio do mar com a evolução temporal.

A Figura 4.17 representa o campo de temperatura do ar a 2m, em graus Celsius, em cores e as linhas de contorno representa a diferença de temperatura em relação ao dia anterior. No horário de 18Z (Figura 4.17a) percebe-se, de maneira geral, que o município encontra-se com temperatura mais elevadas que o entorno e consideravelmente mais elevadas do que o dia anterior, atingindo valores de até 6 °C, principalmente na costa. Essa região se resfria até que se torna uniformemente distribuída.

A Figura 4.18 representa o campo de umidade relativa a 2m em porcentagem (em cores) e as linhas de contorno representam a diferença umidade relativa em relação ao dia anterior. Este campo se comporta de maneira similar ao de temperatura, onde é possível observar uma região com valores menores do que o entorno, assim como em relação ao dia anterior onde a diferença atingiu valores em 40 unidades menores no horário de 00Z (Figura 4.18c).

A Figura 4.19 representa o campo de vorticidade relativa a 10m (10^{-4} s^{-1}) em cores com o vento a 10m em barbela. Valores positivos indicam movimento anticiclônico, ou seja, divergência. Observa-se valores positivos em diversos pontos do município.

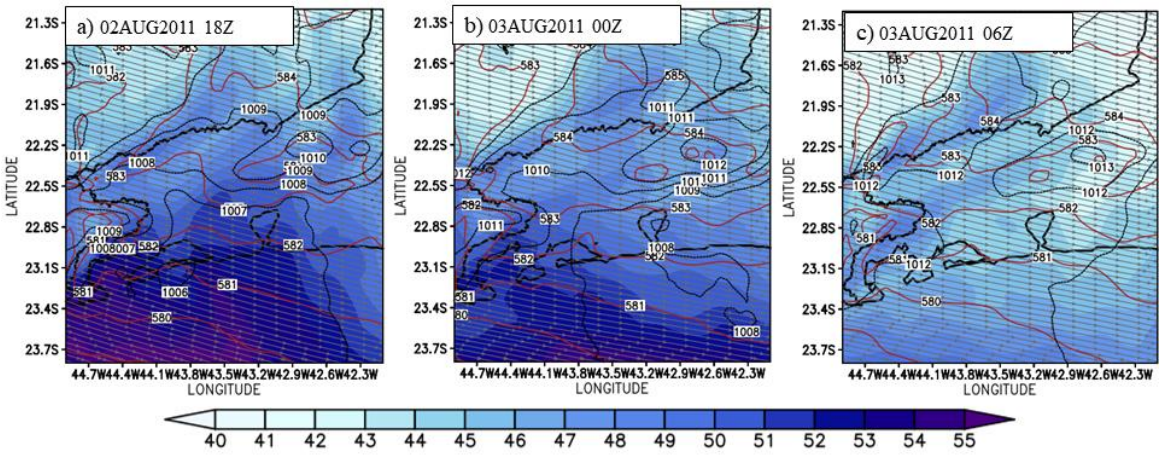


Figura 4.16. Linhas de corrente e magnitude do vento (cores) em 200hPa, altura geopotencial no nível de 500hPa (contorno vermelha) e pressão ao nível médio do mar (contorno branco). a) 18Z do dia 02 de agosto, b) 00Z e c) 06Z do dia 03 de agosto.

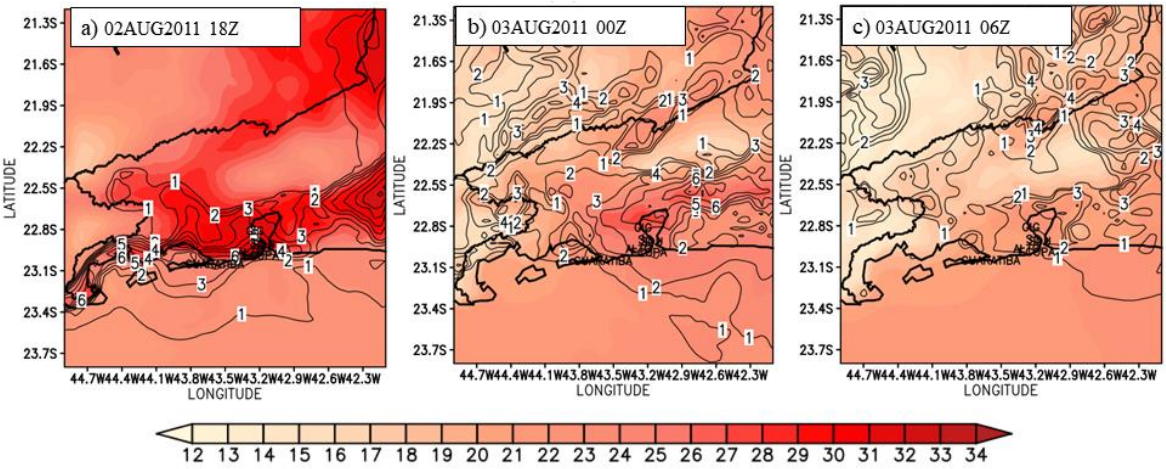


Figura 4.17. Temperatura do ar à 2m em graus Celsius (cores) e a diferença em relação ao dia anterior para o mesmo horário (contorno). a) 18Z do dia 02 de agosto, b) 00Z e c) 06Z do dia 03 de agosto.

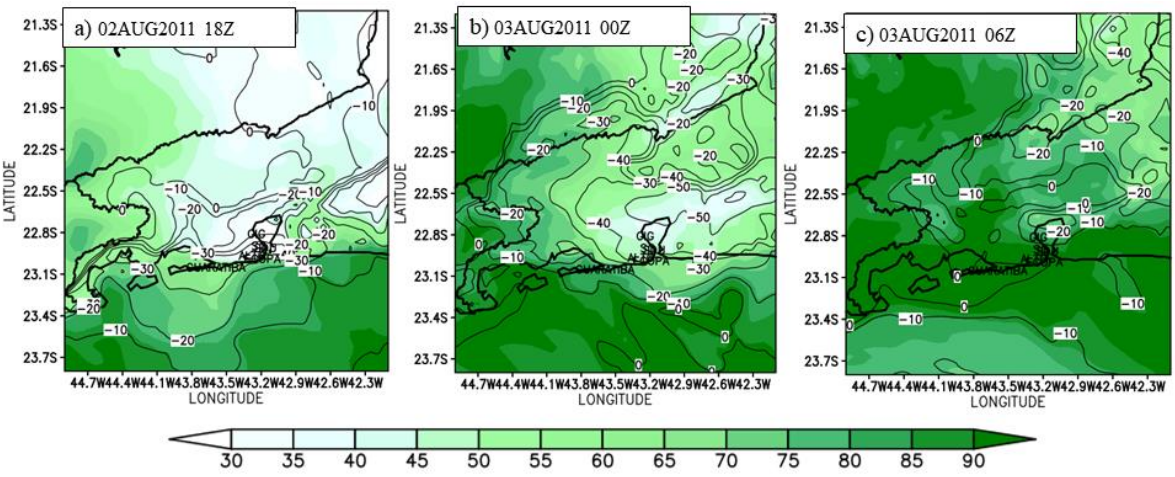


Figura 4.18. Umidade relativa em porcentagem (cores) e a diferença em relação ao dia anterior para o mesmo horário (contorno). a) 18Z do dia 02 de agosto, b) 00Z e c) 06Z do dia 03 de agosto.

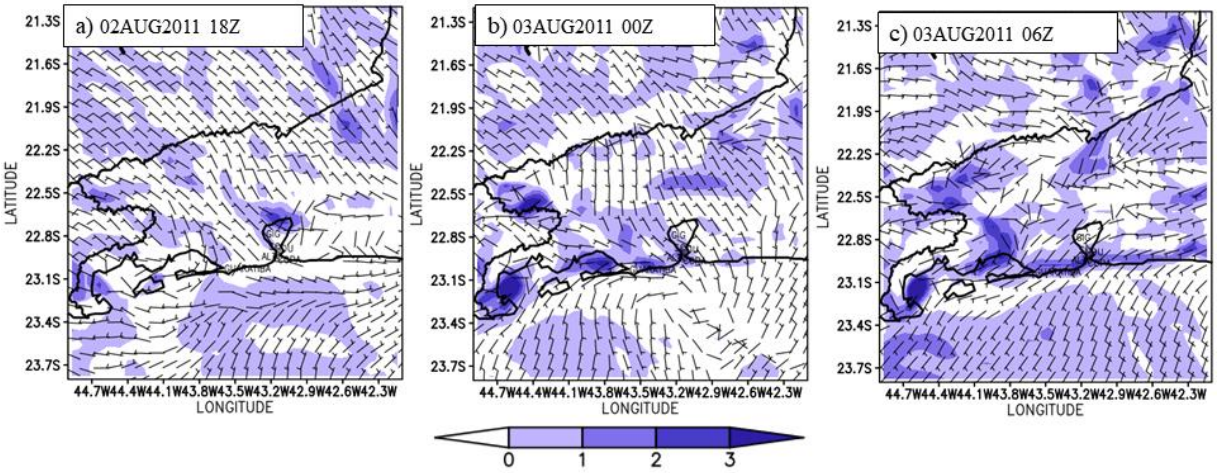


Figura 4.19. Vorticidade relativa em cores 10^{-4} (s^{-1}) e vento a 10m em barbela. a) 18Z do dia 02 de agosto, b) 00Z e c) 06Z do dia 03 de agosto.

A Figura 4.20 apresenta os perfis atmosféricos para os horários de 18Z do dia 02 e 00Z e 06Z do dia 03 de agosto para o aeroporto Tom Jobim. Nos três horários, observa-se uma atmosfera condicionalmente estável e uma camada seca sob uma mais úmida, assim como na simulação anterior. Nota-se que a camada mais úmida vai diminuindo conforme evolução temporal. É interessante ressaltar que há uma camada em torno de 400hPa que seca cada vez mais com o passar das horas. Às 00Z observa-se uma pequena inversão em superfície e no horário seguinte um pronunciado resfriamento assim como um umidificação no mesmo nível.

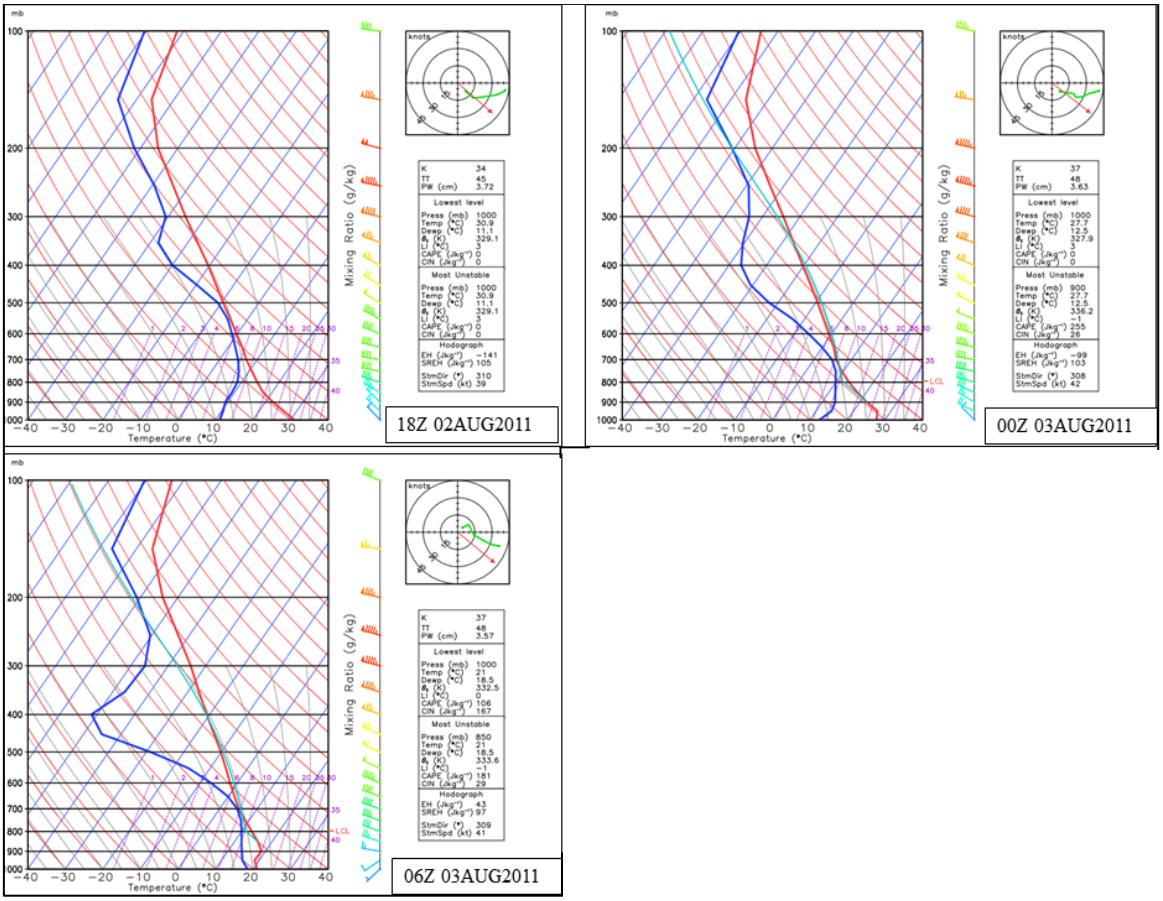


Figura 4.20. Diagrama SKEW T para o aeroporto Tom Jobim (lat -22,8° lon -043,2°) para os horários de 18Z do dia 02 de agosto e 00Z e 06Z do dia 03 de agosto.

Como na simulação anterior, o perfil de Θ_E se fez necessário. Assim, na Figuras 4.21 é representado o perfil vertical Θ_E, em Kelvin para o período compreendido entre 18Z do dia 02 de agosto e 12Z do dia 03 de agosto de 2011 para o aeroporto Tom Jobim – SBGL.

A subsidência do ar em baixos níveis pode ser observada através do aprofundamento das isolinhas de Θ_E em torno de 00Z do dia 03 de agosto, 21h local.

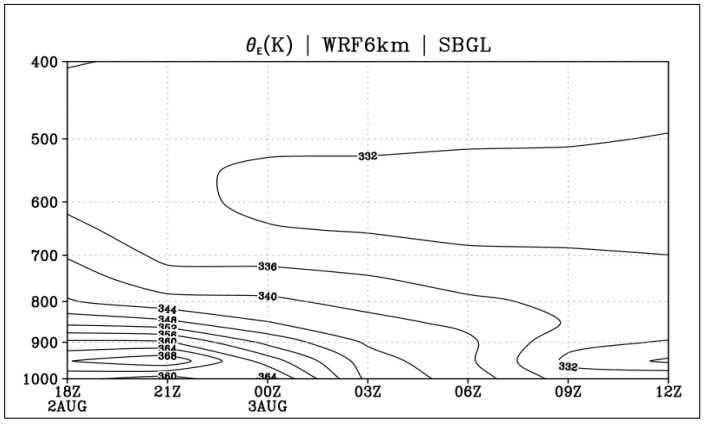


Figura 4.21. Perfil vertical de temperatura potencial equivalente (Θ_E), em Kelvin, e sua evolução temporal, para o aeroporto Tom Jobim – SBGL (lat -22,8° lon -043,2°).

4.4 Frequência de ocorrência de aquecimento noturno

Uma primeira análise foi feita para buscar os padrões de ocorrência dos aquecimentos noturnos (entre 18:15 e 05:45, horário local) com o intervalo de 15 minutos. Como resultado, obteve-se 17.769 eventos onde a temperatura aumentou com diminuição da umidade relativa, no mesmo momento. O aquecimento variou entre 0,1 e 4,2 °C, valor significativo para intervalo de 15 minutos. Cerca de 94% dos eventos ocorreram quando o aquecimento foi de até 0,5 °C, e cerca de 6% ocorreram quando o aquecimento foi maior que 0,5 °C. Desta forma, os resultados foram separados em dois grupos: Q94% que agrupam os eventos de 0,1 a 0,5 °C com 16.635 eventos e, o Q06% os maiores que 0,5 °C com 1.134 casos.

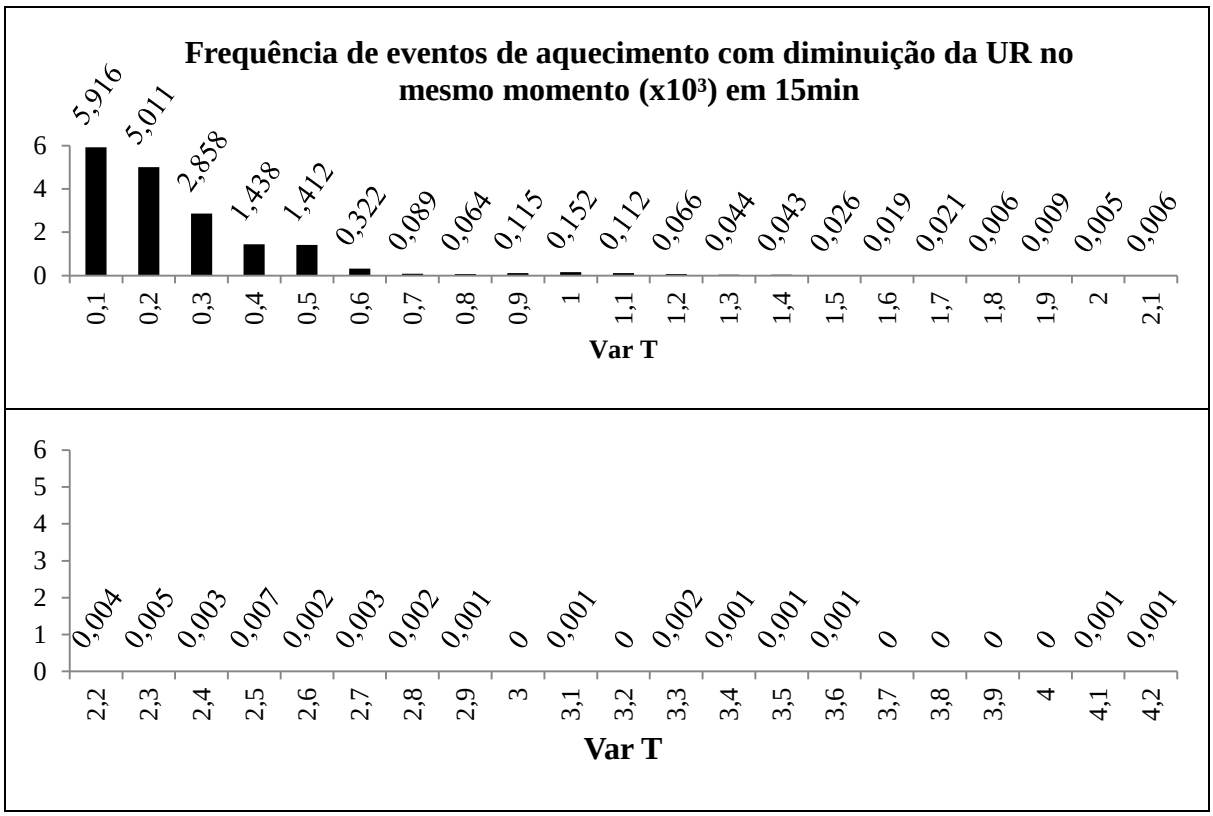


Figura 4.22. Frequência de aquecimentos com diminuição da umidade relativa durante a noite.

4.4.1 Primeiro grupo Q94%

A Figura 4.23 apresenta a frequência de aquecimentos de 0,1 °C a 0,5 °C mensalmente durante o período de estudo (15 anos). Por tratar-se de 94% de toda a amostra, é esperado que os resultados sejam coerentes com o comportamento médio da atmosfera. Portanto, neste grupo, estão incluídos os aquecimentos pré frontais ocorridos à noite. Pode-se observar que os eventos de aquecimento durante o ano não apresentam grandes variações, porém é possível observar, sutilmente, meses de máxima e mínima ocorrência.

A Figura 4.23f representa a frequência de ocorrência média para cada mês, nela é possível observar que nos meses de janeiro e outubro há uma máxima e em fevereiro uma mínima ocorrência.

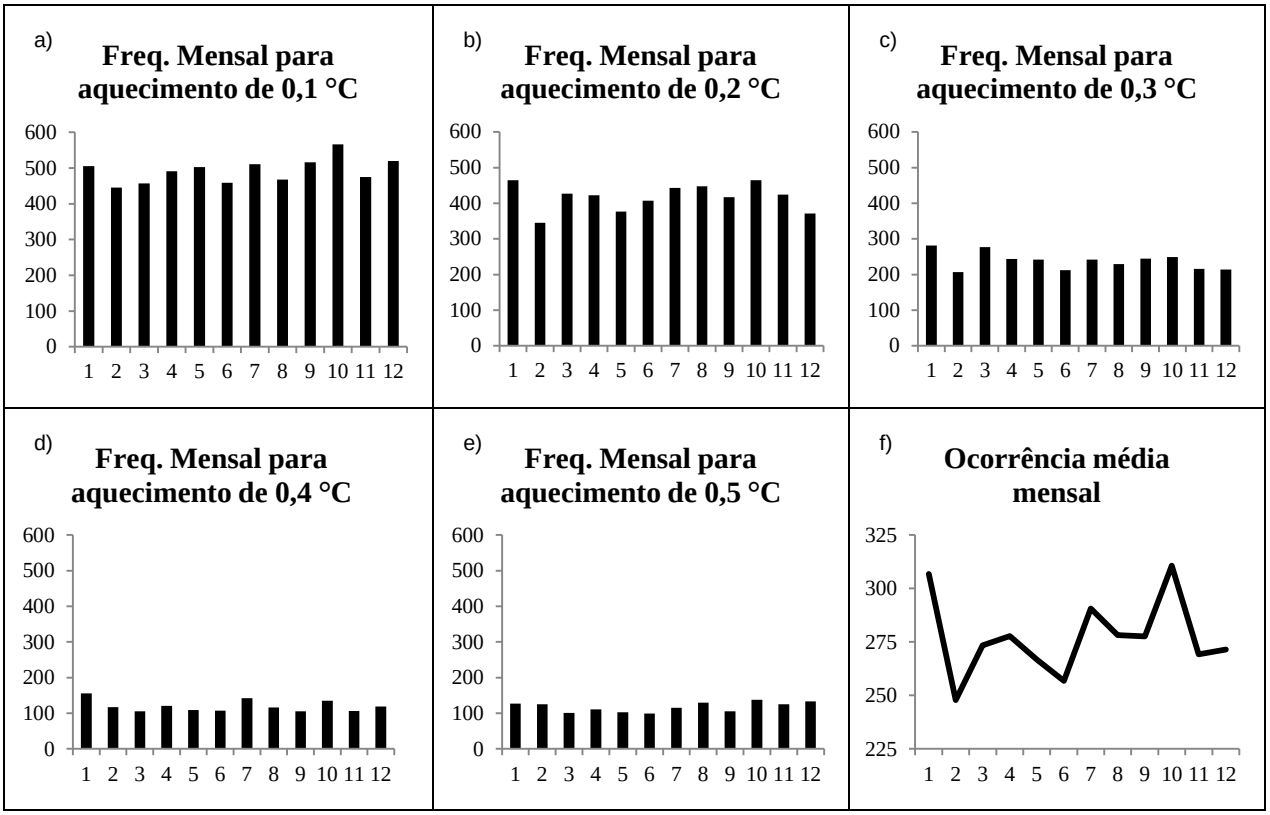


Figura 4.23. Frequência mensal para aquecimento de a) 0,1 °C, b) 0,2 °C, c) 0,3 °C, d) 0,4 °C e e) 0,5 °C. f) Média mensal.

O máximo de eventos de aquecimentos ocorreram no mês de janeiro para as variações de temperatura de 0,2 a 0,4 °C e no mês de outubro para 0,1 e 0,5 °C. Já o mínimo de eventos de aquecimentos ocorreram no mês de fevereiro para as variações de temperatura de 0,1 a 0,3 °C, março e setembro para 0,4 °C e junho para 0,5 °C. Ressalta-se novamente que valores tão baixos de aquecimento podem ser desprezíveis em escala diária, mas são relevantes para intervalos de 15 minutos (Tabela 4.1).

Tabela 4.1. Grupo Q94%.

Var T (°C)	**Nº de casos**	**%**
0,1	5.916	35,6
0,2	5.011	30,1
0,3	2.858	17,2
0,4	1.438	8,6
0,5	1.412	8,5
Total	16.635	100

Com relação à distribuição horária, pode-se observar que nesse grupo, todas as taxas de aquecimento se comportam de maneira similar onde a maior frequência de eventos de aquecimento ocorreram entre 19h e 22h e diminuíram ao passar das horas. É interessante observar que, conforme a taxa de aquecimento aumenta, o horário das 19h se destaca como o de maior ocorrência e o de 03h como o de menor ocorrência. Na Figura 4.24f é apresentada a média horária de ocorrência considerando todos os aquecimentos e, como esperado, se comporta como descrito anteriormente.

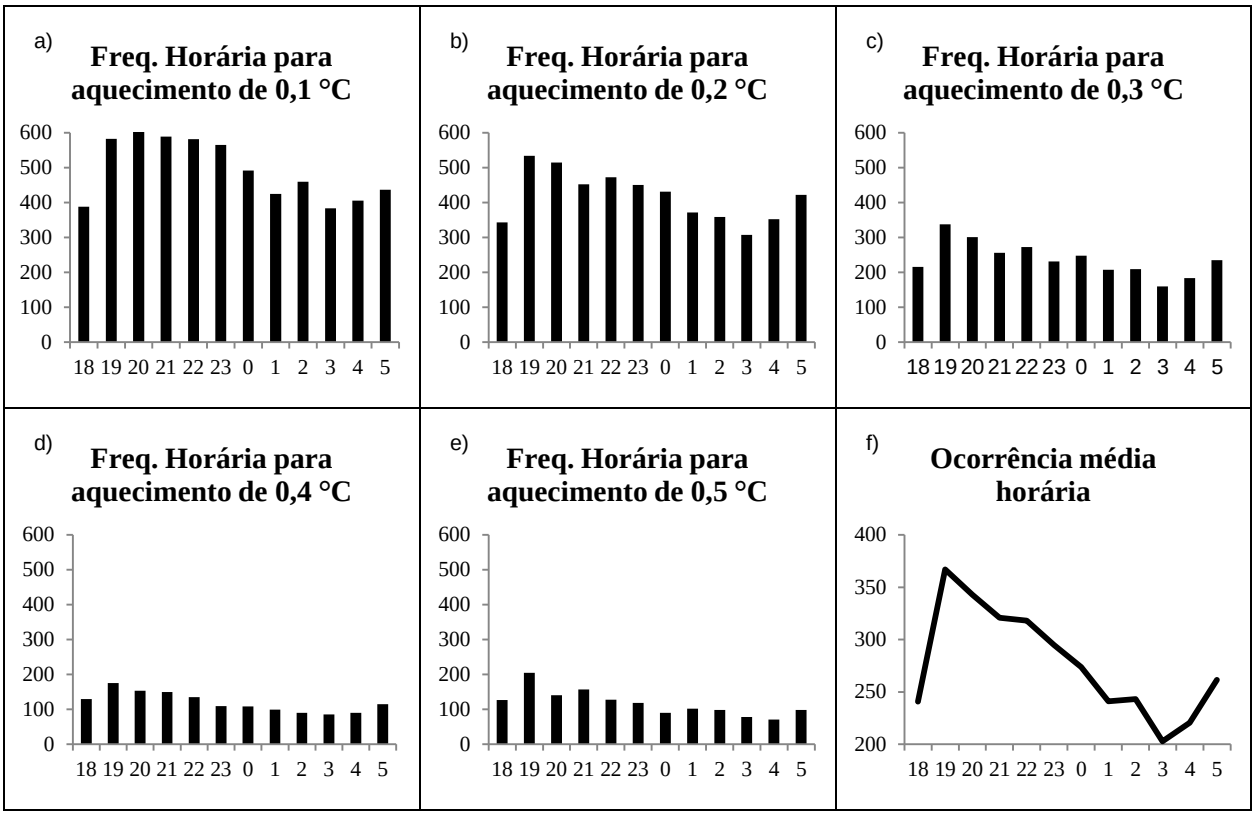


Figura 4.24. Frequência horária para aquecimento de a) 0,1 °C, b) 0,2 °C, c) 0,3 °C, d) 0,4 °C e e) 0,5 °C. f) Média horária.

4.4.2 Segundo grupo Q06%

Em primeiro lugar, ressalta-se que o eixo vertical dos gráficos a seguir não puderam ser apresentados em escala iguais, tendo em vista que cada grupo difere significativamente entre si em relação à quantidade de eventos. Este grupo representa 6% dos aquecimentos noturnos e, portanto, são esperados os eventos de rara ocorrência. Sendo assim, possivelmente há eventos de *Heat Burst*.

Tabela 4.2. Classes utilizadas no grupo Q06%

Classe i	**Intervalo**	**Nº de eventos**	**%**
1	[0.6, 1.2)	854	75,3
2	[1.2, 1.8)	219	19,3
3	[1.8, 2.4)	35	3,1
4	[2.4, 3.0)	18	1,6
5	[3.0, 3.6)	5	0,4
6	[3.6, 4.2]	3	0,3
Total	-	1.134	100

O comportamento dos aquecimentos referentes às Figuras 4.25a e 4.25b são similares, onde o máximo de ocorrência se deu nos meses do verão (dezembro a março) e o mínimo nos meses de junho (6) e agosto (8), respectivamente.

Na Figura 4.25c, onde estão os eventos de aquecimento de 1,8 a 2,4 °C, observa-se o máximo de episódios no mês de dezembro (12) registrando 8 eventos e, o mínimo em junho (6) com 1 evento. Apesar disso, os meses de fevereiro a abril também se destacam.

Os aquecimentos de 2,4 °C a 3,0 °C estão apresentados na Figura 4.25d e, o mês de julho (7) e março (3) se destacam como os de maior ocorrência com 5 e 3 eventos de aquecimento, respectivamente. Seguidos pelos meses de janeiro (1), fevereiro (2) e dezembro (12) com 2 episódios cada e os meses de maio (5), junho (6), setembro (9) e novembro (11) com 1 episódio cada. Os outros meses não apresentaram eventos de aquecimento nessa escala.

A Figura 4.25e apresenta o número de aquecimento no intervalo de 3,0 °C a 3,6 °C e observa-se a ocorrência de apenas 5 casos de aquecimento. 2 eventos em cada mês de julho (7) e dezembro (12) e 1 evento no mês de janeiro (1). Os outros meses não apresentaram eventos de aquecimento nessa escala.

A Figura 4.25f apresenta a frequência de aquecimentos no intervalo de 3,6 °C e 4,2 °C. Nesse intervalo houveram apenas 3 eventos de aquecimento: 2 eventos em abril (4) e 1 evento em julho (7).

Em média, durante o verão (inverno) há uma maior (menor) frequência de eventos de aquecimento noturno. Pode-se destacar o mês de fevereiro como o de maior e o de junho como o de menor ocorrência.

A Tabela 4.2 apresenta as classes utilizadas com suas respectivas amostragens, mostrando que a grande maioria dos eventos estão concentrados entre os aquecimentos de 0,6°C e 1,2°C, diminuindo gradativamente nas classes seguintes.

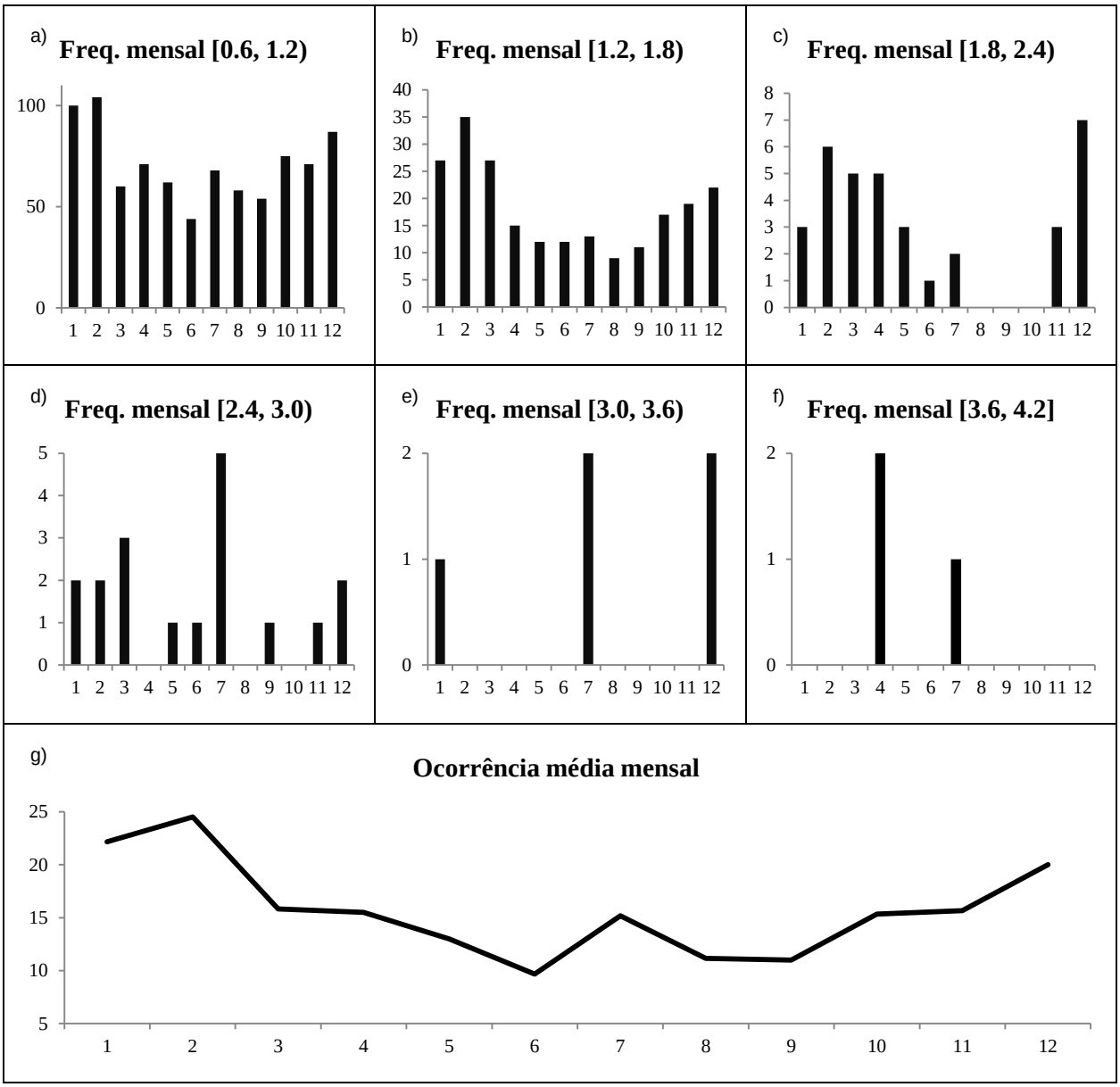


Figura 4.25. Distribuição mensal para os aquecimentos de: a) 0,6 a 1,2 °C, b) 1,2 a 1,8 °C, c) 1,8 a 2,4 °C, d) 2,4 a 3,0 °C, e) 3,0 a 3,6 °C, f) 3,6 a 4,2 °C e g) média mensal.

Na Figura 4.26 é apresentada a distribuição horária dos eventos de aquecimento. De maneira geral, os eventos de aquecimento ocorreram durante toda a noite porém o máximo se dá no início da noite e diminuem com o passar das horas. A Figura 4.26f, que é a classe com menor ocorrência, se diferencia nesse aspecto.

Isso pode ser observado, principalmente, nas Figuras 4.26a, que apresenta os aquecimentos de 1,8 °C a 2,4 °C, e 4.24b, que apresentam os aquecimentos de 2,4 °C a 3,0 °C, onde o máximo de eventos ocorrem quase que no mesmo período. Na Figura 4.26a se destaca o período de 18h às 20h e na Figura 4.26b, o de 18h às 19h. O período de menor ocorrência são distintos, na Figura 4.26a se da às 03h e, na Figura 4.26b no período de 03h às 04h.

A Figura 4.26c apresenta os aquecimentos de 1,8 °C a 2,4 °C, destacando o período de 18h às 20h totalizando 21 eventos de aquecimento. O período de 03h às 04h não registrou eventos de aquecimento nessa classe.

A Figura 4.26d apresenta o aquecimento de 2,4 °C a 3,0 °C destacando os horários de 19h e 23h com 4 eventos de aquecimento cada. Entre 01h e 02h não houve registro de aquecimento nessa classe.

Nas Figuras 4.26e, que representa o aquecimentos de 3,0 °C a 3,6 °C, e 4.26f, que representa os aquecimentos de 3,6 °C a 4,2 °C, destacam-se a baixa e isolada ocorrência dos eventos. Na Figura 4.26e, ocorreu uma vez às 18h, 19h, 21h, 22h e 00h totalizando 5 eventos. Na Figura 4.26f, os eventos ocorreram às 22h, 02h e 03h totalizando 3 eventos.

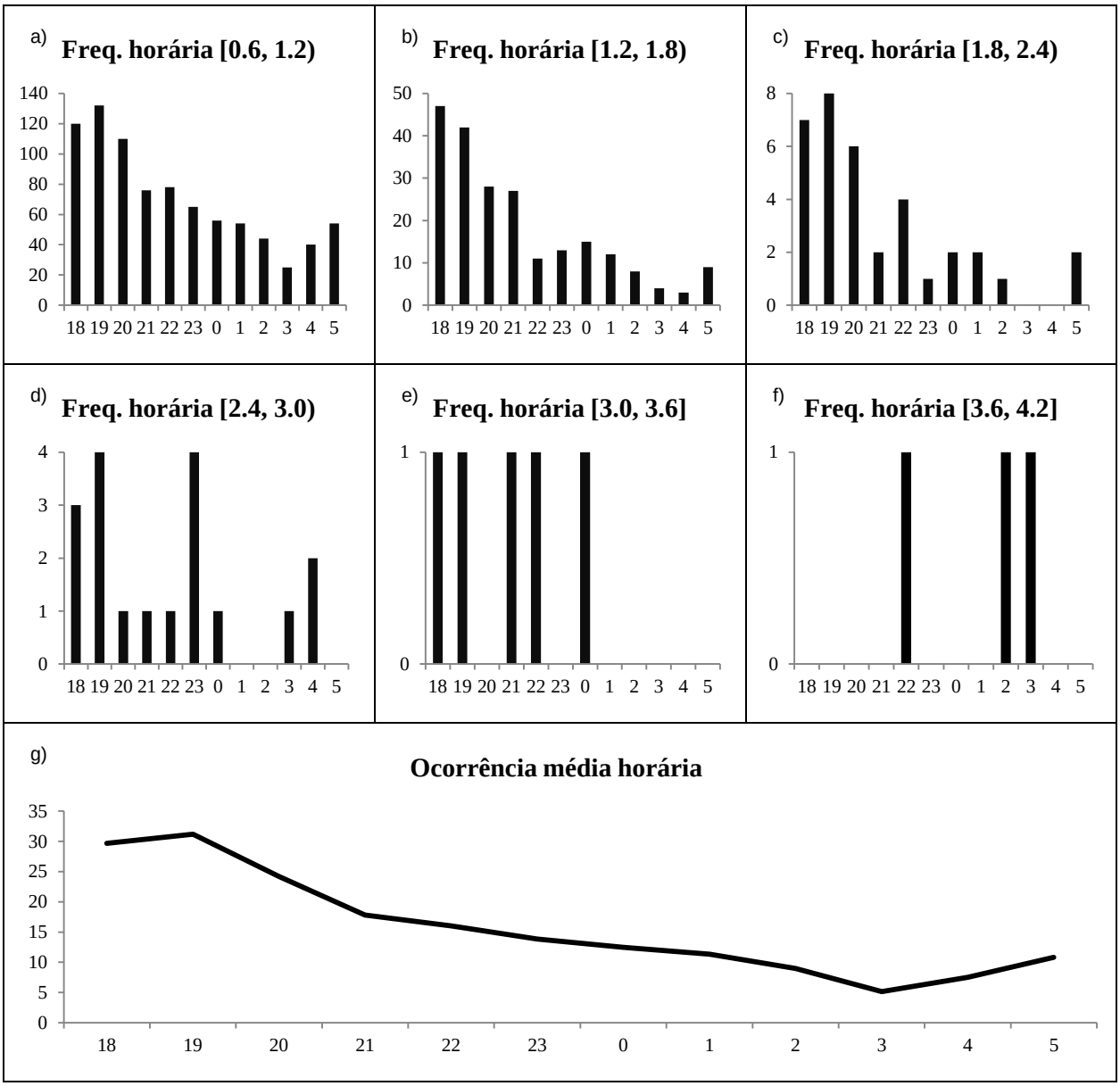


Figura 4.26. Distribuição horária para os aquecimentos de: a) 0,6 a 1,2 °C, b) 1,2 a 1,8 °C, c) 1,8 a 2,4 °C, d) 2,4 a 3,0 °C, e) 3,0 a 3,6 °C, f) 3,6 a 4,2 °C e g) média horária.

5. CONCLUSÃO

Através dos dados observacionais em superfície, observou-se que a temperatura do ar e a umidade variaram bruscamente durante o período da noite, tendo sido registrado a maior temperatura às 21h, com aquecimento anômalo de até 8 °C em aproximadamente 4 horas. Essas características confirmam que o fenômeno *Heat Burst* aconteceu neste dia sobre a cidade do Rio de Janeiro.

Observou-se ainda que a cobertura de nuvens variou bastante antes do aquecimento. Porém, após o início, o céu ficou quase que repentinamente, sem nuvens. Este fato pôde ser observado nos aeroportos e nas imagens de satélite. Isso também reforça o fato da nuvem ter se dissipado através da evaporação, resfriando uma parcela ao redor e o processo de subsidência ter se iniciado.

A ausência de chuva também é uma característica do fenômeno, e a partir das imagens de radar foi observado que não havia no momento núcleos convectivos. Além disso nenhuma estação meteorológica utilizada neste estudo, registrou chuva.

A subsidência pôde ser observada a partir da análise da sondagem do aeroporto Tom Jobim às 21h local, onde pôde-se concluir que existia uma parcela em subsidência, no primeiro momento pela adiabática saturada e então pela seca, contraindo e aquecendo adiabaticamente. Concordando com os estudos de McPherson *et al.,* (2011), que afirma que o *Heat Burst* acontece devido a uma parcela em subsidência adiabática. Esse perfil também é semelhante ao estudado por Johnson (1983). A subsidência também pode ser observada a partir dos perfis verticais de temperatura potencial equivalente, onde o aprofundamento das isolinhas de Θ_E em níveis baixos indica esse movimento, assim como o secamento da parcela.

As simulações numéricas contribuíram no sentido de avaliar a extensão espacial do fenômeno, assim como permitir uma análise com maior escala temporal dos perfis atmosféricos. É possível afirmar que esses perfis possuem semelhanças com aqueles estudados por Johnson (1983) assim como o de Wakimoto (1985), podendo indicar que o *Heat Burst* ocorre como consequência de um *microburst* seco.

Com a finalidade de verificar as outras possíveis ocorrências pretéritas e ampliar as análises, foi feita uma estatística de eventos de *Heat Burst* entre os anos de 2002 a 2016, avaliando eventos de aquecimento associados a diminuição da umidade relativa e de variações abruptas em outras variáveis meteorológicas.

Era esperado que a quantidade de eventos fosse máxima (mínima) quando menor (maior) a taxa de aquecimento. Isso pôde ser confirmado neste trabalho.

O grupo Q94% corresponderam aos aquecimentos de 0,1 a 0,5 °C em cada 15 minutos, que representam 94% de toda amostra. Assim, ele pode representar os eventos de aquecimentos “normais” na atmosfera. Nesse grupo, não houve grandes variações na ocorrência de aquecimentos durante o ano. Esse resultado pode estar relacionado aos aquecimentos pré frontais, visto que a passagem de sistemas frontais não varia tanto na região Sudeste do Brasil.

Ainda no grupo Q94%, em relação a frequência horária, pode-se observar que, em média, a maioria dos eventos de aquecimento se deram no início da noite e diminuíram com o passar das horas, seguindo o esperado para os ciclos diurnos.

O grupo Q06% corresponde aos eventos de aquecimentos de 0,6 a 4,2 °C que podem ser considerados como o grupo de aquecimento anômalo, visto que aconteceram em 6% dos casos. Como visto nos resultados, durante o verão há uma maior ocorrência de eventos de aquecimento, o que está de acordo com o resultado encontrado por McPherson *et al*., 2011. Ainda assim, podemos observar que esses eventos ocorrem durante todo o ano e os maiores aquecimentos ocorreram, principalmente, no mês de julho.

Em relação a frequência horária, observou-se o mesmo comportamento do grupo Q94%. A maior frequência de aquecimentos se dá no início da noite e diminuiu com o passar das horas. Podendo destacar o período de 18 às 19h (21 a 22 Z) como o de maior ocorrência sugere-se que esteja associado às dissipações de tempestades. Este resultado difere do encontrado por McPherson *et al*., 2011, entretanto os locais de estudo são distintos e apresentam características distintas. Ainda assim, cabe ressaltar que, os eventos ocorreram durante toda a noite.

No ambiente operacional, é importante observar a estrutura vertical da atmosfera, onde camadas secas devem ser observadas em conjunto com mecanismos que forcem a convecção como, por exemplo, a aproximação de uma frente fria. Cabe ressaltar que o tipo de nuvem que permitiria o desenvolvimento de um *Heat Burst* são aquelas com pouco desenvolvimento vertical, como stratus ou altocumulus. É importante destacar ainda que, para identificar eventos de *Heat Bursts* adequadamente, é necessário uma rede de estações com boa densidade e com saídas menores que 15 minutos, de acordo com as conclusões de McPherson *et a.*, 2011.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros o estudo de outros eventos de HB com simulações numéricas com diferentes parametrizações, com altas resoluções temporais e espaciais que permitam o estudo mais detalhado do fenômeno.

Espera-se ainda a realização do estudo em microescala de forma a compreender o seu comportamento no interior da Camada Limite Estável.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, KELEN MARTINS. **Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul**. 2005. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

DAMETTO, G. S. e ROCHA, R. P. Características climáticas dos sistemas frontais na cidade de São Paulo. São Paulo – Universidade de São Paulo - IAG, 2005.

DUDHIA, J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model, **J. Atmos. Sci**., 46, 3077–3107. 1989.

FUJITA T.T. Spearhead echo downburst near the approach end of a John F. Kennedy Airport Runway, Newt York City. Satellite & Mesometeorology Research Project. Department of the Geophysical Sciences – The University of Chicago, 1976.

FUJITA T.T. The Downburst, microburst and macroburst. The University of Chicago, 1985.

JOHNSON B. C. 1983. The heat burst of 29 May 1976. **Monthly Weather Review** 111: 1776–1792.

MCPHERSON R.A., LANE J. D., CRAWFORD K. C., MCPHERSON JR W. G. A climatological analysis of heatbursts in Oklahoma (1994–2009). **International Journal of Climatology**, Oklakoma-USA, Wiley Online Library, v. 31, 531-534, 2011.

MLAWER, E. J., S. J. TAUBMAN, P. D. BROWN, M. J. IACONO, and S. A. CLOUGH. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k for the longwave. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, p. 16663-16682, 1997.

SILVA, W. S.; DERECZYNSKI, C. P. Caracterização climatológica e tendências observadas em extremos climáticos no estado do Rio de Janeiro. Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ, Rio de Janeiro, v. 37 - 2/2014, p. 123-138, 2014.

SULL, R. B. An introduction to boundary layer meteorology. Madison – USA: Kluwer Academic Publishers, 1950.

WAKIMOTO R. M. 1985. Forecasting dry microburst activity over High Plains. American Meteorological Society. **Monthly Weather Review** 13: 1131-1143.