



COPPE/UFRJ

ESTUDO DE ILHA DE CALOR NA REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE
JANEIRO: ASPECTOS DAS CIRCULAÇÕES LOCAIS COM UTILIZAÇÃO DO
MODELO ATMOSFÉRICO BRAMS

Fernanda Batista Silva

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-graduação em Engenharia
Mecânica, COPPE, da Universidade
Federal do Rio de Janeiro, como parte dos
requisitos necessários à obtenção do título
de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Gustavo César Rachid Bodstein

Rio de Janeiro

Setembro de 2010

ESTUDO DE ILHA DE CALOR NA REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE
JANEIRO: ASPECTOS DAS CIRCULAÇÕES LOCAIS COM UTILIZAÇÃO DO
MODELO ATMOSFÉRICO BRAMS

Fernanda Batista Silva

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA MECÂNICA

Examinada por:

Prof. Gustavo César Rachid Bodstein, Ph.D.

Prof. Edilson Marton, D.Sc.

Prof. Edmilson Dias de Freitas, D.Sc.

Prof. Luiz Cláudio Gomes Pimentel, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
SETEMBRO DE 2010

Silva, Fernanda Batista

Estudo de Ilha de Calor na Região Metropolitana do Rio de Janeiro: Aspectos das Circulações Locais com Utilização do Modelo Atmosférico BRAMS / Fernanda Batista Silva. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XVI, 119 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Gustavo César Rachid Bodstein

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Mecânica, 2010.

Referências Bibliográficas: p. 93-99.

1. Modelo de Mesoescala. 2. Ilha de Calor Urbana.
3. Rio de Janeiro. I. Bodstein, Gustavo César Rachid
II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE,
Programa de Engenharia Mecânica. III. Título.

“Quem vence sem risco, triunfa sem GLÓRIA.”

Augusto Cury

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por ter me abençoado, me dado força e saúde para chegar ao final deste trabalho. Agradeço a intercessão de Nossa Senhora...

A minha mãe Julia, ao meu pai Ivan, a minha irmã Fabiana e ao meu afilhado Miguel, por terem acreditado em mim e por todo o incentivo e apoio que me deram para concluir este trabalho...

A meu amigo, companheiro e namorado Felipe Marques que nos momentos de maiores dúvidas, angústias e sonhos estava presente ao meu lado me apoiando...

Ao meu orientador Edilson Marton e Gustavo Bondstein por toda a paciência e atenção dispensada...

Ao meu amigo tonto Alessandro pelas palavras incentivadoras para terminar o mestrado. A Inês, a Flor e a Vera pelas risadas...

Ao Demerval, que sempre me ajudava quando tinha dúvidas emergências do BRAMS, e que sempre me esclareceu sem hesitá-la...

Os meus anjos da guarda Flávia e Raquel que estavam na cantina da Graça quando tudo estava por um fio. Aos meus amigos eternos Roseane, Isabel, Amaury, Marcos e Daniela Gomes que sempre me apoiaram...

A todos os meus amigos do Centro de Hidrografia da Marinha... Silvia, Renata, Daniel, Shirley, Josela, Raquel Fonseca, Fernanda, Amanda, Elisangela, Aline, Antunes, Jucá e muitos outros. Aos meus ex-estagiários e grandes amigos Fabio e Tatyane...

Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Instituto Estadual do Ambiente (INEA) e Departamento de Controle do Espaço Aéreo do Comando da Aeronáutica (DECEA) pelo fornecimento dos dados das estações automáticas e convencionais.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro fornecido inicialmente a este trabalho.

E a todos que me ajudaram de forma direta e indireta...

Muito Obrigada a todos!

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

ESTUDO DE ILHA DE CALOR NA REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO: ASPECTOS DAS CIRCULAÇÕES LOCAIS COM UTILIZAÇÃO DO MODELO ATMOSFÉRICO BRAMS

Fernanda Batista Silva

Setembro/2010

Orientador: Gustavo César Rachid Bodstein

Programa: Engenharia Mecânica

Neste estudo é feita uma investigação sobre as relações existentes entre as circulações locais e a formação da Ilha de Calor Urbana (ICU) na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ). Destaca-se a importância da urbanização e dos principais mecanismos físicos responsáveis pelo processo de formação, modulação e desintensificação da ICU. Para a realização deste trabalho foram analisadas simulações numéricas com o modelo atmosférico BRAMS acoplado ao esquema TEB (Town Energy Budget). Diferentes análises de modelos atmosféricos (ETA, Global-CPTEC e Reanálise) foram usadas como condição inicial e de contorno. Após avaliação estatística optou-se pela utilização das análises do ETA. A fim de se verificar a sensibilidade do esquema TEB, foram feitas simulações com diferentes perfis de umidade do solo e diferentes opções deste esquema. A importância da utilização do esquema TEB ficou evidente na avaliação da ICU na RMRJ nos campos horizontais e verticais de temperatura e vento. Ressalta-se que os resultados deste esquema mostram temperaturas máximas mais elevadas e similares às observações. As temperaturas mínimas também ficam mais elevadas, diferenciando das observações. Na análise do campo horizontal de temperatura e vento é evidente na simulação com o esquema TEB, núcleos de temperaturas mais elevadas na área urbana e conseqüentemente uma ICU bem definida na RMRJ. Para a análise vertical foi verificado movimentos ascendente organizados em decorrência da ICU.

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

STUDY OF URBAN HEAT ISLAND IN RIO DE JANEIRO METROPOLITAN
REGION: ASPECTS OF LOCAL CIRCULATIONS USING THE ATMOSPHERIC
MODEL BRAMS

Fernanda Batista Silva

September /2010

Advisor: Gustavo Cesar Rachid Bodstein

Department: Mechanics Engineering

In this study, the relationship between local circulations and Urban Heat Island (UHI) formation in the Rio de Janeiro Metropolitan Region (RJMR) is investigated. Urbanization and the main physical mechanisms responsible for the formation, modulation and dissipation of the UHI are highlighted. This work were performed numerical simulations using the BRAMS atmospheric model coupled with the TEB (Town Energy Budget). Different atmospheric analyses (ETA, Global-CPTEC and Reanalysis) were used as initial and boundary conditions. After statistical evaluation, the ETA analysis was chosen. The TEB scheme sensitivity was investigated through numerical simulations using different soil humidity profiles and scheme options. The importance of using the TEB scheme was evident in the evaluation of the UHI in the RJMR considering horizontal and vertical temperature and wind fields. It is highlighted that the TEB scheme results show higher maximum temperatures, in agreement with observations. On the other hand, the minimum temperatures were also higher, different from observations. In the analysis of the horizontal temperature and wind fields of the simulation with the TEB scheme, higher temperatures in the urban areas, and consequently a well-defined UHI in the RJMR, were observed. In the vertical analysis, organized ascending motions due to the presence of the UHI were verified.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1		pág.
1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivo e estrutura do trabalho	3
CAPÍTULO 2		
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Aspectos observacionais da ICU	5
2.2	Modelagem numérica da ICU	9
CAPÍTULO 3		
3	DESCRIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO BRAMS	18
3.1	Descrição do modelo BRAMS	18
3.2	Modelo LEAF	22
3.3	Esquema TEB	23
CAPÍTULO 4		
4	METODOLOGIA	30
4.1	Características da Região Metropolitana do Rio de Janeiro	30
4.2	Domínios utilizados nas simulações	33
4.3	Arquivos de ocupação do solo e topografia	35
4.4	Dados meteorológicos e período do estudo	38
4.5	Análises utilizadas como condições iniciais e de contorno	40

4.6	Descrição dos testes estatísticos	41
CAPÍTULO 5		
5	RESULTADOS	44
5.1	Avaliação dos resultados da modelagem utilizando as análises do ETA, Global-CPTEC e Reanálise-NCEP	45
5.2	Testes de sensibilidade entre diferentes perfis de umidade do solo com uso do esquema TEB	50
5.3	Testes de sensibilidade entre as diferentes opções do esquema TEB	54
5.3.1	Fluxos de calor veiculares	54
5.3.2	Calor sensível industrial	58
5.3.3	Altura das construções/prédios	61
5.4	Avaliação da ICU na RMRJ	64
5.4.1	Análise das séries de temperatura	64
5.4.2	Análise dos meteogramas	69
5.4.3	Análise do campo horizontal de temperatura e vento	76
5.4.4	Análise vertical da temperatura e do vento	80
CAPÍTULO 6		
6	CONCLUSÕES	89
6.1	Sugestões para trabalhos futuros	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		93
APÊNDICE A		100
APÊNDICE B		101

APÊNDICE C	103
APÊNDICE D	105
APÊNDICE E	107
APÊNDICE F	109
APÊNDICE G	111

LISTA DE FIGURAS

	pág.
FIGURA 1.1 Esquema ilustrativo do bolsão térmico formado sobre áreas urbanas. (Fonte: adaptada de Santamouris, 2001).	1
FIGURA 2.1 Taxa de aquecimento ou resfriamento $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ ($^{\circ}\text{Chr}^{-1}$) para a área urbana, suburbana e rural próximo a Montreal (Quebec, Canadá), durante uma noite e simultaneamente a diferença de temperatura entre a área urbana e a área rural ΔT_{u-r} ($^{\circ}\text{C}$). (Fonte: Oke e East, 1971).	6
FIGURA 3.1 Grade do tipo C de Arakawa, onde h são as variáveis termodinâmicas; u é a componente zonal e v a componente meridional do vento.	20
FIGURA 3.2 Esquema da geometria de <i>canyon</i> utilizada no esquema TEB. As setas azuis representam as múltiplas reflexões a que estão sujeitos os raios solares incidentes no <i>canyon</i> . (Fonte: Gouvêa, 2007).	24
FIGURA 4.1 Composição dos municípios da RMRJ. (Fonte: Fundação Centro de Informações e Dados do Rio de Janeiro http://www.zonu.com/brazil_maps/Metropolitan_Region_Map_Rio_Janeiro_State_Brazil_2.htm).	32
FIGURA 4.2 Visão topográfica da região contendo a RMRJ. (Fonte: Moraes, 2008).	32
FIGURA 4.3 Uso e cobertura do solo em região que abrange a RMRJ. (Fonte: Fundação Centro de Informações e Dados do Rio de Janeiro http://www.zonu.com/brazil_maps/Rio_Janeiro_States_Land_Use_Ground_Cover_Map_Brazil.htm).	33
FIGURA 4.4 Domínios 1, 2 e 3 utilizados nas simulações com o modelo BRAMS.	34
FIGURA 4.5 Tipo de uso do solo (colorido) e contornos da topografia para os domínios (a) 1, (b) 2 e (c) 3, com espaçamentos horizontais de 16 km, 4 km e 1 km, respectivamente.	37
FIGURA 4.6 Distribuição espacial das estações meteorológicas numeradas de acordo com a Tabela 4.4.	39

FIGURA 4.7	Média da altura geopotencial e vetor vento em 1000 hPa entre os dias 04 e 14 de setembro de 2007 às 00Z. (Fonte: Moraes, 2008).	40
FIGURA 5.1	Série temporal da temperatura do ar entre as simulações com as análises do ETA, Global e Reanálise e as observações para as estações: (a) SBGL, (b) SBRJ, (c) SBAF, (d) SBSC, (e) Copacabana, (f) Niterói, (g) Jacarepaguá-INMET, (h) Jacarepaguá-FEEMA, (i) Marambaia, (j) Ecologia Agrícola e (l) Nova Iguaçu.	46
FIGURA 5.2	Série temporal da temperatura do ar entre as simulações de solo controle, solo úmido e solo seco e as observações para as estações: (a) SBAF e (b) Ecologia Agrícola.	53
FIGURA 5.3	Fluxo de calor sensível W/m^2 ao longo do dia devido às atividades veiculares na área urbana da RMSP. (Fonte: Freitas, 2003).	55
FIGURA 5.4	Série temporal da temperatura do ar entre as simulações veicular ligado e veicular desligado e as observações para as estações: (a) SBAF e (b) Ecologia Agrícola.	56
FIGURA 5.5	Diferença horizontal de temperatura entre as simulações com fontes veiculares e sem fontes veiculares para o dia 06/09/2007 nos horários: (a)11Z e (b)19Z.	58
FIGURA 5.6	Série temporal da temperatura do ar entre as simulações de calor sensível de $10 W/m^2$ e de $20 W/m^2$ e as observações para as estações: (a) SBAF e (b) Ecologia Agrícola.	60
FIGURA 5.7	Diferença horizontal de temperatura entre as simulações com o calor sensível industrial $10 W/m^2$ e $20 W/m^2$ para o dia 06/09/2007 nos horários: (a)06Z e (b)18Z.	61
FIGURA 5.8	Série temporal da temperatura do ar entre as simulações com prédio de 10 m e 20m e as observações para as estações: (a) SBAF e (b) Ecologia Agrícola.	63
FIGURA 5.9	Comparação da evolução temporal da temperatura do ar e diferença de temperatura entre as simulações com 10 m e 20 m para a estação SBAF.	64
FIGURA 5.10	Série temporal da temperatura do ar entre as simulações sem e	66

- com o TEB e as observações para as estações: (a) SBAF e (b) Ecologia Agrícola.
- FIGURA 5.11** Série temporal da diferença de temperatura entre as estações SBAF e Ecologia Agrícola para as observações e a simulação com o TEB. 68
- FIGURA 5.12** Meteogramas da simulação com TEB e das observações para as estações localizadas na subárea 1: (a) SBGL, (b) SBRJ, (c) Copacabana e (d) Niterói. 71
- FIGURA 5.13** Meteogramas da simulação com TEB e das observações para as subárea 2: (a) Jacarepaguá-INMET, (b) Jacarepaguá-FEEMA, (c) SBAF e (d) Nova Iguaçu. 73
- FIGURA 5.14** Meteogramas da simulação com TEB e das observações para as estações localizadas na subárea 3: (a) Marambaia, (b) SBSC e (c) Ecologia Agrícola. 75
- FIGURA 5.15** Campo de temperatura do ar e direção do vento referente ao dia 06/09/2007 para as simulações sem TEB (a-d) e com TEB (e-h). A topografia é representada em contornos ao fundo. 77
- FIGURA 5.16** Campo de temperatura do ar e direção do vento referente ao dia 07/09/2007 para as simulações sem TEB (a-d) e com TEB (e-h). A topografia é representada em contornos ao fundo. 78
- FIGURA 5.17** Diferença horizontal de temperatura entre as simulações com e sem o TEB para o dia 06/09/2007 nos horários: (a) 18Z e (b) 21Z. 80
- FIGURA 5.18** Localização dos pontos 1 e 2 usados para a análise vertical. 81
- FIGURA 5.19** Perfil de topografia para os pontos 1 e 2. Destaca-se a Serra dos Órgãos no setor mais elevado. A linha azul embaixo da figura delimita a superfície oceânica e a linha preta é a continental. 82
- FIGURA 5.20** Corte vertical da temperatura e linha de corrente do vento no ponto 1 referente aos dias 06/09/2007 e 07/09/2007: (a)06Z; (b)09Z; (c)12Z; (d)15Z; (e)18Z; (f)21Z; (g) 00Z e (h)03Z. A linha azul embaixo da figura delimita a superfície oceânica e a linha preta é a continental, enquanto a linha verde delimita a área vegetada e a linha vermelha é a área urbana. 83
- FIGURA 5.21** Corte vertical da temperatura e linha de corrente do vento no 86

ponto 2 referente aos dias 06/09/2007 e 07/09/2007: (a)06Z; (b)09Z; (c)12Z; (d)15Z; (e)18Z; (f)21Z; (g) 00Z e (h)03Z. A linha azul embaixo da figura delimita a superfície oceânica e a linha preta é a continental, enquanto a linha verde delimita a área vegetada e a linha vermelha é a área urbana.

LISTA DE TABELAS

	pág.
TABELA 4.1 Configuração horizontal dos domínios utilizados nas simulações.	34
TABELA 4.2 Configurações do modelo BRAMS utilizada nas simulações.	35
TABELA 4.3 Codificação dos tipos de superfície, baseado na base de dados do USGS.	36
TABELA 4.4 Informações das estações convencionais dos aeroportos e das estações automáticas. (Fontes: REDEMETS - http://www.redemet.aer.mil.br/ , INMET- http://www.inmet.gov.br/ e FEEMA - http://www.feema.rj.gov.br/).	38
TABELA 5.1 Análise Estatística da temperatura do ar entre os dados observados e os dados simulados pelo modelo BRAMS para o segundo nível do modelo (30,7 m).	48
TABELA 5.2 Perfis de umidade do solo usados nas simulações.	51
TABELA 5.3 Parâmetros utilizados no esquema TEB.	65
TABELA 5.4 Análise Estatística da temperatura do ar entre os dados observados e os dados simulados com e sem o esquema TEB para o segundo nível do modelo (30,7 m).	67

CAPÍTULO 1

1 - INTRODUÇÃO

O ser humano através do crescimento das cidades tem contribuído para provocar muitas modificações no meio ambiente, principalmente em relação à distribuição dos seus recursos naturais, que em muitos casos, podem ser irreversíveis. Com a urbanização, novos espaços e ambientes foram criados e novos usos do solo foram se desenvolvendo ao longo destes meios. O processo de urbanização é uma atividade humana que provoca importantes modificações meteorológicas, pois causa mudanças nas condições climáticas locais e regionais de uma cidade gerando bolsões térmicos sobre as áreas urbanizadas e formando assim, um efeito complexo, chamado de Ilha de Calor Urbana (ICU) (Oke, 1987; Arnfield, 2003; Grimmond, 2006).

Oke (1982) define a ICU como o resultado do aumento da temperatura em áreas urbanizadas em comparação com as áreas periféricas e rurais, que conseqüentemente, conduz a um forte gradiente horizontal de temperatura. Uma representação esquemática de ICU pode ser observada na Figura 1.1.

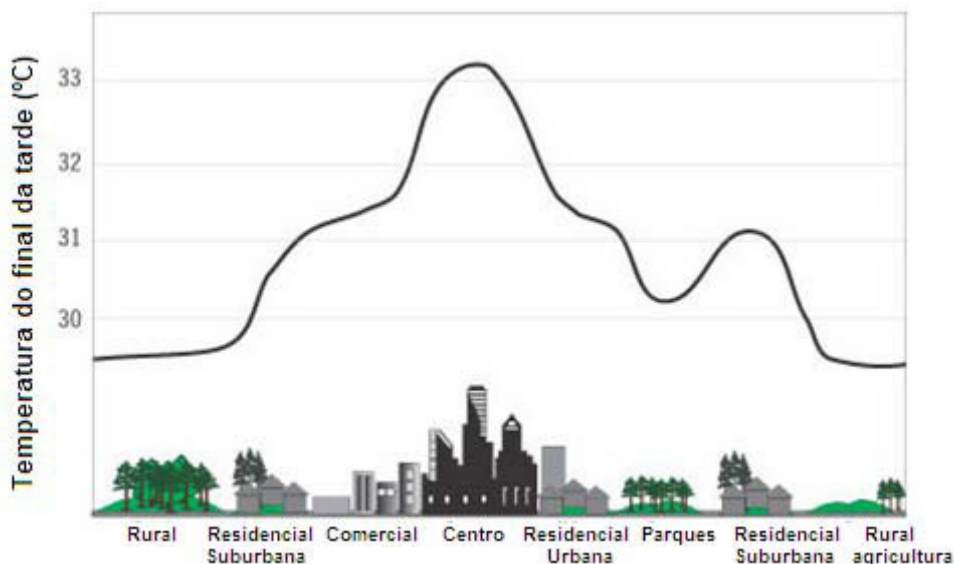


Figura 1.1- Esquema ilustrativo do bolsão térmico formado sobre áreas urbanas. (Fonte: adaptada de Santamouris, 2001).

A identificação e dimensionamento da estrutura térmica e dinâmica da ICU podem proporcionar importantes subsídios a estudos de planejamento urbano, tendo em

vista que este aspecto está diretamente ligado ao processo de urbanização. De acordo com Eriksen (1978, citado em Gouvêa, 2007), Landsberg (1981), Oke (1978), vários fatores podem contribuir para a formação da ilha de calor urbana:

- ✓ formas específicas de estruturas verticais, ou seja, as diferentes superfícies urbanas artificialmente criadas;
- ✓ capacidade térmica relacionada com materiais de construção, presença de pavimentação (concreto e asfalto), cores (albedos);
- ✓ redução da evaporação devido a pouca presença de áreas verdes e do transporte de água da chuva através da canalização;
- ✓ produção de energia antropogênica, através da emissão de calor pelas indústrias, tráfego de veículos e habitação;
- ✓ maior absorção de radiação de onda longa e onda curta pelos poluentes da atmosfera urbana;
- ✓ aprisionamento de radiação nas ruas e *canyons* urbanos, devido à redução do fator de visão do céu pelos prédios e edifícios.

Rizwan *et al.* (2008) em um estudo feito sobre a revisão e sumarização da Ilha de Calor Urbana verificaram que os fatores que contribuem para a formação da ICU podem ser categorizados como fatores controláveis e incontroláveis. Os fatores controláveis são na maior parte relacionados com os que podem ser controlados pelo homem até certo ponto (como áreas verdes e construções), enquanto que os fatores incontroláveis são relacionados à natureza que estão além do controle humano (condições sinóticas, estações do ano, condições diurnas, velocidade do vento e cobertura das nuvens). Os fatores controláveis e incontroláveis ainda podem ser classificados como variáveis de efeito temporário, como a velocidade do vento e cobertura de nuvens; variáveis de efeito permanente, tais como áreas verdes e materiais para construções; e as variáveis de efeito cíclico tais como a radiação solar e fontes de calor antropogênicas. Além desses fatores, a densidade populacional também é considerada como um fator controlável que contribui para a formação da ICU. No entanto, os autores mencionam alguns trabalhos que demonstram que apenas o aumento da população não implica num aumento do conteúdo de calor na área urbana. Neste estudo de Rizwan *et al.* (2008), o calor antropogênico e o aquecimento solar indireto (considerado como o aquecimento gerado entre as construções e os prédios de uma cidade) são considerados como as principais causas da formação da ICU. A mitigação

da ICU também é abordada, onde se verificaram possíveis medidas relacionadas à: redução da liberação de calor antropogênico; concepção de telhados alternativos; e outros fatores de planejamento urbano. Os autores mencionam sobre a importância da simulação numérica, como o modelo de balanço de energia na superfície (Masson, 2000; Masson *et al.*, 2002), porém ressaltam sobre as propriedades da superfície urbana que não são devidamente incorporadas em modelos numéricos.

Como descrito por Rizwan *et al.* (2008), os modelos numéricos são muito importantes e atualmente essenciais para o estudo da Ilha de Calor Urbana, principalmente os modelos de mesoescala, os quais possuem melhor detalhamento que os modelos globais. A utilização dos modelos de mesoescala permite um entendimento mais abrangente dos processos físicos que ocorrem na interação da superfície-atmosfera. Um exemplo desta aplicação no estudo da ICU pode ser verificado em Freitas (2003) e Moraes (2008), para as regiões metropolitanas de São Paulo e Rio de Janeiro, respectivamente.

Vale ressaltar que uma importante abordagem da área urbana vem sendo obtida através da incorporação do chamado esquema TEB (*Town Energy Budget*) ao modelo de mesoescala BRAMS (*Brazilian Regional Atmospheric Modeling System*). Este novo procedimento visa um maior detalhamento da representação das áreas urbanizadas através da modelagem numérica.

1.1 - Objetivo e estrutura do trabalho

O objetivo principal desta dissertação de mestrado é estudar a ICU na Região Metropolitana do Rio de Janeiro e suas conseqüentes alterações na circulação local, utilizando a modelagem atmosférica regional. Mais especificamente, será avaliada a estrutura dinâmica e termodinâmica da ICU através de uma representação detalhada da área urbana, avaliando suas interações com as circulações de brisa.

Para o desenvolvimento do presente estudo será utilizado o modelo atmosférico de mesoescala BRAMS acoplado ao esquema TEB de representação da área urbana. O BRAMS é um código numérico versátil adaptado às condições brasileiras a partir do *Regional Atmospheric Modeling System - RAMS* (Pielke *et al.*, 1992; Cotton *et al.*, 2003).

A dissertação está organizada nos seguintes capítulos:

- ✓ O capítulo 2 é apresentado uma revisão bibliográfica abordando os trabalhos científicos envolvendo o cunho observacional e a modelagem computacional do fenômeno de ICU.
- ✓ No capítulo 3 é feita uma descrição do modelo de mesoescala BRAMS, juntamente com uma breve descrição do modelo LEAF e do esquema TEB.
- ✓ No capítulo 4 apresenta-se a metodologia adotada neste trabalho, iniciando com uma descrição da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMJR). Posteriormente, são apresentadas as configurações dos domínios utilizados na modelagem e dos dados utilizados. Também é apresentada uma descrição dos testes estatísticos aplicados aos resultados do modelo.
- ✓ No capítulo 5 são apresentados os resultados das simulações numéricas.
- ✓ No capítulo 6 apresentam-se as conclusões do trabalho, juntamente com proposições de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como objetivo fazer uma revisão bibliográfica de conceitos teóricos sobre o tema Ilha de Calor Urbana (ICU), destacando trabalhos científicos que envolvem aspectos observacionais e de modelagem numérica da atmosfera.

2.1 - Aspectos observacionais da ICU

O processo de ocupação, a urbanização e o desenvolvimento das metrópoles geram o fenômeno de Ilha de Calor Urbana. Estudos sobre a temática observacional são de grande importância para a análise da ICU. De acordo com Landsberg (1981), o primeiro registro sobre ICU encontra-se no trabalho de Howard em 1820, que realizou observações da temperatura do ar no centro de Londres e em seus arredores para todos os meses entre os anos de 1807 a 1816. Os resultados identificaram que o centro urbano era mais quente que suas vizinhanças. Entretanto, Howard atribuiu este aumento de temperatura no centro de Londres ao extensivo uso de combustíveis.

Norwine (1973) verificou a ocorrência da ilha de calor urbana através de observações de temperatura realizadas ao redor de um shopping situado em um local isolado na área suburbana de Chicago entre os horários de 22 e 23 h durante o período de 1 de janeiro a 31 de março de 1972. A região ao redor do shopping é caracterizada por áreas rurais (campos de cultivos) e áreas suburbanas (casas em construção, parques industriais e comércio). Os valores de temperatura foram monitorados em 84 locais pré-determinados na área do shopping e em suas proximidades. O autor verificou que nas noites sem nuvens e de calmaria, a diferença máxima de temperatura entre as observações ao redor do shopping era superior em relação às noites com ventos fortes e céu encoberto. De acordo com Landsberg (1981), a diferença máxima de temperatura quando a ICU é intensa ocorre geralmente 2-3h depois do por do sol para esse estudo especificamente. Numa escala pequena de edifícios geralmente o efeito de ICU desaparece depois da meia noite, já em grandes áreas urbanizadas a presença da ilha de calor é ainda verificada horas antes do nascer do sol, fazendo assim com que as temperaturas mínimas aumentem.

Oke e East (1971) mostraram taxas de aquecimento e resfriamento horários em dias de inverno na cidade de Montreal (Figura 2.1) para área urbana, suburbana e rural, durante condições de céu sem nuvens e ventos fracos. As taxas de temperatura (indicadas no eixo vertical à esquerda da Figura 2.1) apresentaram-se positivas durante o dia nas três regiões. Entretanto, após 16 h as regiões suburbana e rural registraram taxas negativas ao mesmo tempo em que a região urbana permaneceu positiva até por volta de 21 h. O efeito da ICU pode ser evidenciado pela diferença máxima de temperatura entre a área urbana e a área rural, expresso por $\Delta T_{(u-r)\max}$, de 10,5 °C às 22 h, gradualmente caindo para $\Delta T_{(u-r)\max} = 6,5$ °C às 5 h (indicado no eixo vertical à direita da Figura 2.1).

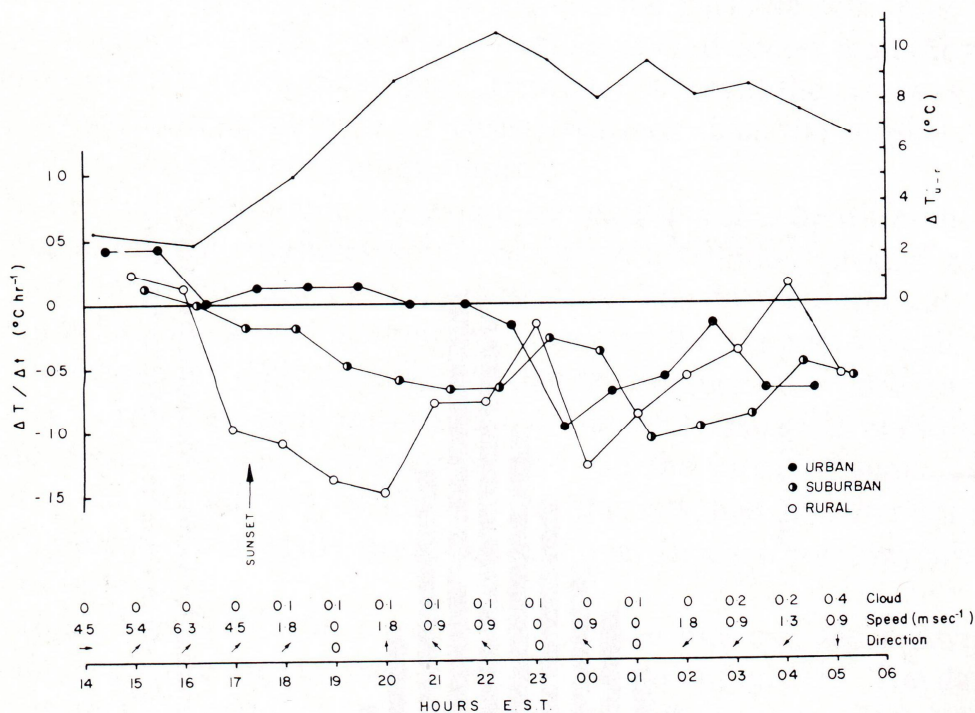


Figura 2.1 - Taxa de aquecimento ou resfriamento $\Delta T/\Delta t$ ($^{\circ}C hr^{-1}$) para a área urbana, suburbana e rural próximo a Montreal (Quebec, Canadá), durante uma noite e simultaneamente a diferença de temperatura entre a área urbana e a área rural ΔT_{u-r} ($^{\circ}C$). (Fonte: Oke e East, 1971).

Oke (1973) realizou observações em 10 sub-regiões com população entre 1.000 e 1 milhão de habitantes na área de Montreal através do uso de um veículo. As medidas foram feitas cerca de 3 horas depois do pôr do sol em dias com condições de céu claro e sem a ocorrência de nuvens. Os resultados encontrados mostram que a diferença de

temperatura entre a área rural e urbana (ΔT_{u-r}) pode ser representada pela seguinte equação empírica, que relaciona p (número da população) e \bar{u} (velocidade média do vento):

$$\Delta T_{u-r} = \frac{0,25 p^{1/4}}{\bar{u}^{1/2}}$$

Lombardo (1984) verificou as áreas com maiores alterações ambientais na Região Metropolitana de São Paulo utilizando imagens de satélite dos quatro canais do LANDSAT-3MSS, imagens de satélite NOAA-7 para extrair as variações de temperatura e o programa MAXVER para a interpretação de uso do solo urbano. A partir das respostas espectrais obtidas das classes de uso do solo urbano dos quatro canais do LANDSAT, foram identificadas oito classes de ocupação: 1-classe de ocupação vertical, correspondente ao centro comercial; 2-classe mista – ocupação horizontal e vertical - correspondente a área adjacente ao centro da cidade com crescimento vertical intenso; 3-classe ocupação horizontal densa, formada por residências geminadas com ausência de áreas verdes; 4-classe ocupação horizontal rala, correspondentes a bairros onde as residências possuem jardins ou terrenos desocupados; 5-classe loteamento relativo a periferias; 6-classe indústria; 7-classe vegetação e 8-classe água. Os resultados mostraram que as áreas ocupadas por edifícios e as áreas industriais apresentavam os maiores valores de temperatura, de cerca de 25°C. Nas áreas ocupadas por parques a temperatura máxima registrada foi de 18°C e nos bairros residenciais com jardins os valores foram de 19 a 21° C. A autora verificou que diferença de temperatura entre as áreas ocupadas por edifícios e industriais e as áreas ocupadas por parques foram de 7°C. Ressalta-se neste trabalho, que na extração dos valores de temperatura horizontal não foi feita nenhuma correção devido às diferenças de altura da superfície (topografia).

Costa e Mattos (1998) analisaram a influência da estrutura urbana sobre o comportamento da ilha de calor durante as épocas chuvosa e menos chuvosa na cidade de Belém. Foram observados os valores da temperatura do ar em 18 locais distintos da área urbana da cidade de Belém, nos meses de dezembro a maio (época chuvosa) e nos meses de junho a novembro (época menos chuvosa). Os resultados obtidos para os 18 ambientes urbanos e para uma estação meteorológica localizada na área rural de Belém são usados para avaliar a ICU. Os resultados mostraram uma ilha de calor bem definida,

principalmente na época menos chuvosa, quando a diferença de temperatura entre os bairros mais urbanizados e a área rural atingiu valores máximos da ordem de 4,5 °C. Na época mais chuvosa esta diferença era de apenas 2,0 °C, mostrando que os efeitos combinados da grande nebulosidade e precipitação proporcionam menores contrastes térmicos entre os diferentes ambientes urbanos e área rural.

Pereira Filho (2000) analisou a ilha de calor com a interação da brisa marítima e a produção de chuvas convectivas intensas na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Para a realização daquele trabalho foram selecionados quatorze eventos convectivos, dados de chuva acumulada horária e medições de refletividade na troposfera estimada com o radar meteorológico de São Paulo. A partir desses dados, foi realizado um estudo de caso para o evento do dia 5 de fevereiro de 1998, em que foram utilizados dados de uma estação meteorológica, imagens de satélite e imagens do campo das taxas de precipitação e do topo de nuvens do radar. Para ilustrar o efeito da urbanização sobre o escoamento superficial também foram realizadas simulações hidrológicas para a bacia hidrográfica do IAG para condições de escoamento rural e urbano. Os resultados mostraram que os efeitos dinâmicos e termodinâmicos da ilha de calor na convecção local podem ser amplificados pelo aumento da umidade proveniente da penetração da brisa marítima. O ar urbano relativamente seco e quente, quando misturado ao ar marítimo relativamente úmido e frio, aumenta a instabilidade convectiva, sugerindo que os efeitos de ilha de calor e da brisa marítima desempenham papel importante no desenvolvimento de células convectivas muito intensas na RMSP. O autor também observou que as chuvas de verão tendem a uma intensidade maior por causa da ilha de calor urbana e da brisa marítima, e com isso, as enchentes tendem a ser mais destrutivas, agravadas pela diminuição da infiltração no solo.

Alguns estudos avaliam a temática da ocorrência de ICU em cidade localizadas nos trópicos e nas latitudes médias. Fialho e Azevedo (2009) observaram o caráter noturno da ocorrência e das características da ICU nas cidades de latitudes médias. Nas cidades de Buenos Aires e Lisboa a máxima intensidade da ICU ocorre tipicamente entre 3 a 5 h após o pôr-do-sol. Apesar dos estudos em cidades de latitudes médias confirmarem o caráter noturno do fenômeno, para algumas cidades tropicais foram identificados que a intensidade máxima da ilha de calor ocorre no período diurno, como por exemplo, a cidade de Toluca no México. As diferenças entre a ocorrência da ICU em regiões de latitude médias e tropicais podem estar associadas a dois fatores. O primeiro é a própria localização latitudinal, determinante na variabilidade sazonal da

duração do dia e da noite, e, por conseguinte da oscilação diária da temperatura. O segundo é a orientação das vertentes de uma cidade, fator este que facilita ou não a chegada dos raios do sol ao longo do dia, por conta da influência do sombreamento e do acúmulo de ar frio no fundo do vale durante a madrugada. Este fator é tão relevante, que caso uma cidade esteja situada em um eixo de vale orientado para o quadrante norte no hemisfério sul, a mesma apresentará uma grande incidência de raios solares, o que definirá um topoclima distinto capaz de registrar temperaturas mais elevadas ao longo do dia, mesmo não havendo a presença de ocupação humana.

Amorim *et al.* (2009) realizaram um estudo sobre a ocorrência da ICU na cidade de Presidente Prudente (SP), localizada nas latitudes tropicais e inserida no clima tropical continental sub-úmido; e na cidade de Rennes (França), situada em latitudes médias, representando uma cidade típica do clima temperado-oceânico do interior. Os autores verificaram que em ambas as cidades, a produção do clima urbano resultou da interação entre a radiação recebida e a refletida pelos tipos de materiais construtivos das edificações nos diferentes tipos de uso do solo que armazenam o calor durante o dia e é liberado nas primeiras horas após o por do sol. Para as cidades tropicais que já são naturalmente quentes, a ICU é responsável pela intensificação do desconforto térmico e, portanto, podem ser consideradas como um indicador de qualidade ambiental urbana. Para as cidades de latitudes médias, o efeito da ICU pode ser considerado como uma maneira de melhorar as condições térmicas.

2.2 - Modelagem numérica da ICU

Os mecanismos de formação e desintese da Ilha de Calor Urbana, suas consequências na circulação atmosférica local e outras características associadas a este efeito são bastante discutidos através do uso da modelagem numérica.

Silva (1986) identificou a relação da ICU e a brisa marítima para a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) usando um modelo bidimensional destinado para o estudo de circulações associadas aos fenômenos da brisa marítima, Ilha de Calor Urbana e ventos de vale-montanha. O autor verificou que há um atraso na brisa marítima na RMSP em decorrência da presença da região urbana. Além de observar que o efeito da topografia combinado com a ICU provoca um maior desenvolvimento vertical na Camada Limite Planetária, acarretando em um aumento na sua temperatura média.

Freitas e Silva Dias (2000) analisaram o efeito da ICU sobre os fluxos de calor na RMSP utilizando o modelo RAMS. As simulações com o modelo atmosférico foram feitas com aninhamento de grades e espaçamentos horizontais de 8 km e 2 km. Na vertical foram utilizados 29 níveis com espaçamento variável iniciando em 200 m e aumentando gradativamente por um fator de 1.2 até atingir 1 km, mantendo esse espaçamento até o topo do modelo. Para a caracterização da condição inicial do modelo foram utilizadas análises de modelo global com 1,875 graus de latitude/longitude. A especificação da topografia e ocupação do solo foi feita através da utilização de um modelo de elevação digital com resolução de aproximadamente 1 km, obtido através do programa IGBP (*International Geosphere Biosphere Programme*) disponível do USGS (*United States Geological Survey*). Os parâmetros de ocupação do solo (vegetação, construções, represas, etc.) são baseados em dados com resolução de 1 km obtidos por radiômetros de altíssima resolução (*Advanced Very High Resolution Radiometer - AVHRR*). Duas simulações foram usadas: uma com características do solo urbano, chamada de simulação de controle; e outra sem o solo urbano com o uso do tipo de vegetação predominante nos arredores. Os resultados da subtração da simulação da malha urbana com a simulação sem a presença da mesma mostram que na cidade existe uma grande transferência de calor sensível no período da tarde. O resultado desta análise mostra ainda que a razão de Bowen é muito maior na cidade do que em seus arredores.

Nielsen-Gammon (2000) investigaram o efeito da ilha de calor associado com a modulação da brisa marítima/terrestre na cidade de Houston através do uso do modelo MM5. Os resultados mostraram uma ligeira diferença entre as observações e os resultados do modelo com relação aos ventos de grande escala sobre Houston e na intensidade da brisa marítima, porém a evolução da brisa marítima/terrestre ficou qualitativamente similar à observação. Foram utilizados três domínios, o primeiro com 36 km de espaçamento horizontal cobrindo parte dos Estados Unidos, Golfo do México e México, e outros dois domínios aninhados com espaçamento de 12 km e 4 km. O espaçamento vertical foi de 100 m até 2 km na atmosfera. Após a representação qualitativa da circulação de brisa, foram realizadas duas simulações com objetivo de isolar o efeito da ilha de calor urbana: uma baseada na categoria de uso de solo urbano obtido através dos dados disponíveis do USGS (*United States Geological Survey*) com resolução de 1 km, e outra com característica da categoria de uso de solo rural, chamada de simulação “sem-cidade”. As comparações de temperatura e ventos entre a simulação

de controle e a simulação “sem cidade” mostram que os resultados são idênticos, exceto na região urbana em que a diferença atingiu cerca de 2 °C mais quente que as áreas rurais vizinhas. O autor conclui que o efeito da ilha de calor sobre Houston re-modula o desenvolvimento da brisa marítima, assim como a recirculação do ar sobre a grande área industrial do canal de navios de Houston, conhecido como efeito de “bomba de calor de Houston”.

Brazer *et al.* (2003) usaram o modelo MM5 para simular o ciclo diurno da temperatura do ar e os efeitos da ICU na cidade de Phoenix em três áreas distintas: a área metropolitana de Phoenix, uma área desértica e uma área agrícola. Foram usados quatro domínios horizontais com espaçamentos horizontais de 54 km, 18 km, 6 km e 2 km e 32 níveis na vertical. O nível mais baixo do modelo foi aproximadamente de 7 m acima da superfície. Para categoria de uso do solo e topografia foram usados dados de aproximadamente de 1 km do USGS. Como condições iniciais e de contorno foram usadas as análises do NCEP-ETA (espaçamento de grade de 40 km) e assimilação de observações de ar superior. Foram escolhidas observações em seis pontos fixos a partir de um dia em que a diferença entre a área urbana e a rural fosse de 11 °C e houvesse condições atmosféricas ideais, com ventos fracos e céu claro. Os resultados mostraram que durante o dia as simulações apresentam uma diferença de cerca de 4 °C entre a temperatura do ar na área agrícola irrigada e na área urbana, devido à alta disponibilidade de água que aumenta o fluxo de calor latente na área irrigada. Na variação da temperatura da área seca e a área úmida verificou-se valores de 8 °C. Os autores observam que para descrever o efeito da ICU por modelos atmosféricos de mesoescala é necessário implementar uma parametrização de dossel urbano, que considera processos como radiação, geração de calor por fontes antropogênicas e que são capazes de prever perfis das variáveis meteorológicas dentro da subcamada da rugosidade urbana.

Freitas (2003) analisou o efeito da ilha de calor urbana na RMSP através do uso do modelo RAMS e da análise de dados observacionais coletados no período de inverno de 1999. Foram utilizadas três grades aninhadas com espaçamentos horizontais de 16 km, 4 km e 1 km. Na vertical, foram utilizados 28 níveis com um espaçamento inicial de 70 m próximo à superfície e uma amplificação por um fator de 1,2 até a altura de 1000 m para permitir um melhor detalhamento da Camada Limite Planetária (CLP). Acima de 1000 m o espaçamento permaneceu constante e igual a 1000 m. Em todas as simulações foram utilizadas as análises do modelo global do CPTEC, com espaçamento

de 1,875° na horizontal, em um intervalo de seis horas, para a inicialização heterogênea com a inclusão dos dados de temperatura e umidade relativa obtidos de estações automáticas. Para a representação da ocupação do solo foi utilizado um arquivo composto pela classificação original fornecida pelo USGS. Para definir dois tipos de ocupação urbana que diferem entre si na verticalização e espaçamento entre as construções, foram usadas também imagens do satélite LANDSAT-5 para se obter um arquivo de ocupação do solo na RMSP numa resolução de aproximadamente 424 m. O modelo RAMS foi acoplado ao esquema *Town Energy Budget* (TEB), sendo este último inserido para representar características do efeito urbano. Os resultados indicaram que as fontes antropogênicas de calor de origem veicular são de grande importância no ciclo diurno de temperatura e umidade na RMSP. Para validar o acoplamento do RAMS com o TEB, análises estatísticas foram realizadas e mostraram um alto grau de correlação (superior a 0,9 para a temperatura e superior a 0,8 para a umidade relativa). Nas simulações sobre o efeito da urbanização o autor mostrou que a ilha de calor urbana contribui para a chegada mais rápida da frente de brisa até o centro da RMSP. Na análise dos efeitos da topografia sobre a intensidade e propagação da brisa marítima, verificou-se que a presença da topografia age de maneira a intensificar as circulações de brisa marítima e terrestre através da superposição das circulações do tipo vale/montanha com as circulações de brisa, como ocorre com a presença das Serra do Mar, Mantiqueira e Cantareira. Este aspecto contribui para que a brisa marítima atinja a RMSP algumas horas mais cedo do que atingiria caso não houvessem essas topografias acentuadas.

Alguns resultados discordam daqueles obtidos por Silva (1986). Freitas (2003) verificou que a região urbanizada da RMSP contribui para uma propagação mais rápida da frente da brisa até a sua porção sul em decorrência das circulações geradas pela ilha de calor urbana e para o atraso na chegada da frente de brisa na zona norte. Além disso, foi verificado que a Ilha de Calor Urbana faz com que a velocidade dos ventos da circulação de brisa marítima seja mais intenso, ocasionado pela forte convergência gerada pela ilha de calor urbana. Com relação ao impacto causado pela umidade do solo nas circulações de brisa e ilha de calor, o autor conclui que a diminuição da umidade do solo pode neutralizar o efeito da ICU devido à diminuição do contraste de temperatura entre a cidade e suas vizinhanças. No entanto, com a mudança na umidade do solo é verificado uma modificação na intensidade e propagação da brisa marítima, já que com o solo mais seco a brisa marítima tem uma maior intensidade e maior extensão vertical.

Chen *et al.* (2004) simularam a ICU na área de Houston através do uso do modelo WRF juntamente com o modelo de superfície (*Noah Land Surface Mode*) e o modelo de dossel urbano (Urban Canop Model - UCM). A categoria do uso do solo utilizada na área urbana de Houston foi obtida pelos dados do satélite LANDSAT com resolução espacial de 30m. A temperatura do ar a 2 metros da superfície, simulada pelo WRF considerando o UCM foi 10°C maior do que o modelo *Noah Land Surface Model* sem o tratamento para área urbana. A simulação utilizando UCM foi hábil em representar a distribuição de temperatura observada dentro da ICU, isto é, a alta temperatura é encontrada na área residencial de alta intensidade devido à grande cobertura de construções existentes. Nos resultados obtidos com o WRF e modelo UCM, a temperatura nas paredes das construções foi maior do que nas ruas, devido a sua maior absorção de radiação solar.

Freitas e Silva Dias (2005) também analisaram a ICU e os fluxos de calor, onde identificaram aspectos que relacionavam o efeito da urbanização com a formação da ilha de calor na RMSP através do uso do modelo RAMS acoplado ao esquema TEB. Os dados usados para a inicialização e condição de contorno do modelo, assim como as configurações das resoluções horizontais e verticais e espaçamento vertical são os mesmos adotados em Freitas (2003). Para a representação da ocupação do solo foi utilizado um arquivo composto pela classificação original do USGS, substituindo-se as classes urbana e suburbana a partir de um processo de classificação de imagens de satélite, como feito em Freitas (2003). Na nova classificação, a área urbana é formada principalmente por edifícios e a área suburbana é constituída por construções de pequeno e médio porte. Foram realizadas duas simulações diferentes: uma com características atuais da cidade (simulação de controle) e outra substituindo as áreas urbanas por vegetação equivalente à mata aberta. Na diferença de temperatura entre as duas simulações, observa-se uma configuração em forma de “ilha de calor” na área da RMSP com diferenças de temperatura de até 3,5 °C. Este fato mostra que a região urbana é 3,5 °C mais quente do que seria caso a área que ela ocupa fosse coberta pelo tipo de vegetação escolhido.

Diferença dos fluxos de calor sensível e latente para a RMSP também foram avaliadas, onde observaram diferenças positivas no fluxo de calor sensível que chegam a atingir valores de até 120 W/m² nas áreas localizadas nas bordas do centro urbano e valores entre 40 e 80 W/m² no centro urbano. Com relação à análise da diferença dos

fluxos de calor latente, os autores verificam valores bem menores na simulação com a presença da cidade, de cerca de -180 W/m^2 . Essas diferenças nos fluxos de calor sensível e latente implicam também na diferença entre a razão de Bowen entre as duas simulações. A presença da cidade faz com que essa razão chegue a ser até 3,5 vezes maior do que seria caso essa região fosse ocupada pelo tipo de vegetação escolhido para a análise. Este fato indica que numa região urbana apesar da existência de fontes antropogênicas de umidade, a maior parte da energia disponível é utilizada para o aquecimento da atmosfera. Outro efeito causado pela presença da malha urbana é observado na evolução da altura da CLP na RMSP que foi 150 m mais alta do que seria caso ela não existisse.

Moraes *et al.* (2005) realizaram um estudo na Região Metropolitana do Rio de Janeiro através do uso do MM5 com o objetivo de avaliar a influência de sistemas sinóticos referentes ao mês de setembro de 2002 e dos efeitos atmosféricos locais na formação e desintencificação da ICU. Nas simulações utilizaram-se dois domínios centralizados e aninhados, com espaçamentos entre os pontos de grade de 9 km e 3 km para cada domínio. Os dados de topografia usados foram do USGS. Foram utilizados 55 níveis verticais, sendo 26 níveis até 850 hPa para melhor resolver fenômenos existentes na camada limite atmosférica. O modelo foi inicializado com dados meteorológicos do conjunto de Reanálises do NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) com espaçamento na direção horizontal de 2.5° lat/lon e a cada 6 horas. A partir da análise do mês de estudo, o autor selecionou dois períodos com situação sinótica distinta: um período caracterizado pela passagem de um sistema frontal e o outro período marcado pela atuação da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). O resultado mostrou que a ICU apresentou-se mais intensa durante uma situação atmosférica pré-frontal do que no período sob influência da ASAS. Este resultado contribui na indicação prévia do comportamento da ICU na RMRJ diante de situações sinóticas distintas.

Freitas *et al.* (2007) discutiram as características da ilha de calor e sua relação com áreas urbanizadas na RMSP durante o inverno. Foram realizadas simulações com o modelo RAMS para duas diferentes parametrizações de uso do solo (sub-modelo LEAF 2 e o esquema TEB). Foram utilizadas duas grades aninhadas com espaçamentos horizontais de 16 km e 4 km. Os dados usados como condição inicial e contorno, as configurações horizontal e vertical do espaçamento de grade são os mesmos apresentados em Freitas (2003). A área urbana foi dividida em duas áreas urbanas com

características diferentes: tipo urbano 1, que predomina alta construções e prédios cobrindo cerca de 400 km² e o tipo urbano 2 que abrange principalmente regiões residências e industriais cobrindo 1097 km². Estas duas regiões foram definidas pelas imagens do LANDSAT 5 e classificadas de acordo com as categorias de cobertura do solo original fornecido pelo *Internacional Geosphere Biosphere Programme* (IGBP). Os autores verificaram que a interação entre a brisa marítima e a ICU é mais significativa quando maiores regiões urbanas estão envolvidas e a área urbana é suficientemente longe da costa tal que a ICU tenha tempo para se desenvolver. Na comparação entre o sub-modelo LEAF2 e o esquema TEB verificou-se que o TEB tem uma melhor capacidade de representar as particularidades das regiões urbanas, especialmente durante um período de 48 horas. Testes de sensibilidade com o TEB através de simulações feitas com a presença e sem a presença da região urbana foram realizados para expor a interação da brisa marítima e a ilha de calor urbana. Os testes mostraram que a ICU age de maneira a acelerar a frente da brisa marítima até atingir o centro da região urbana da RMSP. A presença da região urbana aumenta a velocidade de propagação da frente da brisa marítima, quando comparado com a situação em que não existe a cidade. Além disso, devido à forte zona de convergência no centro da cidade, as circulações induzidas a partir da RMSP atuam no sentido de bloquear a brisa marítima ao longo da cidade por cerca de duas horas, carregando uma grande quantidade de umidade da superfície para níveis superiores da atmosfera urbana. A ICU também contribui para o aumento da velocidade do vento na célula de circulação da brisa marítima.

Gouvêa *et al.* (2006) avaliaram um caso de tempestade ocorrida em 1 março de 1999 na cidade de São Paulo que causou um grande alagamento no túnel do Anhangabaú na área central da cidade. Esta tempestade ocorreu sob a presença da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) em escala sinótica, mas sofreu uma forte influência do efeito de ilha de calor urbana e da brisa marítima. Para a realização do trabalho utilizou-se o modelo de mesoescala BRAMS acoplado com o esquema TEB, dados de superfície observados de uma estação meteorológica e imagens do radar meteorológico para estimar a precipitação. O modelo foi inicializado a partir de Reanálises do NCEP-NCAR, configurado com duas grades aninhadas centradas na cidade de São Paulo de espaçamento horizontal de 64 km e 16 km, e vertical de 33 níveis e 10 camadas de solo. Os autores concluíram que a situação atuante em escala sinótica com a presença da ZCAS foi responsável por gerar instabilidade e trazer

umidade da Amazônia, porém a brisa marítima e o efeito de ilha de calor urbana tiveram o papel de iniciar e intensificar a convecção. Os dados observados mostraram que a precipitação teve início por volta das 15HL, cerca de 2 horas após a máxima temperatura do dia e coincidente com o horário de entrada da brisa marítima. A junção entre estes dois fatores, calor e umidade, associado à topografia da região, foi determinante para a intensa convecção que ocasionou a tempestade. As simulações apresentaram uma boa representação da entrada da frente de brisa e também do efeito de ilha de calor urbana, além do aporte de ar quente e úmido proveniente da região amazônica. Os autores ressaltam a eficiência do modelo BRAMS em adaptar-se a regiões urbanas, o qual se mostrou como uma ferramenta hábil no estudo deste tipo de fenômeno.

Gouvêa (2007) buscando um melhor entendimento para que atividades de planejamento urbano possam ser mais bem organizadas, identificou os impactos das propriedades da superfície urbana sobre as condições meteorológicas da Região Metropolitana de São Paulo. Foram utilizados produtos de sensoriamento remoto para definir algumas propriedades da superfície urbana; medidas de variáveis meteorológicas em superfície para determinar os índices de conforto humano e a modelagem numérica com o uso do BRAMS acoplado ao esquema TEB para a identificação das condições atmosféricas. O modelo BRAMS foi inicializado a partir de dados observacionais interpolados numa grade com 1° (lat/lon) de espaçamento, fornecidos pelas reanálises do NCEP-NCAR. Foram utilizadas 3 grades aninhadas, com espaçamento de 16 km, 4 km e 1 km. Na vertical foram utilizados 33 níveis, iniciando com Δz de 30 m e aumentando gradativamente a uma taxa de 1,2 até atingir 1 km, acima deste o espaçamento foi mantido constante igual a 1 km. Como condição de superfície foi usado o mapa de ocupação do solo fornecido do USGS (*United States Geological Survey*) com resolução de aproximadamente 1 km. Nos arquivos de ocupação do solo também foi utilizado como base o refinamento dos tipos de superfície urbana na RMSP elaborado por Freitas (2003), denominados de tipo urbano 1 e 2. O tipo chamado urbano 1 é representativo de grandes centros, com construções altas e avenidas largas, enquanto o tipo urbano 2 representa áreas mais residenciais, com construções baixas e ruas estreitas. A autora constatou que os efeitos da presença de vegetação diminuem o aquecimento na área urbana, desintensificando o efeito da ilha de calor urbana. Foram simulados cenários com estimativas de 25% e 50% de substituição da área urbana por área vegetada. Os resultados mostraram que no cenário de 25% de vegetação, as

diferenças máximas entre a temperatura da área urbana e a situação em que a área foi substituída por vegetação atingiram 2,5 °C. Já com 50% de substituição da área por área vegetada, as diferenças de temperatura caíram para 2,0 °C.

Uma extensão do trabalho de Moraes *et al.* (2005) foi desenvolvida em Moraes (2008), em que foram analisados mecanismos envolvidos na formação, intensificação e desintensificação da ICU na RMRJ a partir do uso do modelo numérico MM5 para situações sinóticas distintas. Foram considerados quatro domínios aninhados, com espaçamentos horizontais de 37 km, 12,3 km, 4,1 km e 1,37 km e configurados com 52 níveis sigma na vertical. Nesses domínios foram utilizados os dados de topografia e dados de elevação do USGS. As simulações foram comparadas com dados das estações meteorológicas convencionais dos aeroportos, em que se verificou que o MM5 representou bem o ciclo diário da temperatura para o mês de setembro de 2007. Na avaliação de formação e desintensificação da ICU diante de dois períodos distintos, verificou-se que sob o predomínio da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), a ICU é menos intensa devido a uma atuação mais marcante da brisa marítima. Este aspecto foi identificado como um fator importante no mecanismo de desintensificação da ICU por atuação da brisa na RMRJ. No período que houve a passagem de um sistema frontal, foi verificado que nos dias antes da aproximação da frente fria a brisa marítima não ficou tão bem configurada, o que propiciou a elevação da temperatura na RMRJ. Na análise do perfil vertical de temperatura e vento para os dias representativos de atuação da ASAS, observou-se que a circulação referente a ICU apresentou desenvolvimento vertical de cerca de 1200 metros de altura. Naquele trabalho também foram comparados os termos da equação da primeira lei da termodinâmica com o objetivo de avaliar a importância diferenciada dos mecanismos de aquecimento e resfriamento em diversos níveis verticais. O autor conclui que próximo à superfície, a tendência local de temperatura é mais influenciada pelos processos de advecção horizontal de temperatura, taxa de radiação líquida e fluxos de calor (principalmente de calor sensível). Em níveis mais altos, os termos de flutuabilidade e de fluxos passam a ter maior importância na variação local de temperatura.

CAPÍTULO 3

3 - DESCRIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO BRAMS

Neste capítulo será apresentada uma breve descrição do modelo BRAMS. Destaca-se, entretanto, dois subitens adicionais que tratam especificamente do uso do solo. O primeiro é o modelo de interação solo-vegetação-atmosfera (LEAF - *Land Ecosystem Atmosphere Feedback model*) e o segundo é o esquema *Town Energy Budget* (TEB), sendo este último utilizado para representar de forma mais adequada os efeitos da área urbana nas simulações.

3.1 - Descrição do modelo BRAMS

O modelo numérico de mesoescala *Brazilian Regional Atmospheric Modeling System* (BRAMS) foi desenvolvido por diversas instituições, entre elas a *Atmospheric Meteorological and Environmental Technologies* (ATMET), Instituto de Matemática e Estatística da Universidade de São Paulo (IME/USP), Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG/USP), Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) e o Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal da Paraíba (DCA/UFPB). O objetivo do projeto foi produzir uma nova versão do modelo *Regional Atmospheric Modeling System* (RAMS), ajustada para os trópicos e que atenda aos centros de previsão de tempo regionais brasileiros. O RAMS (Pielke *et al.*, 1992; Cotton *et al.*, 2003) é um modelo numérico versátil desenvolvido pela *Colorado State University*, onde é possível simular circulações que vão desde a micro até a macro escala, sendo mais frequentemente aplicado a simulações de mesoescala. O RAMS baseia-se no conjunto completo de equações que governam a evolução do estado atmosférico, baseadas nas leis de movimento de Newton e na termodinâmica de um fluido como descrito no trabalho de Freitas (1999). É equipado com um esquema de alinhamento múltiplo de grades, permitindo que as equações do modelo sejam resolvidas simultaneamente sob qualquer número de grades computacionais com diferentes resoluções espaciais. As grades maiores, de menor resolução, são para

modelar os sistemas atmosféricos de grande escala, os quais interagem com os sistemas de mesoescala resolvidos nas grades com maior resolução.

O BRAMS contém diversas opções que possibilitam o uso do modelo para um grande número de aplicações sendo utilizado na forma não hidrostática, resoluções variando entre menos que um metro até centenas de quilômetros, domínios que vão de poucos quilômetros a todo um hemisfério e uma variedade de opções físicas.

O modelo atmosférico BRAMS é configurado através de uma lista de variáveis (*namelist*) chamada RAMSIN e está dividida em cinco partes: MODEL_GRIDS, MODEL_FILE_INFO, MODEL_OPTIONS, MODEL_SOUND e MODEL_PRINT. Na configuração do RAMSIN também possui um módulo de análise isentrópica denominado ISAN (*ISentropic ANalysis package*) dividido em duas partes ISAN_CONTROL e ISAN_ISENTROPIC. Na versão 4.2 do BRAMS, que é a utilizada no presente trabalho, dois módulos adicionais são acoplados ao modelo, o CATT_INFO e o TEB_SPM_INFO.

Uma descrição dos módulos da *namelist* é apresentada a seguir.

MODEL_GRIDS

Nessa primeira parte da *namelist* são fornecidas informações da estrutura de grade, tais como: tamanho do domínio, opção para aninhamento de grades, suas localizações, quantidade de pontos horizontais/verticais e os respectivos espaçamentos, o número de camadas de solo, o tempo de simulação, o comprimento do passo de tempo e a latitude/longitude do centro de cada grade usada.

A grade utilizada pelo BRAMS é alternada, do tipo C de Arakawa (Messinger e Arakawa, 1976), em que as variáveis termodinâmicas e de umidade são definidas nos mesmos pontos de grade, enquanto que as componentes u , v e w do vento são intercaladas em $\Delta x/2$, $\Delta y/2$ e $\Delta z/2$, respectivamente (Figura 3.1).

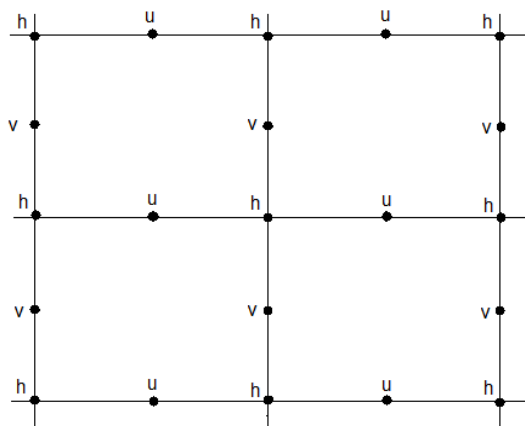


Figura 3.1 - Grade do tipo C de Arakawa, onde h são as variáveis termodinâmicas; u é a componente zonal e v a componente meridional do vento.

Neste módulo também é escolhida a opção do sistema de coordenada vertical. A primeira é denominada σ_z , que é um sistema de coordenadas que acompanha o terreno (Trípoli e Cotton, 1982). A segunda coordenada vertical é conhecida como *shaved-ETA* (Tremback e Walko, 2004) que é uma grade cartesiana em que as células de grade interceptam a topografia. Esta última opção permite um melhor tratamento na discretização das variáveis em regiões de elevação do terreno (topografia).

MODEL_FILE_INFO

A segunda parte da *namelist* consiste das variáveis que controlam os dados de entrada e os dados de saída do modelo. Neste módulo é definido o tipo de condição inicial se homogênea (através do uso de uma sondagem) ou heterogênea (através do uso de análises como as fornecidas por modelos atmosféricos de domínio global). No capítulo 4 é feita uma descrição das análises usadas como condições iniciais neste trabalho. Os parâmetros relacionados ao *nudging* lateral, vertical e central, que representam a influência das análises de modelo global nas simulações do BRAMS também são especificados neste módulo. A frequência dos arquivos de saída do modelo, os caminhos de localização dos arquivos de topografia, de temperatura da superfície do mar e dos tipos de vegetação e solo também são escolhidos neste módulo, assim como é especificada a forma em que essas variáveis serão adotadas e usadas durante a simulação.

MODEL_OPTIONS

Este módulo especifica a maioria das parametrizações físicas usadas no modelo. São definidas as opções como os tipos de condição de fronteira lateral (Klemp-Wilhelmson, Klemp-Lilly, Orlanski e cíclica) e a parametrização da radiação com quatro opções: Chen-Cotton, Mahrer-Pielke, Harrington e CARMA. As parametrizações de cúmulos rasos e microfísica de nuvens também são definidas neste módulo, além da parametrização da convecção com as seguintes opções: Ensemble, Grell, Low Level Omega, Moisture Convergence, Fritsch-Chappel ou Kain-Fritsch e Arakawa-Schubert.

São disponibilizadas 12 opções de solo, 21 tipos de vegetação, além da escolha dos níveis de profundidade do solo e da quantidade inicial de umidade para cada camada do solo.

Neste módulo é feita a escolha das parametrizações dos coeficientes de difusão turbulenta na horizontal e na vertical que estão disponíveis em quatro opções: Deformação horizontal/Vertical Mellor-Yamada, Deformação Anisotrópica (diferença vertical e horizontal), Deformação Isotrópica (horizontal e vertical iguais) e Deardorff TKE (horizontal e vertical iguais).

MODEL_SOUND

Nesta quarta parte da *namelist* é especificado o perfil vertical da atmosfera por meio de radiossondagem. Este módulo somente é usado se a simulação for horizontalmente homogênea.

MODEL_PRINT

Este módulo está relacionado com a impressão de resultados para verificação durante a simulação.

ISAN_CONTROL

Neste módulo da análise isentrópica são definidos os arquivos que serão utilizados para a inicialização heterogênea. Neste tipo de inicialização é possível a assimilação de dados em três formas: dados de superfície, dados de sondagens e os dados de análises dos modelos globais. São especificados os caminhos de localização dos arquivos de dados observacionais de superfície e de ar superior e das análises dos modelos globais, usados como condições iniciais e de contorno (Cabral, 2008). Para a assimilação de dados de estações de superfície e de sondagens (opção não considerada

no presente trabalho) o BRAMS utiliza um método de análise objetiva, baseado no trabalho de Barnes (1964).

ISAN_ISENTROPIC

Neste estágio da análise isentrópica são definidos os parâmetros utilizados na assimilação de dados de superfície e de sondagem realizados na inicialização do modelo, como por exemplo, o número das estações excluídas na análise objetiva e a distância de separação mínima entre elas.

CATT_INFO

O módulo CATT_INFO acoplado na versão do BRAMS consiste das variáveis que controlam a ativação do modelo de emissão *Coupled Aerosol and Tracer Transport* (CATT) e especifica as variáveis necessárias para simulação. (Opção não utilizada no presente trabalho).

TEB_SPM_INFO

O módulo TEB_SPM_INFO também incluído nesta versão do BRAMS, consiste de variáveis que controlam a ativação do esquema de representação de áreas urbanas *Town Energy Budget* (TEB) e do modelo de emissão *Simple Photochemical Module* (SPM) que especifica as variáveis utilizadas neste caso específico de simulação. Detalhes da opção do esquema TEB são descritos no item 3.3.

3.2 - Modelo LEAF

O modelo BRAMS utiliza o modelo LEAF (*Land Ecosystem-Atmosphere Feedback model*) como condição de fronteira inferior, ou seja, neste modelo são tratados os diferentes tipos de uso do solo.

O LEAF é um modelo de Transferência de Superfície-Atmosfera-Vegetação (SVAT) usado para descrever as trocas de calor e umidade, vegetação, dossel, superfície de água e atmosfera, em que faz uma representação dos aspectos da superfície, incluindo solo, cobertura de neve, lagos e oceanos. Também inclui equações para: índice de área foliar; temperatura do solo e umidade em múltiplas camadas; temperatura da vegetação e água na superfície; altura de rugosidade; cobertura vegetal e temperatura

e razão de mistura do vapor d'água do ar do dossel (Freitas, 2003). Este modelo também representa com detalhes as trocas turbulentas, transferência de radiação de onda curta e onda longa, evaporação, transpiração, precipitação, fluxos de calor e umidade entre o solo e a atmosfera, condução de calor, difusão de água e percolação nas camadas do solo (Walko *et al.*, 2000). O tipo de vegetação do LEAF é composto de uma combinação do esquema de Transferência Atmosfera e Biosfera (BATS) e o Sistema de Assimilação de Dados do Solo (LDAS), atualmente contando com 21 categorias diferentes de vegetação (Lei *et al.*, 2008).

De acordo com Gouvêa (2007) a implementação do LEAF no BRAMS traz a vantagem de permitir múltiplos tipos de superfície (floresta, grama, solo nu, por exemplo) dentro de uma mesma célula de grade, onde cada tipo de superfície ocupa uma fração da grade e é tratado separadamente. Uma outra vantagem do uso do LEAF é o baixo custo computacional quando comparado com a representação dos processos atmosféricos no modelo.

3.3 - Esquema TEB

O esquema TEB (*Town Energy Budget*) é utilizado para a representação das áreas urbanizadas, sendo proposto por Masson (2000) e introduzido inicialmente na versão 4.3 do RAMS por Rozoff *et al.* (2003) e Freitas (2003). O TEB é considerado como parte da parametrização de superfície num modelo atmosférico, pois em vez da representação usual de solo nu ou da modificação dos parâmetros da vegetação para uma representação de áreas urbanizadas como é o caso do modelo LEAF, o TEB utiliza uma geometria de *canyon* que considera três superfícies distintas (telhados, paredes e ruas) para representar o efeito das construções, permitindo o refinamento dos balanços radiativos bem com o fluxo de momentum, os fluxos turbulento de calor e os fluxos da superfície através de um tratamento fisicamente mais apropriado (Freitas, 2003). O esquema TEB funciona como uma sub-rotina do modelo LEAF, sendo acionado apenas para as células de grade em que são identificadas as áreas urbanas e permitindo, assim, a presença de áreas vegetadas dentro de uma célula de grade urbana (Freitas *et al.*, 2007).

O modelo de *canyon* foi proposto por Oke e colaboradores na década de 70, onde considera que uma rua é margeada por duas faces de paredes, sendo o espaço entre elas denominado *canyon*, como pode ser visto esquematicamente na Figura 3.2.

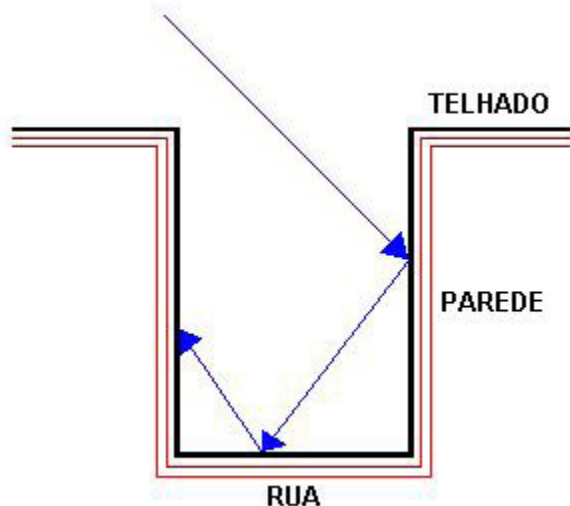


Figura 3.2 - Esquema da geometria de *canyon* utilizada no esquema TEB. As setas azuis representam as múltiplas reflexões a que estão sujeitos os raios solares incidentes no *canyon*. (Fonte: Gouvêa, 2007).

O esquema TEB é destinado a simular fluxos turbulentos dentro da atmosfera até a superfície de um modelo atmosférico de mesoescala coberto por edifícios, estradas, ou qualquer material artificial (Masson, 2000).

Devido à complexidade das superfícies de uma cidade, o esquema TEB considera uma temperatura representativa para cada uma das superfícies distintas (telhados, paredes e ruas), ao invés de aproximar uma única temperatura representativa de toda a superfície urbana, explicitando assim múltiplos balanços de energia (Masson, 2000).

De acordo com Masson (2000), o esquema TEB é destinado a parametrizar as interações dinâmicas e termodinâmicas entre a cidade e a atmosfera seguindo a hipótese de *canyons*, sendo necessário considerar características médias espacialmente e não levando em conta formas individuais das construções. Com isso, o esquema TEB segue algumas considerações das regiões urbanas a fim de permitir um esquema relativamente mais simples. Essas considerações são tratadas de três maneiras importantes:

- As construções possuem as mesmas dimensões (mesma altura e mesma largura) em um mesmo tipo urbano, sendo o nível dos telhados o nível de superfície do modelo;
- As construções são localizadas ao longo de ruas idênticas, cujo comprimento é considerado muito maior que a largura;

- Nenhuma discretização é feita com relação à orientação, de modo que qualquer orientação das ruas é possível e todas existem com a mesma probabilidade. Desta forma, são consideradas forçantes médias (com relação à posição do Sol e direção do vento) para superfícies de paredes e ruas.

Segundo Freitas (2003), paredes ensolaradas ou sombreadas são tratadas em conjunto uma vez que estas são idênticas para todos os processos físicos, com exceção da radiação solar direta.

Informações mais detalhadas sobre a descrição do esquema TEB, tais como o tratamento dos fluxos de condução para/do interior das construções (telhados ou paredes) ou solo (ruas), evolução dos reservatórios de água, aprisionamento de radiação de onda longa e outras características do esquema TEB podem ser verificadas em Masson (2000) e Freitas (2003).

Muitos trabalhos científicos estudaram o uso do esquema TEB e os benefícios da utilização deste esquema na representação das áreas urbanas. Alguns exemplos desses trabalhos são listados abaixo.

Masson *et al.* (2002) avaliaram o esquema TEB usando medidas diretas da temperatura da superfície e os fluxos de balanço de energia para duas áreas distintas: o centro histórico da cidade de México e o centro industrial de Vancouver (Canadá). Os dados na cidade do México foram coletados num período de 7 dias durante a estação seca em dezembro de 1993. A área de estudo do México é localizada num centro histórico cujas construções são principalmente institucionais e comerciais. Na cidade de Vancouver os dados foram coletados no centro industrial no período estendido de seca durante 15 dias de agosto de 1992. Esta área é caracterizada por construções de telhados planos, com a maioria das construções feitas de concreto e as estradas constituídas de asfalto e concreto. Nas duas áreas os instrumentos foram montados em níveis acima da superfície do solo para garantir que as medições representassem a escala local. Na cidade do México e Vancouver, os equipamentos foram colocados, respectivamente, a 28,4 m e 28,5 m acima do solo. Em ambos os casos, as técnicas de covariância foram usadas para medir os fluxos turbulentos e radiômetros foram usados para determinar o balanço de radiação total. Na cidade do México, a temperatura da superfície do telhado e das estradas foram medidas por termômetros de infravermelho. Em Vancouver, a temperatura da superfície de 4 paredes, os telhados e as estradas foram medidos usando instrumentos similares. Além disso, medições de infravermelho feitas por aviões foram realizadas na área de Vancouver durante um dia em três tempos diferentes: manhã,

metade e fim da tarde. Estas medições fornecem as temperaturas da superfície para cada tipo de face das paredes, telhados e estradas na escala local.

Os resultados para a cidade do México, caracterizada por grandes *canyons* urbanos e paredes de pedra, mostraram que a evolução diurna da temperatura da superfície da estrada e da parede é adequadamente reproduzida pelo TEB. Contudo, a temperatura do telhado do TEB mostra amplitudes maiores que as medições feitas pelos instrumentos dos telhados. Isto pode ser devido ao grande armazenamento do calor no telhado pelo TEB ou especificações incorretas do material. Na análise dos fluxos de energia na escala local da cidade do México, observou-se que o TEB é capaz de reproduzir muito bem o comportamento dos fluxos na área central da cidade. Na área de Vancouver o TEB simulou a amplitude da temperatura do telhado menor que o observado, reproduzindo de forma geral o padrão de resfriamento noturno. Na cidade de Vancouver, os autores verificaram que algumas vezes o TEB concorda melhor com os dados medidos pelos aviões no período da manhã e da noite, subestimando a medição no período da tarde. Na comparação da temperatura da parede e das estradas, verificou-se uma boa concordância entre as medições de temperatura e os valores do TEB. Na avaliação do fluxo de energia na escala local de Vancouver foi observado que o TEB reproduz adequadamente o balanço de radiação total durante todo o período.

Análises de sensibilidade foram realizadas com o objetivo de verificar a habilidade do esquema TEB em reproduzir as maiores características das trocas de energia entre atmosfera-superfície. Nesta análise de sensibilidade concluiu-se que o TEB é bastante robusto para as condições consideradas, além de observar que os resultados das simulações do TEB são mais sensíveis às características do telhado e da radiação solar. Os autores ressaltam que o esquema TEB em ambas as áreas simulou adequadamente o balanço de radiação, a temperatura nas superfícies e a partição entre os fluxos turbulentos e o fluxo de calor armazenado.

Rozzof *et al.* (2003) analisaram a relação do uso do solo com a ocorrência de tempestades severas com grandes quantidades de chuvas sobre a área urbana na região de St. Louis (Missouri) observadas em 8 de junho de 1999. Para explicar a convecção acentuada sobre a área urbana foram realizadas simulações utilizando o modelo RAMS versão 4.3 com o modelo LEAF2 e o esquema TEB. Foram empregadas três grades aninhadas centradas sobre St. Louis com resolução de 37,5 km, 7,5 km e 1,5 km, com cerca de 40 níveis sigma na vertical e altura do topo do modelo de 22 km. O RAMS foi inicializado com as análises do Sistema de Assimilação de Dados do modelo ETA

(EDAS). Os arquivos de uso e cobertura do solo foram baseados do *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) do USGS com resolução de 1 km. Os resultados das comparações da temperatura do ar e da temperatura do ponto de orvalho entre as observações, as simulações do LEAF2 e as simulações do TEB (simulação de controle) mostram que a presença do TEB reduz os valores de ambas as variáveis. Entretanto, observou-se que a curva de temperatura da simulação de controle é mais acurada com a observação do que a simulação com o LEAF2. Os autores concluíram que a simulação de controle (simulação com o TEB) representou satisfatoriamente o desenvolvimento da ICU e da convecção. As diferenças nos comportamentos do efeito da ilha de calor urbana e do início da convecção são grandes entre as duas simulações com os esquemas urbanos, o TEB e o LEAF2. A simulação com o LEAF2 produz correntes descendentes da tempestade 1 hora mais cedo que a simulação com o esquema TEB. Os autores mostraram que a circulação da ICU tem um grande papel na iniciação da tempestade, a zona de convergência forma vento descendentes na cidade, conduzindo a movimento vertical suficiente para forçar a tempestade.

Vendrasco *et al.* (2004) utilizaram o modelo RAMS acoplado com o esquema TEB para verificar o impacto causado pelas diferentes propriedades das construções, como o albedo e a emissividade da superfície sobre o ciclo diurno de temperatura. Na simulação foi utilizada uma grade com espaçamento horizontal de 16 km, como condição inicial foram usadas as análises do modelo global do CPTEC de espaçamento horizontal 1,875° e séries de dados relativas às estações automáticas de superfície. Foram inicialmente feitos dois experimentos, sendo em cada um deles realizadas 4 simulações que tiveram como diferencial os valores de albedo e emissividade das superfícies envolvidas (paredes). Um terceiro experimento foi realizado para verificar os efeitos da mudança do albedo das superfícies das ruas e paredes, mantendo a emissividade típica para cada uma dessas superfícies.

Os resultados do acoplamento entre o modelo RAMS com o esquema TEB no experimento 1 mostraram que a alteração do albedo padrão para o correspondente a superfícies brancas acarreta em uma redução na temperatura de aproximadamente 1,5 °C no horário de máxima temperatura. Por outro lado, durante a noite a alteração é bem menos significativa, uma vez que o albedo exerce maior influência quando em presença de ondas eletromagnéticas que estão dentro do espectro solar (onda curta). No experimento 2, foi analisado o uso do albedo de superfícies pretas ao invés de uma parede branca. Para este experimento verificou-se uma contribuição positiva para a

temperatura máxima, apesar desta contribuição ser bem menor que aquela obtida no experimento 1. Neste caso, o resultado mostra que a diminuição do albedo acarreta em um aumento na temperatura, indicando que o albedo teve papel mais significativo no horário de máxima temperatura, porém sua influência é bem menor que aquela obtida no experimento 1. Para este caso, acarreta em um aumento de temperatura de aproximadamente 0,3 °C no horário de máximo. No experimento 3, a emissividade foi mantida constante e foi incluído o efeito das ruas na variação de temperatura quando há mudança do albedo. Os resultados mostraram que a mudança do albedo típico da rua para o albedo de superfícies pretas não ocasiona em mudanças significativas, já que os valores de albedo são muito próximos, assim o esperado é que a contribuição da mudança do albedo da rua na mudança de temperatura seja próximo de zero.

Lei *et al.* (2008) investigaram a relação da representação explícita de uma superfície urbana na simulação de um evento de chuva forte que ocorreu sobre Mumbai na Índia em 26 de junho de 2005. Os autores tinham três objetivos principais:

- ✓ verificar se com o uso do modelo de balanço de energia na superfície urbana (TEB) poderia representar as interações do solo-atmosfera e melhorar as simulações de eventos de fortes chuvas;
- ✓ verificar se a distribuição e intensidade da precipitação seria significativamente alterada devido ao uso da área urbana; e
- ✓ verificar se o efeito de urbanização nos casos de fortes precipitações ocorre em escalas locais relativamente próximas a região urbana e se a precipitação em grande escala é influenciada pelo campo de temperatura da superfície do mar (TSM).

O modelo RAMS versão 4.3 foi utilizado com 3 grades aninhadas de 80 km, 20 km e 5 km centradas no mesmo ponto, com 36 níveis verticais e altura do topo do modelo de 15 km. O modelo foi inicializado com dados das análises do *National Center for Environmental Prediction* (NCEP). Testes de sensibilidade foram feitos utilizando dados climatológicos de TSM disponíveis no RAMS 4.3 entre os períodos de 1950 a 1980, os quais foram comparados com os dados de TSM do *Tropical Rainfall Measurement Mission* (TRMM). Os resultados mostraram que a região urbana provoca uma ICU sobre a região de Mumbai, onde se observou que os efeitos urbanos quando interagidos com a TSM causa sobre a área urbana um zona de convergência de mesoescala. Esta zona de convergência é a razão principal da ocorrência do transporte de umidade e das fortes chuvas.

Um fator de separação estatística foi utilizado com o objetivo de verificar os fatores que têm o maior papel na geração da convecção: o modelo urbano ou as informações de TSM. A intenção da análise do fator de separação é quantificar o impacto relativo da representação da área urbana com o uso do TEB, da inclusão dos dados de satélite de TSM e do uso do modelo urbano como os dados de TSM, para a explicação das fortes chuvas. A análise mostrou que somente a representação da área urbana não é a principal razão para as fortes chuvas, mas sim a combinação dos campos de TSM com os dados do TRMM e os efeitos urbanos simulados pelo TEB, que criam um gradiente realístico para manter a zona de convergência sobre Mumbai. Os autores ressaltam que as simulações do RAMS acoplados com o esquema TEB apresentam consistentemente um grande desempenho.

CAPÍTULO 4

4 - METODOLOGIA

Neste capítulo é feita uma descrição das opções utilizadas no modelo BRAMS, dos dados das estações de superfícies e dos métodos estatísticos empregados na análise dos resultados. Inicialmente, é feita uma descrição da Região Metropolitana do Rio de Janeiro.

4.1 - Características da Região Metropolitana do Rio de Janeiro

A Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) é composta por 17 municípios como mostrado na Figura 4.1: Rio de Janeiro, Belford Roxo, Duque de Caxias, Guapimirim, Itaboraí, Japeri, Magé, Nilópolis, Niterói, Nova Iguaçu, Paracambi, Queimados, São Gonçalo, São João de Meriti, Seropédica, Mesquita e Tanguá. A RMRJ limita-se a leste pela Baía de Guanabara, a oeste pela Baía de Sepetiba, ao norte pela Serra da Mantiqueira e ao sul é banhada pelo Oceano Atlântico. Sua área territorial é de 5.645 km^2 , abrigando uma população de mais de 11.902.701 milhões de habitantes (IBGE/2008), em sua maioria de baixa renda concentradas principalmente em núcleos urbanos e carentes de infra-estrutura sanitária. Nesta paisagem faz-se presente um acelerado processo de desmatamento, degradação e assoreamento dos rios e canais, bem como a poluição de suas águas devido à falta de esgotamento sanitário, destruição dos solos com exploração de areia/areola para construção, pedreiras ativas ou abandonadas, asfalto e concreto, materiais utilizados na construção civil, capazes de armazenar e converter a radiação solar incidente em calor sensível. Estes problemas constituem-se em limites que comprometem a qualidade de vida das populações instaladas (Moura *et al.*, 1998).

A RMRJ apresenta uma paisagem contrastante com variada cobertura de vegetação e diversidade no uso do solo, como visto nas Figuras 4.2 e 4.3. De acordo com Farias (2007), na RMRJ podem ser encontrados dois domínios fisiográficos principais: as montanhas e as baixadas. O relevo montanhoso engloba os maciços

litorâneos (Tijuca, Pedra Branca e Gericinó-Mendanha), as serras, os morros isolados e as ilhas oceânicas; enquanto que as áreas de amplas baixadas (Guanabara, Jacarepaguá e Sepetiba) correspondem a 75% de seu território. Estes relevos, além de serem responsáveis pela fragmentação da cidade, criam diversos micro-climas naturais que influenciam a ventilação e os mecanismos de transportes e dispersão de poluentes atmosféricos, além de influenciarem nas grandes vias de circulação que orientam a expansão urbana.

Nas áreas elevadas dos Maciços da Pedra Branca e Gericinó-Mendanha, tem-se uma mudança nas composições vegetais. Nos maciços originalmente ocupados por uma densa cobertura de Floresta Atlântica atualmente ainda resta uma porção desta vegetação, apesar do desmatamento causado pelas atividades agro-pastoris e queimadas para a plantação de bananeiras. Além disso, as pedreiras também fazem parte dos fatores de degradação ambiental, onde representam uma das principais atividades econômicas da área e estão localizadas ao longo de todas as vertentes desses maciços, causando grandes impactos ambientais e estabelecendo uma relação pouco harmoniosa com a crescente urbanização. O Maciço da Tijuca ocupa uma área de 195 km^2 e apresenta uma orientação paralela a linha da costa, o que acarreta na divisão da cidade em duas zonas distintas no que diz respeito aos índices pluviométricos (a zona sul - com maior umidade e temperaturas amenas, e a zona norte – menos úmida e mais quente) e conseqüentemente pelos padrões de ocupação. Nas baixadas interiores se verifica a presença de construções como casas, prédios e indústrias (Russo, 2002; Farias 2007).



Figura 4.1 - Composição dos municípios da RMRJ. (Fonte: Fundação Centro de Informações e Dados do Rio de Janeiro [http://www.zonu.com/brazil_maps/Metropolitan Region Map Rio Janeiro State Brazil 2.htm](http://www.zonu.com/brazil_maps/Metropolitan_Region_Map_Rio_Janeiro_State_Brazil_2.htm)).



Figura 4.2 - Visão topográfica da região contendo a RMRJ. (Fonte: Moraes, 2008).

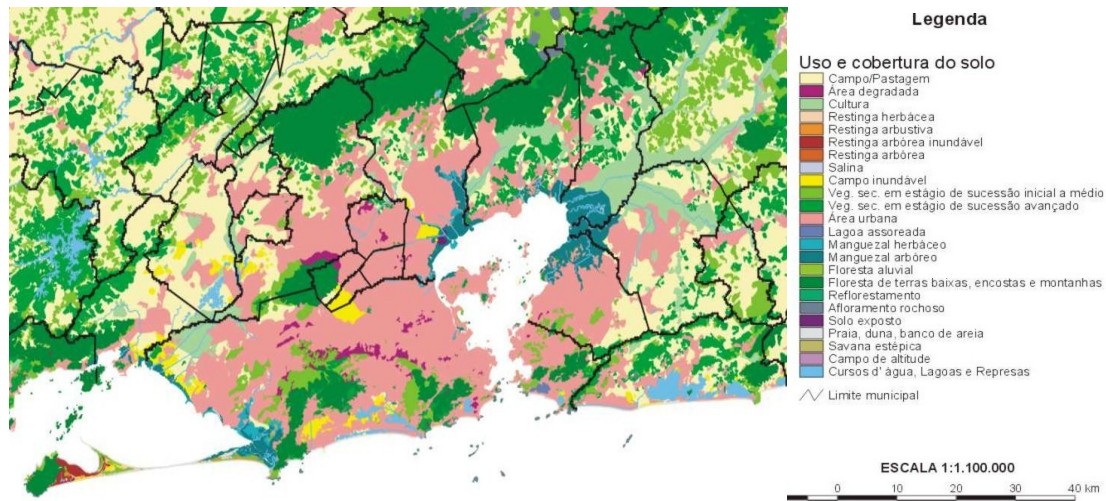


Figura 4.3 - Uso e cobertura do solo em região que abrange a RMRJ. (Fonte: Fundação Centro de Informações e Dados do Rio de Janeiro http://www.zonu.com/brazil_maps/Rio_Janeiro_States_Land_Use_Ground_Cover_Map_Brazil.htm).

4.2 - Domínios utilizados nas simulações

No presente estudo, foram utilizados três domínios nas simulações com o BRAMS, sendo o primeiro com maior espaçamento horizontal e abrangendo uma área maior e dois outros domínios aninhados, com decaimento de espaçamento entre pontos de grade na razão 4:1. Portanto, as três grades aninhadas possuem espaçamento horizontal entre pontos de grade de 16 km, 4 km e 1 km para os domínios 1, 2 e 3, respectivamente (Figura 4.4). Na vertical, foram utilizados 49 níveis em coordenadas sigma-z, com um espaçamento inicial de 20 m próximo à superfície e uma amplificação por um fator de 1,1 até a altura de 1000 m (grade telescópica) para permitir um melhor detalhamento da Camada Limite. Acima de 1000 m, o espaçamento permaneceu constante e igual a 1000 m. As características dos domínios horizontais e das configurações do modelo BRAMS utilizadas nas simulações são mostrados respectivamente nas Tabelas 4.1 e 4.2.

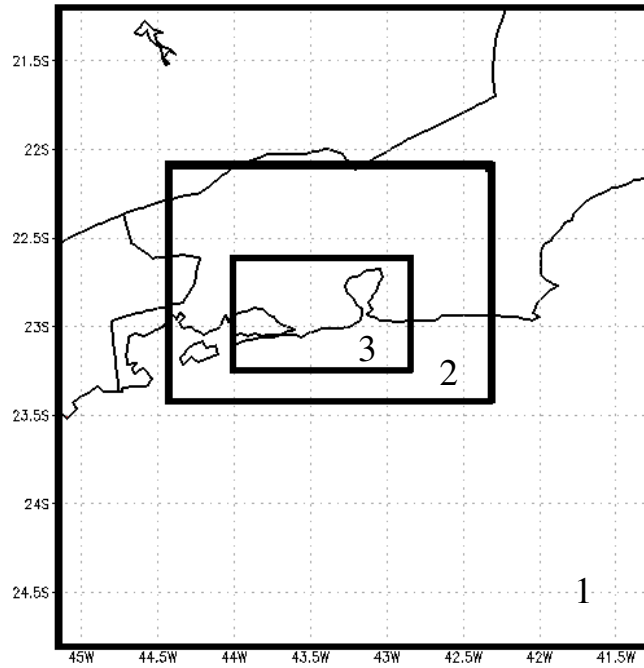


Figura 4.4 – Domínios 1, 2 e 3 utilizados nas simulações com o modelo BRAMS.

Tabela 4.1- Configuração horizontal dos domínios utilizados nas simulações.				
Domínio	Δx e Δy (km)	Δt (s)	Pontos em x e y	Centro do Domínio (°) (Latitude/Longitude)
1	16	40	26x 26	-23.0/-43.2
2	4	10	58 x 38	-22.85/-43.4
3	1	2,5	126 x78	-22.9/-43.4

Tabela 4.2 - Configurações do modelo BRAMS utilizada nas simulações.	
Número de pontos na região de fronteira lateral utilizados para <i>nudging</i>	5
Escala de tempo de <i>nudging</i> nas fronteiras laterais	1800 s
Escala de tempo de <i>nudging</i> no topo do domínio	10800 s
Escala de tempo de <i>nudging</i> no centro do domínio	Desativada
Condição de Fronteira lateral	Klemp e Wilhelmson (1978)
Parametrização de radiação de onda curta/longa	Chen e Cotton (1983)
Frequência de atualização na tendência da radiação	1800 s
Parametrização de Cúmulos	Grell e Devenyi (2002) Ativada nos domínios 1 e 2
Parametrização de Cúmulos Rasos	Ativada (domínios 1 e 2)
Microfísica	Nível 3
Numero e níveis das camadas no solo	4 camadas -2.0 m, -1.50 m, -0.25 m, -0.05 m
Grau de saturação nas camadas de solo	0.50, 0.40, 0.30, 0.25
Parametrização Turbulenta	Deformação Horizontal Esquema de Mellor e Yamada (1974, 1982)
Tipo de solo Homogêneo	3 – sandy loam (solo barro arenoso, ou, barro com alto teor de areia)

4.3 - Arquivos de ocupação do solo e topografia

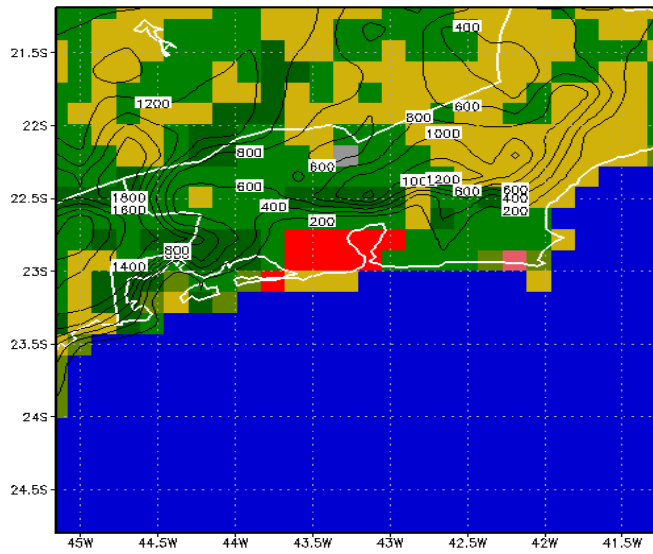
Nas simulações deste trabalho foram usados arquivos de topografia com resolução de 200 m, gerados a partir de dados de elevação digital de 90 metros do Shuttle Radar Topography Mission - SRTM (Missão Topográfica por Radar de Ônibus Espacial).

Os parâmetros de ocupação do solo (vegetação, construções, corpos d'água e solo nu) utilizado neste trabalho foram obtidos do programa IGBP (*International Geosphere Biosphere Programme*) disponível do USGS (*United States Geological Survey*), com resolução de 30 segundos de arco (aproximadamente 1 km na região equatorial), com diferentes tipos de vegetação, plantações, corpos d'água, entre outros. A partir deste mapa o modelo numérico faz uma conversão para a sua própria

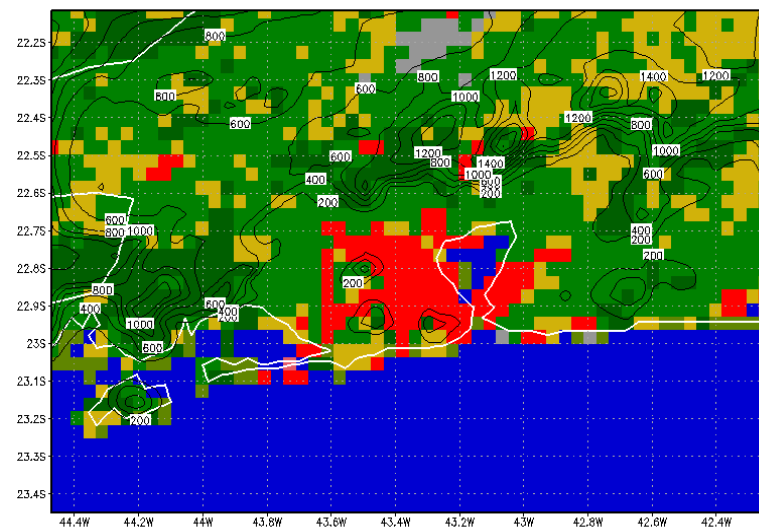
codificação de tipos de ocupação do solo (Tabela 4.3). A Figura 4.5 apresenta a distribuição horizontal para cada tipo de ocupação do solo nos três domínios usados. Nota-se que em todos os domínios a área urbana da Região Metropolitana do Rio de Janeiro é representada pela cor vermelha.

Tabela 4.3 – Codificação dos tipos de superfície, baseado na base de dados do USGS.

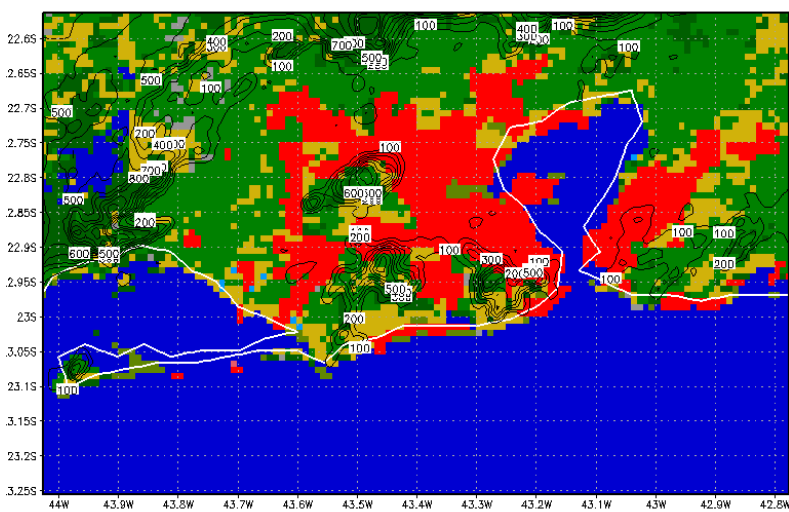
Código	Tipo de superfície	Código	Tipo de superfície
0	Ocean	11	Tundra
1	Lakes, rivers, streams	12	Evergreen shrub
2	Ice cap/glacier	13	Deciduous shrub
3	Desert, bare soil	14	Mixed woodland
4	Evergreen needleleaf tree	15	Crop/mixed farming, C3 grassland
5	Deciduous needleleaf tree	16	Irrigated crop
6	Deciduous broadleaf tree	17	Bog or marsh
7	Evergreen broadleaf tree	18	Wooded grassland
8	Short grass	19	Urban and built up
9	Tall grass	20	Wetland broad leaf tree
10	Semi-desert		



(a)



(b)



(c)



Figura 4.5 – Tipo de uso do solo (colorido) e contornos da topografia para os domínios (a) 1, (b) 2 e (c) 3, com espaçamentos horizontais de 16 km, 4 km e 1 km, respectivamente.

4.4 - Dados meteorológicos e período do estudo

Para avaliar as simulações do modelo BRAMS foram usados dados das estações meteorológicas convencionais dos aeródromos (código METAR) e de estações meteorológicas automáticas de responsabilidade do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e do Instituto Estadual do Ambiente - INEA (antiga Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente - FEEMA) listados de acordo com a Tabela 4.4 e distribuídos espacialmente de acordo com a Figura 4.6.

Tabela 4.4 - Informações das estações convencionais dos aeroportos e das estações automáticas. (Fontes: REDEMETS - <http://www.redemet.aer.mil.br/>, INMET- <http://www.inmet.gov.br/> e FEEMA - <http://www.feema.rj.gov.br/>).

Nº	Nome	Município	Indicador	Lon/Lat (°)	Altitude (m)	Fonte
1	Aeroporto Antonio Carlos Jobim (Galeão)	Rio de Janeiro	SBGL (83746)	43.215°W, 22.815° S	9	REDEMETS
2	Aeroporto Santos Dumont	Rio de Janeiro	SBRJ (83755)	43.165°W, 22.915° S	3	REDEMETS
3	Aeroporto Campo Délio Jardim de Mattos (Afonso)	Rio de Janeiro	SBAF (83748)	43.375°W, 22.86° S	34	REDEMETS
4	Base Aérea de Santa Cruz	Rio de Janeiro	SBSC (83115)	43.715°W, 22.932° S	3	REDEMETS
5	Automática da Marambaia	Rio de Janeiro	A602	43.595°W, 22.049° S	9,7	INMET
6	Automática de Jacarepaguá	Rio de Janeiro	A654	43.365°W, 22.986° S	3	INMET
7	Automática de Ecologia Agrícola	Rio de Janeiro	A601	43.685°W, 22.797° S	34	INMET
8	Automática de Nova Iguaçu	Nova Iguaçu	Informação não disponível	43.425°W, 22.752° S	Informação não disponível	FEEMA
9	Automática de Copacabana	Rio de Janeiro	A652	43.195°W, 22.986° S	45	INMET

Tabela 4.4- Continuação.

10	Automática de Niterói	Niterói	A605	43.125°W, 22.915° S	13	INMET
11	Automática de Jacarepaguá	Rio de Janeiro	Informação não disponível	43.366°W, 22.933° S	Informação não disponível	FEEMA

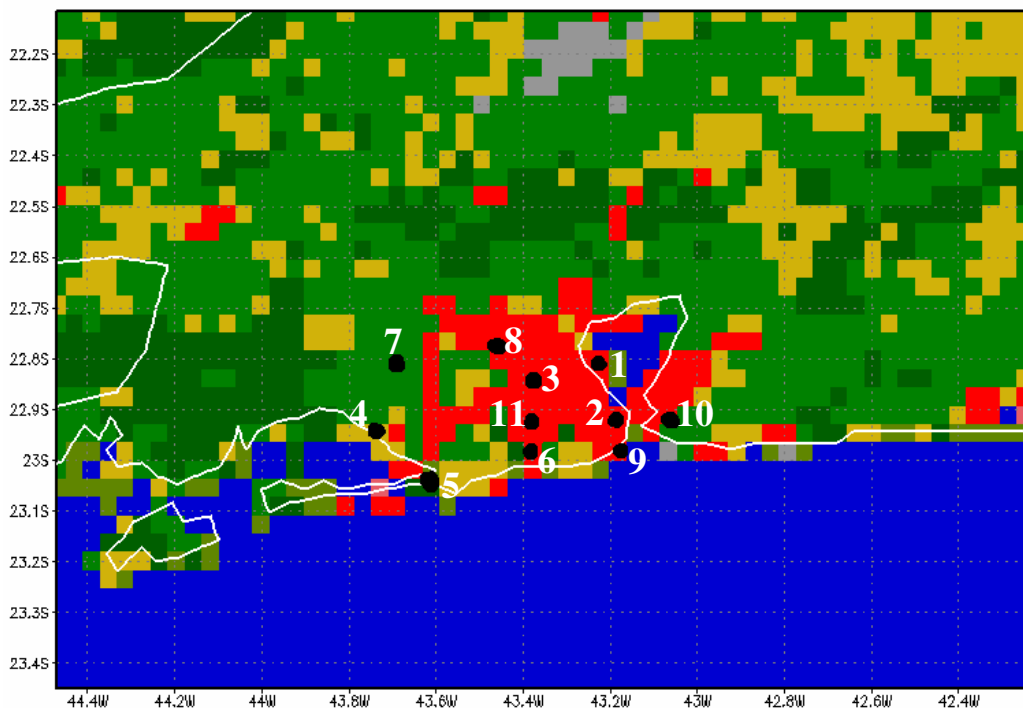


Figura 4.6 - Distribuição espacial das estações meteorológicas numeradas de acordo com a Tabela 4.4.

A definição do período de estudo no presente trabalho tem como referência o trabalho de Moraes (2008), o qual avaliou as condições sinóticas referentes ao mês de setembro de 2007. A partir das análises das Cartas Sinóticas do Serviço Meteorológico Marinho (SMM) do Centro Hidrografia da Marinha, das imagens de satélite do canal infravermelho do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) e dos dados de Reanálise do NCEP, o autor verificou que entre os dias 04 e 12 de setembro houve a atuação predominante da Alta Subtropical do Atlântico Sul sobre a RMRJ (Figura 4.7) com a presença bem estabelecida de uma Ilha de Calor Urbana. Uma

descrição sinótica detalhada do período mencionado é feita naquele trabalho. O predomínio da ASAS no referido período proporcionou ciclos diários de temperatura do ar bem definidos com pouca interferência da nebulosidade. Além disso, foi verificado que os ventos fracos de Nordeste oriundos da circulação da ASAS favoreceram o desenvolvimento da ICU, pois ventos fortes misturam o ar das regiões urbanas com o ar das regiões suburbanas e rurais. Baseando-se nos argumentos acima expostos, o presente trabalho destaca os dias 05 e 09 de setembro de 2007 para o estudo da ICU e sua relação com a circulação de brisa na RMRJ. A abordagem de estudo da ICU no presente trabalho difere de Moraes (2008) no que diz respeito ao modelo atmosférico adotado e ao tratamento diferenciado da superfície urbana, sendo utilizado, portanto, o modelo BRAMS juntamente com o esquema TEB.

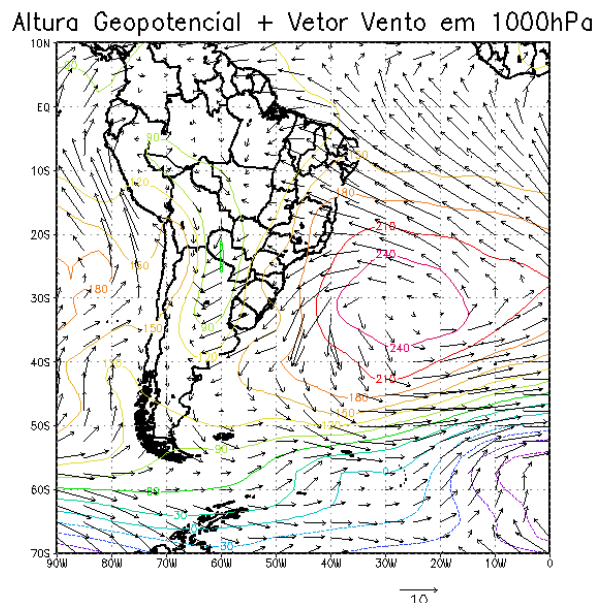


Figura 4.7 – Média da altura geopotencial e vetor vento em 1000 hPa entre os dias 04 e 14 de setembro de 2007 às 00Z. (Fonte: Moraes, 2008).

4.5 - Análises utilizadas como condições iniciais e de contorno

Por ser o BRAMS um modelo de área limitada, este precisa receber informação no contorno lateral decorrentes de uma escala atmosférica maior durante as simulações. Além disso, uma condição inicial da atmosfera também é necessária. Tipicamente, essa informação é provida a partir de modelos globais. Uma das etapas desse trabalho é verificar se os resultados das simulações sofrem influência significativa dessas informações no contorno lateral, tendo em vista a diferença entre modelos globais e suas

respectivas resoluções espaciais. Dessa forma, foram realizadas três simulações com o BRAMS, provendo o modelo na condição inicial e em seu contorno lateral a partir de informações da escala sinótica em intervalos de 6 h decorrentes de três fontes distintas. São elas:

1º) Análise do modelo ETA com espaçamento horizontal de 20 km;

2º) Análise do modelo Global do CPTEC com espaçamento horizontal aproximada de 45 km;

3º) Reanálise do NCEP com espaçamento horizontal aproximada de 250 km (2,5x 2,5 graus lat/lon).

As análises do modelo Global do CPTEC (T299) utilizadas neste trabalho, são provenientes das análises do NCEP T362 (espaçamento de 34 km) que é degradada para os pontos de grade do modelo Global-CPTEC (espaçamento de 45 km). Para as análises do ETA de 20 km, utilizam-se interpolações a partir do modelo Global T213 do CPTEC (espaçamento de 63 km), sendo este último um campo degradado da análise do NCEP T362.

4.6 - Descrição dos testes estatísticos

Nos estudos com modelos atmosféricos verificam-se incertezas, que podem ser decorrentes da representação dos processos físicos no modelo ou mesmo da precisão utilizada nos cálculos.

Para avaliar o desempenho do modelo BRAMS alguns testes estatísticos foram realizados a fim de verificar a qualidade dos comportamentos físicos previstos e verificar qual é a concordância com os dados da observação. Os testes estatísticos usados para avaliar a destreza do modelo são descritos a seguir.

Coefficiente de Correlação (R): este índice estatístico permite avaliar o grau de correlação entre os valores simulados pelo modelo (“P”) e os valores observados (“O”),

além de verificar se essa correlação é positiva ou negativa. Portanto, o coeficiente de correlação mostra a associação linear entre duas variáveis. Altas correlações indicam um bom acordo entre as fases das oscilações, ou seja, as variações ocorrem num mesmo sentido simultaneamente.

Apesar das correlações fornecerem uma boa informação sobre a relação linear entre as simulações e as observações, a desvantagem do uso deste teste é que ele não considera os desvios que podem estar presentes na previsão, além de não ser capaz de identificar a acurácia das simulações (Freitas e Silva Dias, 2002).

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} = \frac{\text{cov}(P, O)}{\sqrt{\text{var}(P) \cdot \text{var}(O)}} = \frac{\text{cov}(P, O)}{\sigma_P \cdot \sigma_O}$$

Sendo,

$\bar{P} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n P_i$ é a média aritmética dos valores simulados pelo modelo;

$\bar{O} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n O_i$ é a média aritmética dos valores observados;

σ_P e σ_O são os desvios padrões de valores previstos e valores observados, respectivamente.

Este teste estatístico assume valores entre -1 e 1, sendo:

- $R = 1$ Significa uma correlação perfeita positiva entre a observação e o simulado.
- $R = -1$ Significa uma correlação negativa perfeita entre a observação e o simulado. Isto é, as variações ocorrem no sentido oposto. Se uma aumenta, a outra sempre diminui.
- $R = 0$ Significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra. No entanto, pode existir uma dependência não linear. Assim, o resultado deve ser investigado por outros testes estatísticos.

Erro médio (ME): é a diferença entre a média das simulações e a média das observações. Representa a média dos desvios (“*bias*”) da simulação, fornecendo informações sobre o desempenho de toda a série de simulações e não informações sobre

erros individuais. Este teste estatístico indica se o modelo está subestimando ou superestimando as observações e não representa uma medida de acurácia.

Valores positivos ($ME > 0$) indicam que as simulações estão superestimando as observações e valores negativos ($ME < 0$) indicam que as simulações em média estão subestimando as observações.

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) = \bar{P} - \bar{O}$$

Erro Quadrático Médio (MSE): este teste estatístico é usado para medir a acurácia das simulações, informando a maneira com que o valor estimado pelo modelo se aproxima do valor observado. Assim, neste índice é verificado o grau de espalhamento obtido na correlação entre os valores simulados e observados.

Altos valores de MSE indicam um alto nível de discrepância entre a simulação e a observação e valores baixos indicam pouca discrepância entre a simulação e a observação. Neste trabalho será utilizada a raiz quadrada do MSE (RMSE), que é considerada como a magnitude típica dos erros das simulações e tem as mesmas dimensões dos valores simulados pelo modelo (“P”) e dos valores observados (“O”).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2; \quad RMSE = \sqrt{MSE} .$$

CAPÍTULO 5

5 – RESULTADOS

Nesta seção é feita uma análise dos resultados obtidos com as simulações do modelo BRAMS na versão 4.2. A apresentação dos resultados é dada na seguinte forma:

SIMULAÇÕES COM DOIS DOMÍNIOS: espaçamento horizontal de 16 km e 4 km para as grades G1 e G2, respectivamente. Neste trabalho será adotada somente a simulação com os domínios G1 e G2. A simulação com três domínios aninhados apresentou resultados prejudicados devido à produção de precipitação no domínio G3 de espaçamento de 1 km.

Seção 5.1 – Comparação de três condições iniciais e de contorno

- Avaliação das condições iniciais e de contorno ETA, Global-CPTEC e Reanálise sem o uso do TEB, a partir da análise de séries temporais de temperatura do ar e aplicação de testes estatísticos;

Seções 5.2 e 5.3 – Testes de sensibilidade considerando o uso do esquema TEB

- Avaliação do efeito da umidade do solo no campo de temperatura da RMRJ através de simulações realizadas com esquema TEB para três perfis de umidade de solo (solo seco, solo controle e solo úmido);

- Testes de parâmetros do TEB com alterações na altura das construções e nos fluxos de calor para fontes veiculares e industriais;

Seção 5.4 – Avaliação da ICU na RMRJ através de simulações com e sem o uso do TEB

- Análise de temperatura e vento com e sem TEB (distribuição horizontal, seções verticais e meteogramas).

5.1 – Avaliação dos resultados da modelagem utilizando as análises do ETA, Global-CPTEC e Reanálise-NCEP

A comparação da evolução temporal da temperatura do ar para as simulações com as análises do ETA, Global e Reanálise são mostradas na Figura 5.1. Testes estatísticos foram feitos a partir das séries temporais de temperatura do ar no período de 05 a 09 de setembro. Para a análise pontual dos valores de temperatura são utilizados os pontos de grade mais próximos das onze estações meteorológicas mencionadas no capítulo anterior. Isto ocasiona uma fonte de erro em decorrência dos dados obtidos pela modelagem não corresponderem ao ponto real das observações. O Apêndice A mostra a Tabela que relaciona os pontos reais das estações meteorológicas e os pontos correspondentes usados no modelo. Para a comparação das três simulações com as análises do ETA, Global e Reanálise foi utilizado o domínio horizontal de espaçamento de 4 km (G2) para o segundo nível do modelo (30,7 metros). Os resultados mostram que as simulações com as diferentes condições iniciais e de contorno reproduzem satisfatoriamente a amplitude e a fase do ciclo diurno. De maneira geral, as três simulações representam de forma mais adequada à fase dos máximos de temperatura do que a fase das mínimas, pois existe uma ligeira tendência em atrasar a representação das temperaturas mínimas. Outro aspecto destacado é que a amplitude das temperaturas máximas simuladas representa melhor as observações do que a amplitude dos valores mínimos. Em geral, observa-se que as simulações superestimam as temperaturas mínimas. Por outro lado, na simulação com a análise do Global verifica-se a tendência das temperaturas mínimas serem mais próximas das observações.

Na análise entre as onze estações, a que apresenta a maior dificuldade de representação do ciclo de temperatura é a de Copacabana (Figura 5.1e), já que as simulações tendem a atrasar a ocorrência das temperaturas máximas e mínimas.

Na análise da evolução temporal da temperatura do ar realizada neste trabalho para as três simulações com diferentes condições iniciais e de contorno, verificou-se que o modelo BRAMS é capaz de representar satisfatoriamente o ciclo diário de temperatura no referido período. Estes resultados estão de acordo com o trabalho de Moraes (2008) que utilizou o modelo atmosférico MM5 considerando as estações SBGL, SBRJ, SBAF, SBSC e SBJR.

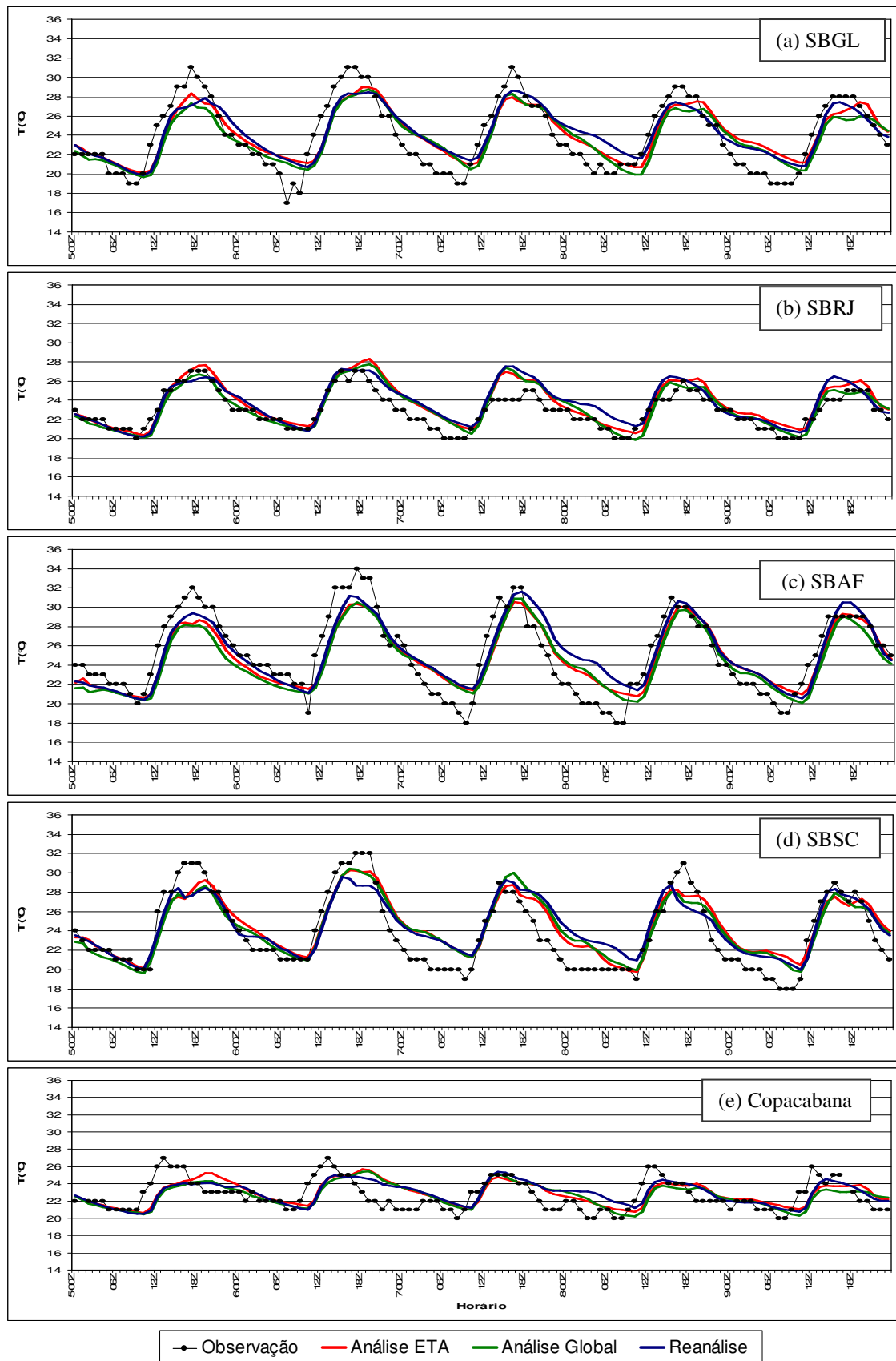


Figura 5.1 - Série temporal da temperatura do ar entre as simulações com as análises do ETA, Global e Reanálise e as observações para as estações: (a) SBGL, (b) SBRJ, (c) SBAF, (d) SBSC, (e) Copacabana, (f) Niterói, (g) Jacarepaguá-INMET, (h) Jacarepaguá-FEEMA, (i) Marambaia, (j) Ecologia Agrícola e (l) Nova Iguaçu.

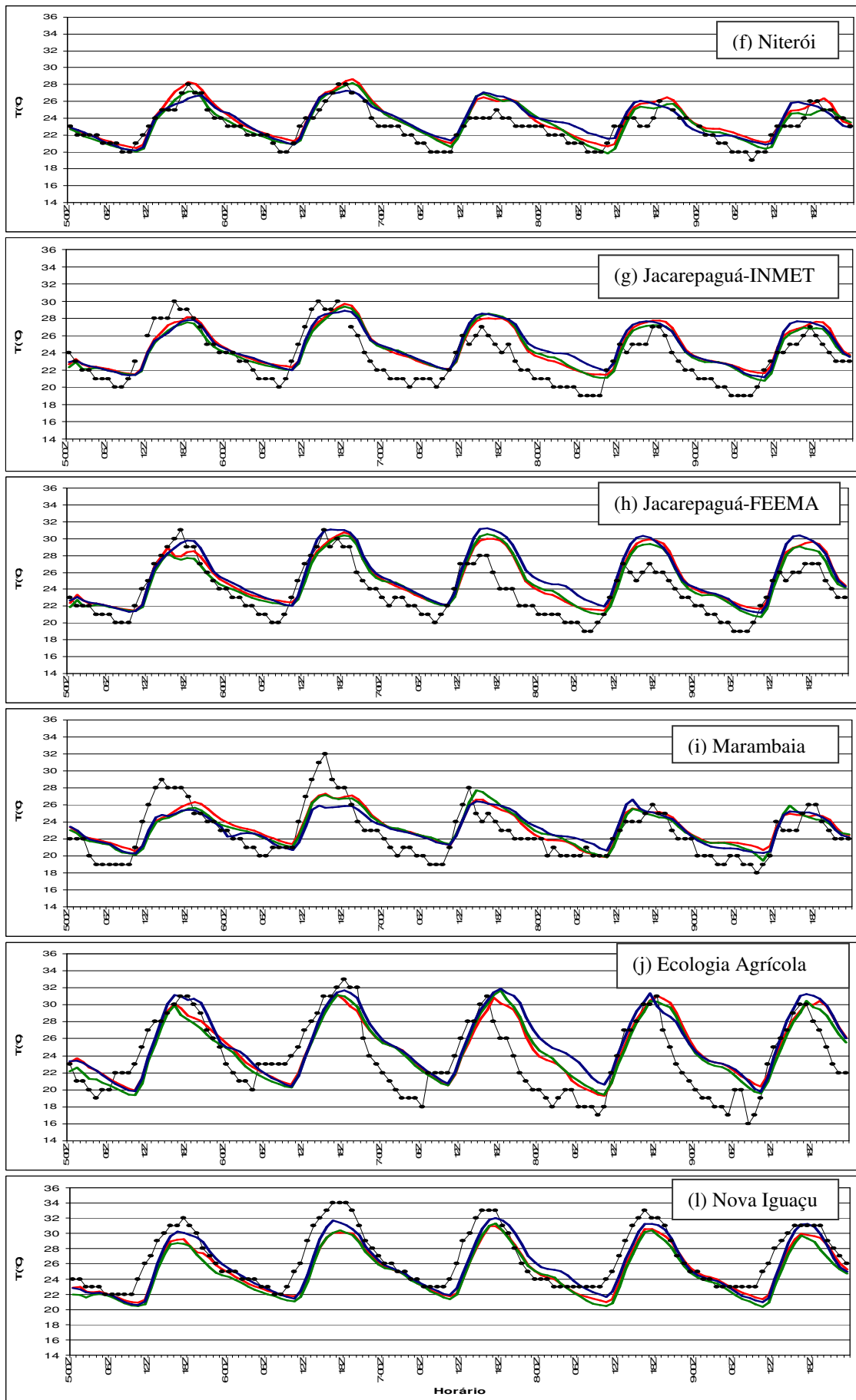


Figura 5.1 - Conclusão.

Testes estatísticos com as séries temporais para a temperatura do ar avaliam objetivamente o desempenho do modelo BRAMS para as diferentes condições iniciais e de contorno. A Tabela 5.1 mostra os resultados da análise estatística.

Tabela 5.1 – Análise Estatística da temperatura do ar entre os dados observados e os dados simulados pelo modelo BRAMS para o segundo nível do modelo (30,7 m).					
	Estação SBGL				
Simulação	R	ME	RMSE	σ_{simul}	σ_{obs}
ETA	0,87	0,25	1,86	2,50	3,63
Global	0,85	-0,14	1,95	2,53	
Reanálise	0,88	0,34	1,87	2,48	
	Estação SBRJ				
Simulação	R	ME	RMSE	σ_{simul}	σ_{obs}
ETA	0,92	0,76	1,13	2,17	1,91
Global	0,89	0,42	1,05	2,16	
Reanálise	0,87	0,78	1,26	2,08	
	Estação SBAF				
Simulação	R	ME	RMSE	σ_{simul}	σ_{obs}
ETA	0,88	-0,27	1,93	3,07	4,07
Global	0,87	-0,59	2,09	3,12	
Reanálise	0,86	0,16	2,04	3,28	
	Estação SBSC				
Simulação	R	ME	RMSE	σ_{simul}	σ_{obs}
ETA	0,90	0,69	1,87	2,87	3,88
Global	0,88	0,52	1,91	2,95	
Reanálise	0,88	0,66	2,02	2,73	
	Estação Copacabana				
Simulação	R	ME	RMSE	σ_{simul}	σ_{obs}
ETA	0,54	0,24	1,55	1,31	1,77
Global	0,48	0,01	1,62	1,33	
Reanálise	0,56	0,25	1,50	1,27	
	Estação Niterói				
Simulação	R	ME	RMSE	σ_{simul}	σ_{obs}
ETA	0,89	0,94	1,27	2,18	2,05
Global	0,86	0,58	1,15	2,17	
Reanálise	0,83	0,82	1,38	1,98	
	Estação Jacarepaguá-INMET				
Simulação	R	ME	RMSE	σ_{simul}	σ_{obs}
ETA	0,82	1,32	2,03	2,34	2,91
Global	0,79	1,10	2,02	2,32	
Reanálise	0,79	1,42	2,22	2,29	
	Estação Jacarepaguá-FEEMA				
Simulação	R	ME	RMSE	σ_{simul}	σ_{obs}
ETA	0,85	1,53	2,22	2,91	3,05
Global	0,83	1,26	2,12	2,89	
Reanálise	0,84	1,94	2,59	3,13	

Tabela 5.1 – Continuação.					
Estação Marambaia					
Simulação	R	ME	RMSE	σ_{simul}	σ_{obs}
ETA	0,81	0,74	1,91	1,92	2,96
Global	0,79	0,61	1,93	1,98	
Reanálise	0,78	0,58	1,97	1,82	
Estação Ecologia Agrícola					
Simulação	R	ME	RMSE	σ_{simul}	σ_{obs}
ETA	0,75	1,24	3,06	3,44	4,29
Global	0,75	0,98	3,00	3,56	
Reanálise	0,74	1,79	3,39	3,66	
Estação Nova Iguaçu					
Simulação	R	ME	RMSE	σ_{simul}	σ_{obs}
ETA	0,90	-1,43	2,10	3,05	3,62
Global	0,89	-1,84	2,41	3,14	
Reanálise	0,89	-0,92	1,82	3,42	

Com relação ao índice de correlação (R), oito entre as onze estações apresentam os melhores valores utilizando a análise do ETA. Os valores de R para a simulação considerando a análise do ETA, em geral, são superiores a 0,8, exceto nas estações de Copacabana e Ecologia Agrícola. É interessante observar que no gráfico de evolução temporal da estação de Copacabana pode ser verificado esse aspecto de baixo índice de correlação

No índice de Erro Médio (ME), os resultados mostram que em geral, as três simulações superestimam as observações ($ME > 0$), exceto nas estações SBGL, SBAF e Nova Iguaçu. Destaca-se, ainda, que as três simulações para a estação de Nova Iguaçu apresentam valores de $ME < 0$.

As análises da Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE) mostram que na simulação com a análise do Global cinco estações apresentam os menores valores de RMSE, indicando que as discrepâncias são pequenas entre as observações e a respectiva simulação. Por outro lado, nas simulações com a análise do ETA verifica-se que quatro estações também apresentam baixos valores de discrepância entre as observações e a simulação. Na simulação com a Reanálise, observa-se que a maioria das estações apresenta valores mais elevados de RMSE.

Através dos testes estatísticos verificou-se que as três condições iniciais e de fronteira (análises ETA, Global e Reanálise) fornecem resultados similares entre si e, portanto, qualquer uma dessas análises podem ser utilizadas nas simulações no referido período. Esse aspecto reflete o predomínio da mesoescala (circulações locais) sobre as

flutuações de escala sinótica, fornecida nos contornos laterais do domínio do modelo a cada 6 h. Além disso, o período simulado é caracterizado por um padrão de vento sinótico que não sofre alterações significativas devido a marcante influência da ASAS na região de estudo, de acordo com Moraes (2008). Entretanto um certo destaque poderia ser atribuído à condição inicial e de fronteira do ETA, tendo em vista que as simulações com essa opção obtiveram os melhores índices de correlação em oito das onze estações avaliadas e baixos valores de RMSE em quatro das onze estações.

5.2 - Testes de sensibilidade entre diferentes perfis de umidade do solo com uso do esquema TEB

Nesta seção é feita a comparação de diferentes perfis de umidade do solo nas simulações com o modelo BRAMS. Esta comparação tem por objetivo verificar como a umidade do solo pode influenciar no campo de temperatura e na intensidade da ICU na RMRJ.

As simulações foram realizadas com as condições iniciais e de contorno do ETA e com o uso do esquema TEB somente para os domínios horizontais 16 km e 4 km (como discutido anteriormente). Neste trabalho, todos os resultados das análises da série temporal e do campo horizontal de temperatura e vento são reproduzidas apenas para o domínio de 4 km (Grade G2) no segundo nível do modelo, ou seja, 30,7 metros acima da superfície. Não foi usado o primeiro nível do modelo (9,8 metros) por estar dentro da escala da altura dos prédios (10 metros).

Na escolha dos perfis de umidade do solo, adotou-se um perfil de umidade do solo considerado como controle (simulação de solo controle). Esta escolha foi baseada na literatura como, por exemplo, o trabalho de Freitas (2003). Posteriormente, o perfil de umidade foi ajustado para a RMRJ de acordo com a curva de temperatura das observações das estações. A partir dos valores do perfil do solo controle foram realizadas duas simulações, uma com redução de 40% da umidade (denominado solo seco) e outra com aumento de 40% da umidade (chamado de solo úmido). A Tabela 5.2 mostra os perfis de umidade do solo para cada uma das camadas nas três simulações.

Tabela 5.2 - Perfis de umidade do solo usados nas simulações.	
Tipos de simulação	Grau de saturação do solo nas respectivas profundidades: -2.0 m, -1.50 m, -0.25 m, -0.05 m.
Solo seco	0.30, 0.24, 0.18, 0.15
Solo controle	0.50, 0.40, 0.30, 0.25
Solo úmido	0.70, 0.56, 0.42, 0.35

As séries temporais de temperatura do ar foram consideradas em onze estações localizadas dentro da RMRJ. Destas onze estações, oito delas estão posicionadas na área urbana (SBGL, SBRJ, SBAF, Niterói, Copacabana, Jacarepaguá INMET, Jacarepaguá FEEMA e Nova Iguaçu) e três estão localizadas em área não urbana (Marambaia, SBSC e Ecologia Agrícola). As estações mais próximas da linha da costa são SBGL, SBRJ, Niterói, Copacabana, Jacarepaguá INMET, Jacarepaguá FEEMA, Marambaia e SBSC, enquanto outras posicionadas mais dentro do continente são Ecologia Agrícola, SBAF e Nova Iguaçu. Neste sentido, optou-se por analisar as estações de Ecologia Agrícola e SBAF como localidades representativas da área não urbana e urbana, respectivamente.

A SBAF está localizada em área urbana, predominantemente com residências de pequeno porte e pouco espaçamento entre as mesmas. Nesta região, a principal contribuição para os fluxos de calor deve-se à atividade veicular e industrial. Esta estação é localizada entre o maciço do Gericinó-Mendanha, da Pedra Branca e da Tijuca. Os maciços da Pedra Branca e Tijuca atuam como barreira física na circulação da brisa marítima proveniente do Oceano Atlântico, dificultando a ação dos ventos na RMRJ.

A estação Ecologia Agrícola localiza-se numa área não urbana e com grande quantidade de vegetação cuja ocupação do solo é do tipo colheita/policultura/pastagem. Esta estação fica posicionada mais para dentro do continente. Nesta localidade, considera-se que a contribuição veicular e/ou industrial seja menos importante, dada às próprias características de uso do solo da região.

Portanto, daqui em diante sempre destacaremos neste trabalho as estações SBAF e Ecologia Agrícola para representar a área urbana e a área não urbana, respectivamente.

A Figura 5.2 mostra a comparação da série temporal da temperatura do ar obtida das três simulações citadas na Tabela 5.2 para as estações SBAF e Ecologia Agrícola. Os resultados para as demais estações são mostradas no Apêndice B.

Na avaliação da estação SBAF (Figura 5.2a) observa-se que a evolução da temperatura do ar na simulação com o solo seco e na simulação com o solo controle são quase idênticas em todo o período. Possivelmente essa semelhança indica que o perfil de solo controle já esteja suficientemente seco e, portanto, uma redução da umidade não seria traduzida em modificações no campo de temperatura. Por outro lado, as temperaturas no perfil com solo úmido se diferencia subestimando os valores em relação as demais simulações e observações. Este aspecto é decorrente da maior quantidade de umidade disponível no solo e que acarreta num maior fluxo de calor latente (quantidade de calor responsável pela mudança de fase) e num menor fluxo de calor sensível (quantidade de calor responsável no aquecimento da superfície).

Na estação de Ecologia Agrícola (Figura 5.2b) verifica-se que as três simulações diferem entre si na amplitude das temperaturas máximas, entretanto apresentando a mesma fase. Os mais altos valores de temperatura do ar ocorrem no caso de solo seco, evidenciando maior atuação do fluxo de calor sensível. No entanto, a simulação de solo seco assim como a simulação de solo controle representa de forma mais adequada as temperaturas observadas. Com relação à simulação com o tipo de solo úmido observam-se as menores amplitudes de temperatura do ar, ocasionadas pela diminuição do calor sensível e pelo aumento do fluxo de calor latente devido à maior quantidade de umidade no solo.

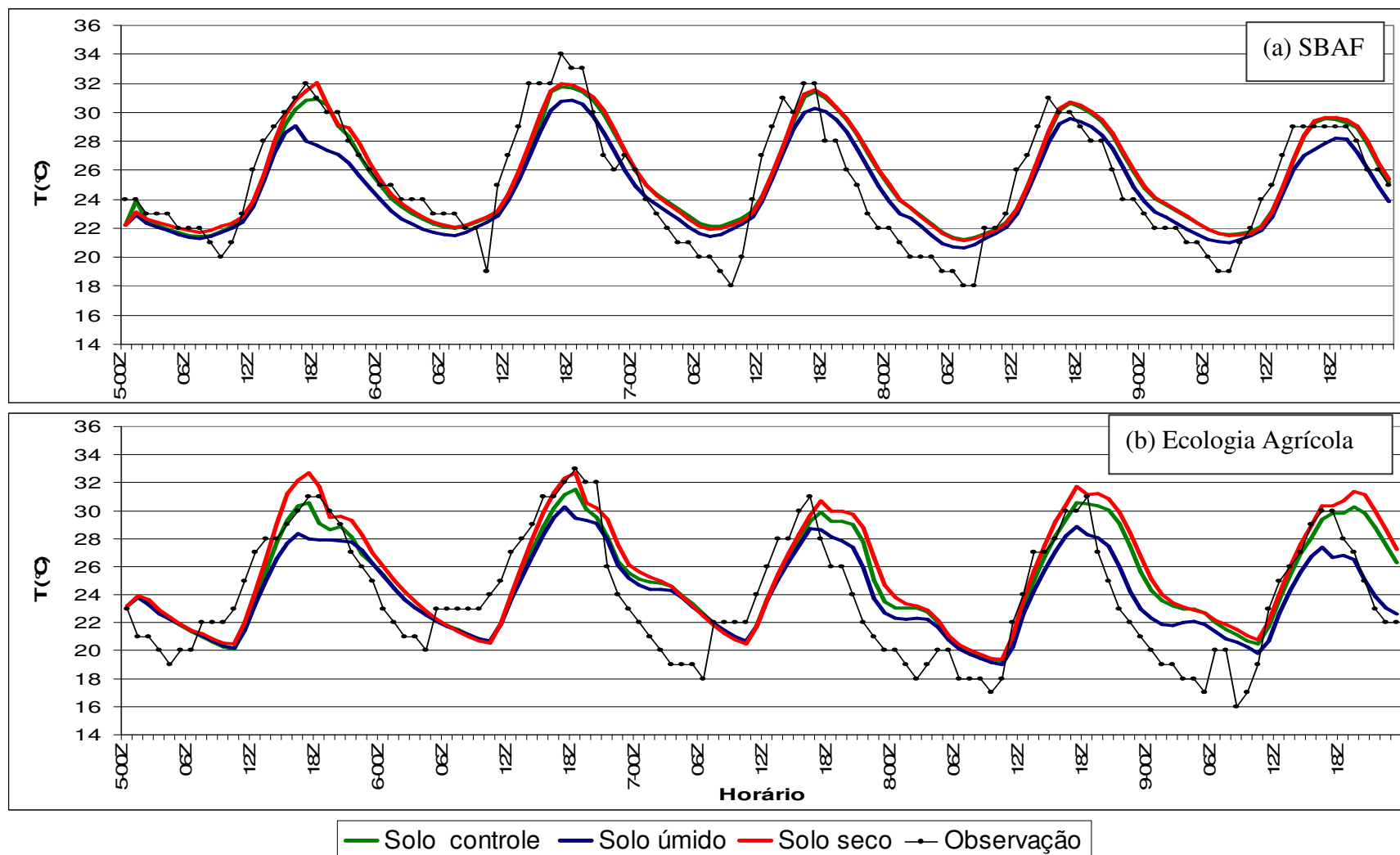


Figura 5.2– Série temporal da temperatura do ar entre as simulações de solo controle, solo úmido e solo seco e as observações para as estações: (a) SBAF e (b) Ecologia Agrícola.

5.3 – Testes de sensibilidade entre as diferentes opções do esquema TEB

No esquema TEB podem ser estudados inúmeras configurações dos parâmetros que estão contidos no módulo TEB_SPM_INFO da *namelist*. Como discutido no capítulo 3, o módulo TEB_SPM_INFO consiste de variáveis que controlam a ativação do esquema de representação de áreas urbanas.

Nesta seção são avaliadas algumas opções das variáveis do esquema TEB, e como as mudanças nos valores dessas variáveis influenciam e acarretam em mudanças na temperatura do ar da RMRJ. Serão analisadas as seguintes opções: fluxos de calor veicular sensível e latente (HTRAF e PLETRAF), fluxo de calor sensível industrial (HINDU) e altura das construções/prédios (BLD_HEIGHT).

5.3.1 - Fluxos de calor veiculares

Para verificar o efeito causado pelas fontes veiculares sobre a temperatura na RMRJ, foram realizadas duas simulações em que os valores das variáveis HTRAF (valor máximo de calor sensível liberado pelo tráfego em W/m^2) e PLETRAF (valor máximo de calor latente liberado pelo tráfego em W/m^2) foram alteradas. As simulações foram denominadas de: simulação de controle ou simulação veicular ligado, em que os valores das fontes veiculares usados são $HTRAF=90 W/m^2$ e $PLETRAF=10 W/m^2$ (valores próximos foram usados em Vendrasco *et al.*, 2004 e Lei *et al.*, 2008); e a simulação veicular desligado, na qual as fontes veiculares não são consideradas ($HTRAF=0$ e $PLETRAF=0$).

De acordo com Freitas (2003), as fontes veiculares de calor sensível e latente no modelo BRAMS/TEB são ajustadas a um ciclo diurno correspondente a uma dupla gaussiana para representar os horários de maior circulação de veículos (períodos de *rush* de manhã e de noite). A Figura 5.3 mostra uma representação dos fluxos de calor sensível veicular liberado na Região Metropolitana de São Paulo, com dois picos de maior liberação de calor veicular nos horários de 9 HL e 19 HL. No presente trabalho, utilizaram-se os horários de 7,8 HL (correspondendo a 7 h e 48 min) e 16 HL para representar os picos de maior liberação de calor no período da manhã e da tarde, respectivamente.

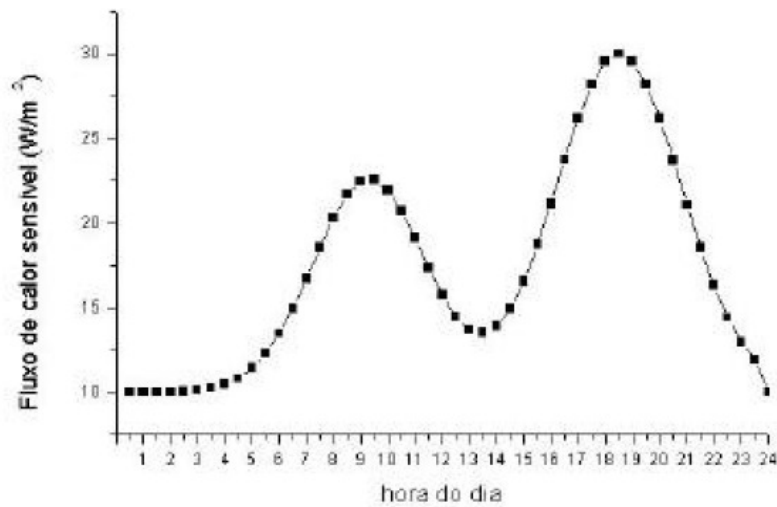


Figura 5.3 - Fluxo de calor sensível W/m^2 ao longo do dia devido às atividades veiculares na área urbana da RMSP. (Fonte: Freitas, 2003).

A Figura 5.4 mostra a evolução da temperatura do ar na estação SBAF e Ecologia Agrícola para as simulações com e sem a presença das fontes veiculares. O Apêndice C apresenta a evolução temporal da temperatura do ar para as demais estações.

A comparação da temperatura da Figura 5.4 mostra que as simulações com e sem as fontes veiculares representam satisfatoriamente o comportamento do ciclo diurno nas estações de SBAF e Ecologia Agrícola. Destacando que as duas simulações reproduzem melhor a amplitude e a fase dos máximos de temperatura do que os mínimos.

Na análise da estação de SBAF, localizada na área urbana, evidencia-se que a simulação com as fontes veiculares ligadas apresenta maiores amplitude da temperatura máxima, representando mais adequadamente as observações (Figura 5.4a). Na análise da temperatura mínima verifica-se que a simulação com a presença da fonte veicular apresenta temperaturas mínimas mais elevadas, porém menos representativas das observações.

Na estação de Ecologia Agrícola não se observa diferenças significativas entre as simulações com e sem a inclusão das fontes veiculares, conforme mostra a Figura 5.4b. Este fato evidencia que o esquema TEB não atua diretamente na área não urbana.

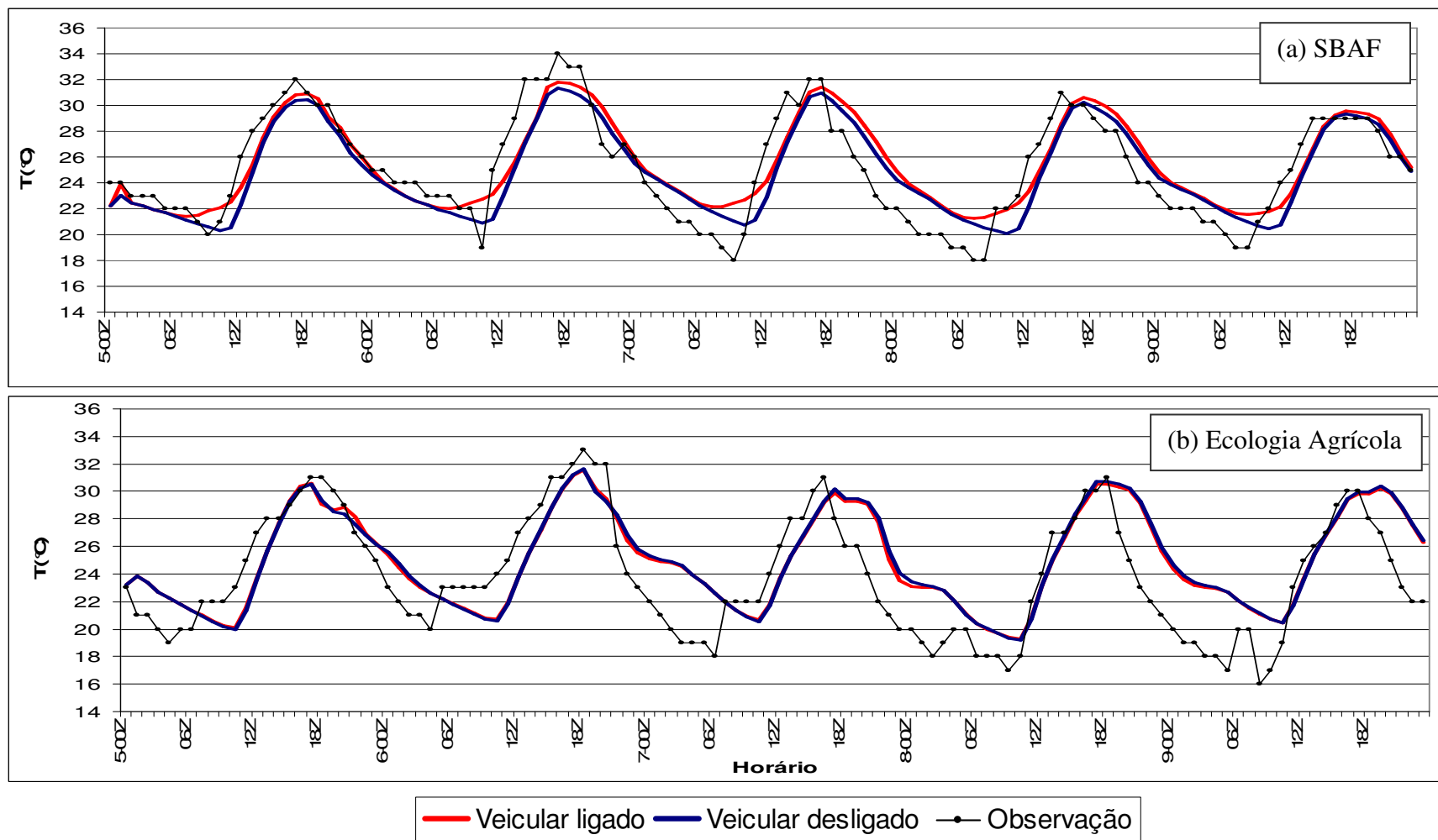


Figura 5.4 – Série temporal da temperatura do ar entre as simulações veicular ligado e veicular desligado e as observações para as estações: (a) SBAF e (b) Ecologia Agrícola.

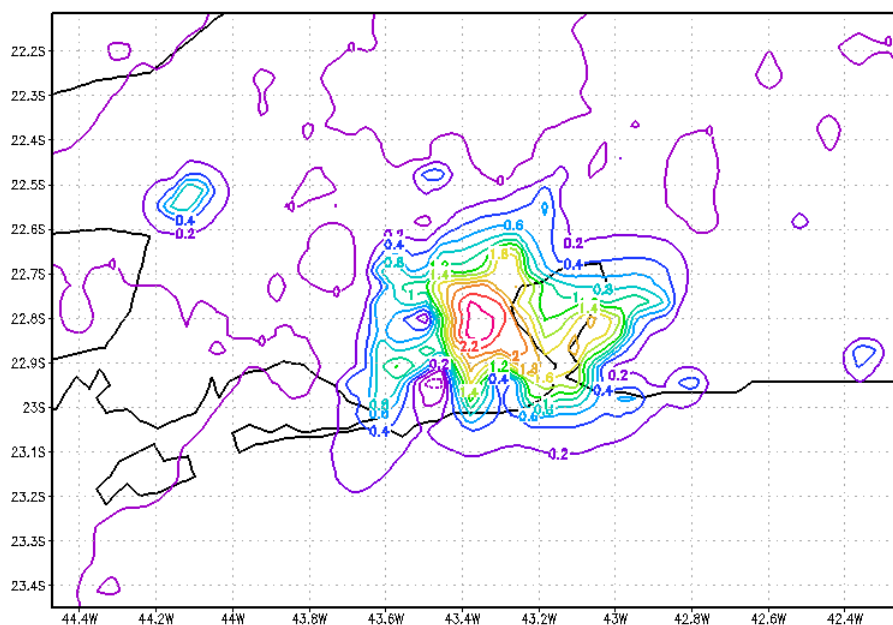
Nesta comparação (com e sem fontes veiculares), se observa que as fontes veiculares ocasionam diferenças de temperaturas mais elevadas do ar durante o ciclo diário, principalmente nas madrugadas. Isso acontece porque durante o dia existe outra fonte muito mais significativa que é a radiação solar. Além disso, o armazenamento do calor na região de *canyon* durante o dia tem forte influência no período noturno.

Moraes (2008) verificou a ocorrência do fenômeno de Ilha de Calor Urbana no período compreendido entre o dia 04 a 12 de setembro de 2007, no qual a RMRJ estava sobre atuação da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). Após esta análise o autor identificou o dia 06 como representativo da ICU sob a atuação da ASAS. Portanto, neste trabalho também destacaremos o dia 6 como um dia representativo de formação da ilha de calor urbana.

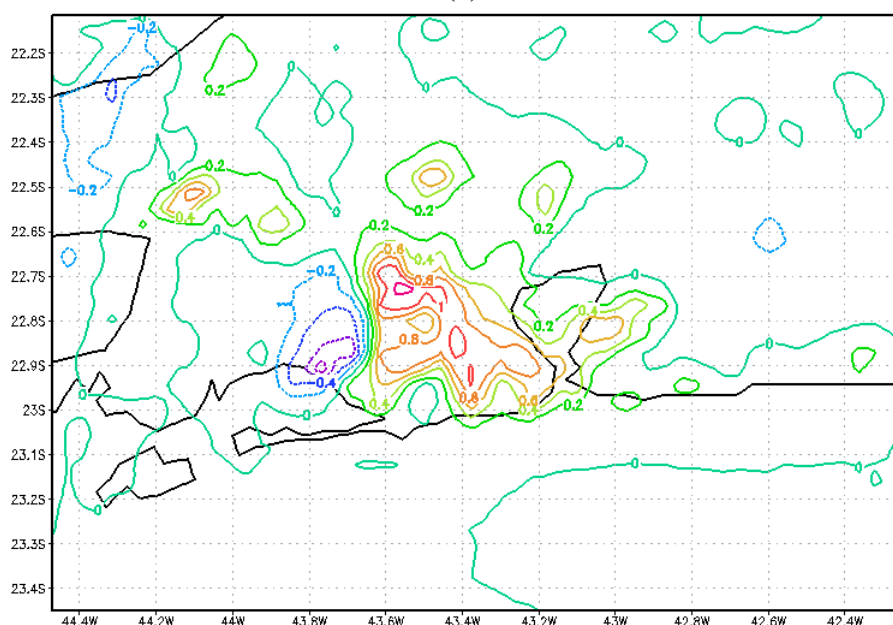
Diferenças no campo horizontal de temperatura entre as simulações com e sem fontes veiculares são mostradas na Figura 5.5. Este campo de diferença foi reproduzido para o dia 6 de setembro para o horário de máxima circulação de carros no período da manhã (11Z) e no período da tarde (19Z).

No horário das 11Z e 19Z (08 HL e 16 HL), observa-se uma diferença positiva em toda a área urbana da RMRJ, indicando que as temperaturas da simulação com a presença do fluxo veicular são maiores do que com fluxo desligado. Esta diferença apresenta maiores valores na parte da manhã em decorrência da menor interferência da radiação solar incidente.

Esses resultados indicam a importante influência das fontes veiculares no ciclo diurno de temperatura.



(a)



(b)

Figura 5.5 - Diferença horizontal de temperatura entre as simulações com fontes veiculares e sem fontes veiculares para o dia 06/09/2007 nos horários: (a)11Z e (b)19Z.

5.3.2 - Calor sensível industrial

Os fluxos relacionados à atividade industrial influenciam diretamente a atmosfera e, por esta razão, o objetivo desta seção é verificar o efeito causado pela mudança do fluxo de calor sensível industrial (HINDU) sobre a temperatura do ar na RMRJ. Destaca-se que as fontes industriais são mantidas constantes durante o dia e a noite e ao longo do período de estudo.

Para verificar o efeito do fluxo de calor sensível industrial foram analisadas duas simulações: a simulação de controle ou simulação de calor sensível industrial de 10 W/m^2 ; e a simulação com aumento do fluxo de calor sensível industrial de 20 W/m^2 (chamada de simulação de calor sensível industrial de 20 W/m^2). Os valores deste parâmetro foram escolhidos a partir da literatura, como em Freitas (2003) e Lei *et al.* (2008). A Figura 5.6 mostra a série temporal das simulações com calor sensível industrial 10 W/m^2 e 20 W/m^2 para as estações SBAF e Ecologia Agrícola. No Apêndice D são mostradas as figuras para as demais estações listadas neste trabalho.

Para a estação SBAF (Figura 5.6a) verifica-se que a evolução temporal da simulação com fluxo de calor sensível industrial de 20 W/m^2 (linha azul) apresenta os maiores valores de temperatura principalmente na madrugada (em torno do horário das 06Z) durante todo o período de estudo. Nos horários da tarde (por volta de 18Z) não se observa discrepâncias significativas entre as duas simulações, devido a maior importância do aquecimento por radiação solar durante o dia em relação a essa fonte antropogênica de calor.

Com relação à Ecologia Agrícola (Figura 5.6b), não se verifica diferenças significativas nos resultados entre as duas simulações, em virtude da característica não urbana do local.

Para se verificar espacialmente a atuação da fonte de calor industrial a Figura 5.7 mostra a diferença horizontal de temperatura no dia 06 de setembro para os horários (06Z) e (18Z), correspondentes aos horários de maior e menor desvio de temperatura entre as simulações. É evidenciada no horário de 06Z (Figura 5.7a), a delimitação da área urbana da RMRJ através dos valores negativos de diferença de temperatura (simulação 10 W/m^2 menos 20 W/m^2). Por outro lado, no horário das 18Z os valores de diferença de temperatura são praticamente nulos na RMRJ, em decorrência da menor importância relativa desta fonte antropogênica no aquecimento diurno. Vale destacar que essa fonte industrial é tratada de forma homogênea, não permitindo evidenciar áreas com grande concentração industrial, como as baixadas na RMRJ.

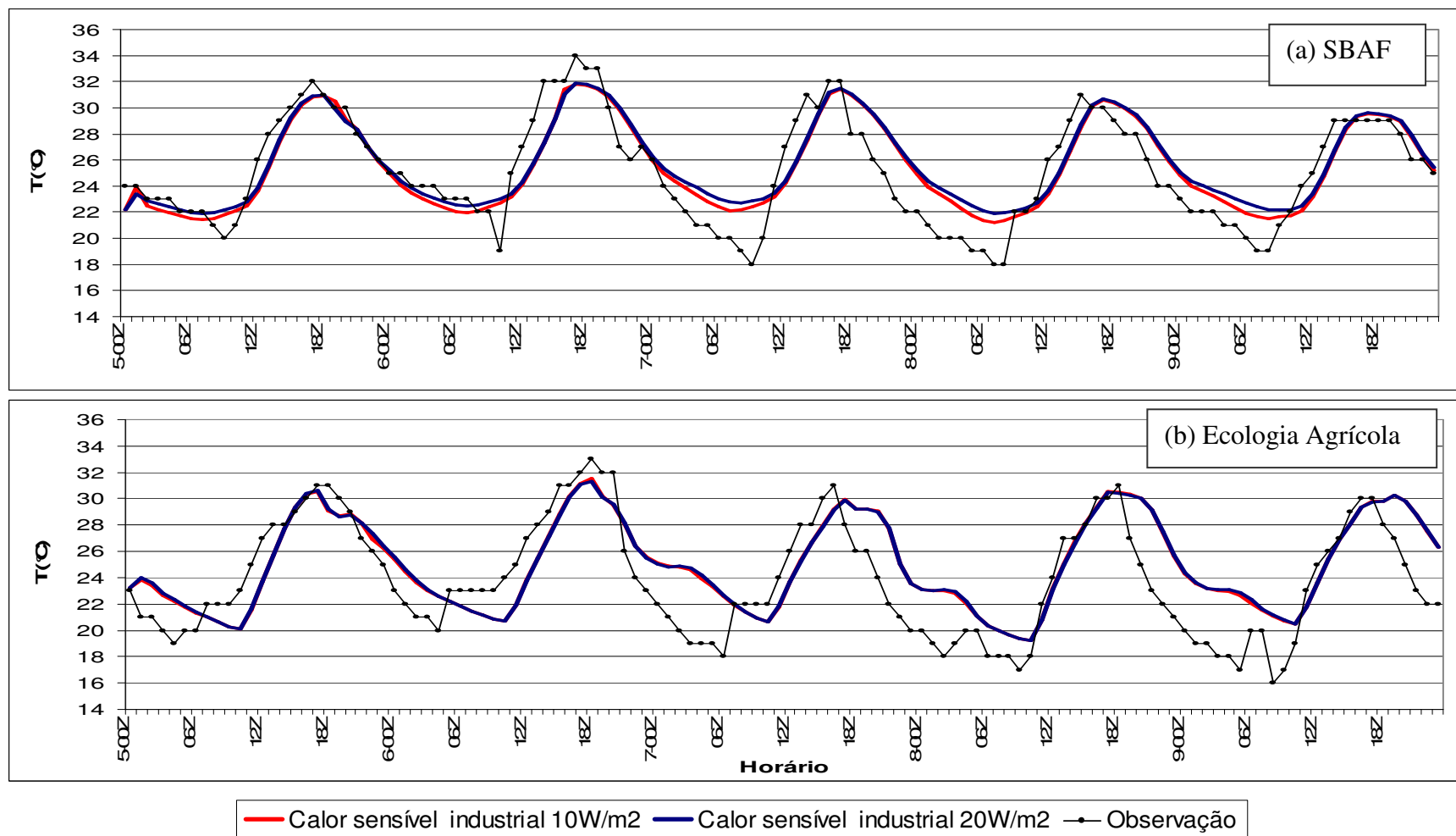


Figura 5.6 - Série temporal da temperatura do ar entre as simulações de calor sensível de 10 W/m^2 e de 20 W/m^2 e as observações para as estações: (a) SBAF e (b) Ecologia Agrícola.

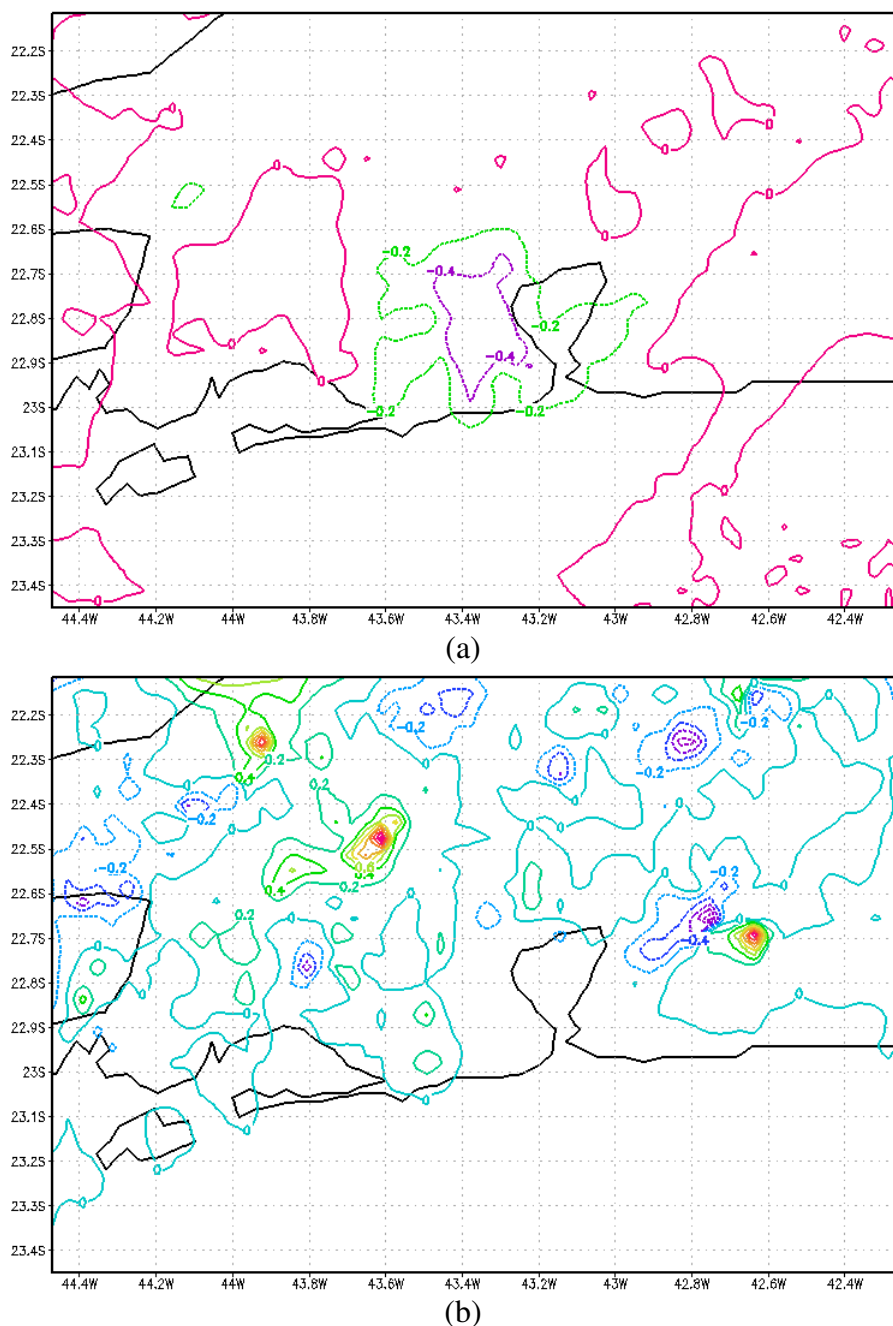


Figura 5.7 - Diferença horizontal de temperatura entre as simulações com o calor sensível industrial 10 W/m^2 e 20 W/m^2 para o dia 06/09/2007 nos horários: (a)06Z e (b)18Z.

5.3.3 - Altura das construções/prédios

Nesta seção é analisada a influência do tamanho das construções na temperatura do ar nas simulações com o BRAMS. Foram realizadas duas simulações: a simulação de controle, em que é usada a altura de 10 metros dos prédios; e a simulação com altura de 20 metros das construções/prédios (chamada de simulação de altura 20m). Destaca-se

que como foi dobrado valor de altura dos prédios, também foi alterado o parâmetro de relação entre altura e largura das construções (BLD_HL_RATIO), para que a largura entre os prédios fossem mantidas iguais tanto na simulação com 10 metros como de 20 metros.

A Figura 5.8 mostra a série temporal de temperatura do ar, referentes às estações SBAF e Ecologia Agrícola. Os resultados para as demais estações são mostrados no Apêndice E.

A sobreposição das linhas de temperatura correspondentes às alturas de 10 m e 20 m quase não revela diferenças significativas no decorrer do período simulado, principalmente em relação à estação de Ecologia Agrícola (Figura 5.8). Entretanto, é possível verificar em SBAF que a linha vermelha (simulação com 10 m) apresenta um valor de temperatura ligeiramente acima da linha azul (simulação com 20 m). Uma análise mais detalhada para a estação SBAF (área urbana) é mostrada na Figura 5.9, em que a linha verde representa a diferença de temperatura entre as simulações de 10 m e 20 m. É possível verificar que as maiores diferenças ocorrem no período da madrugada, exceto alguns picos transientes nos dois primeiros dias. Durante o período da manhã e da tarde, principalmente próximo ao horário da temperatura máxima verifica-se menores valores de diferença.

Esperava-se que as temperaturas para a simulação com altura de prédios de 20 metros fossem maiores no período da tarde/noite/madrugada, tendo em vista que prédios mais elevados apresentam *canyons* mais definidos e, conseqüentemente, aprisionariam mais calor. Este fato precisa ser melhor investigado.

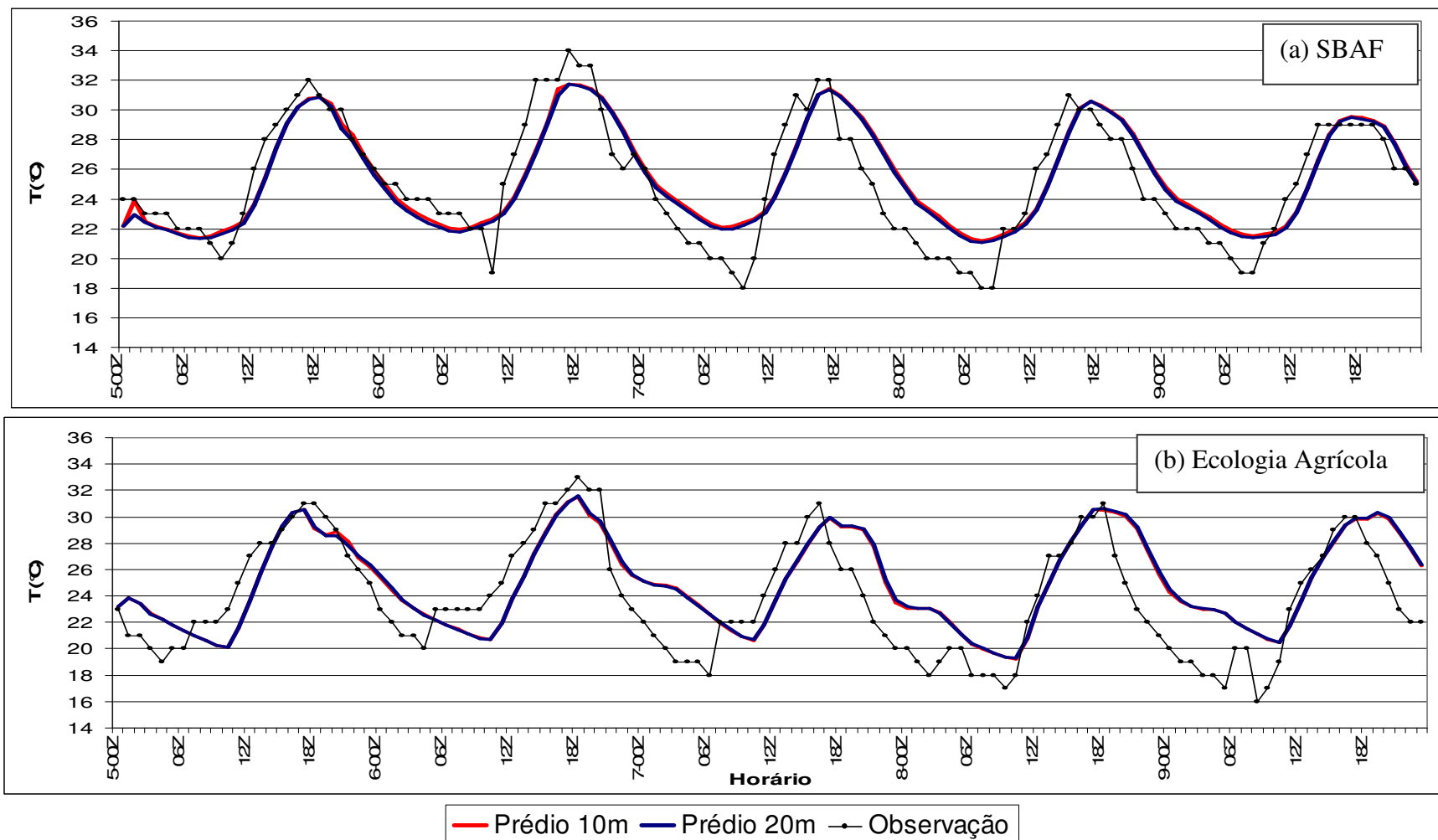


Figura 5.8 – Série temporal da temperatura do ar entre as simulações com prédio de 10 m e 20 m e as observações para as estações: (a) SBAF e (b) Ecologia Agrícola.

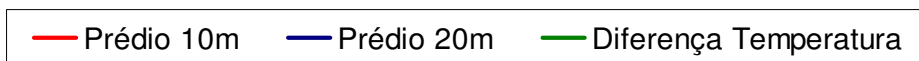
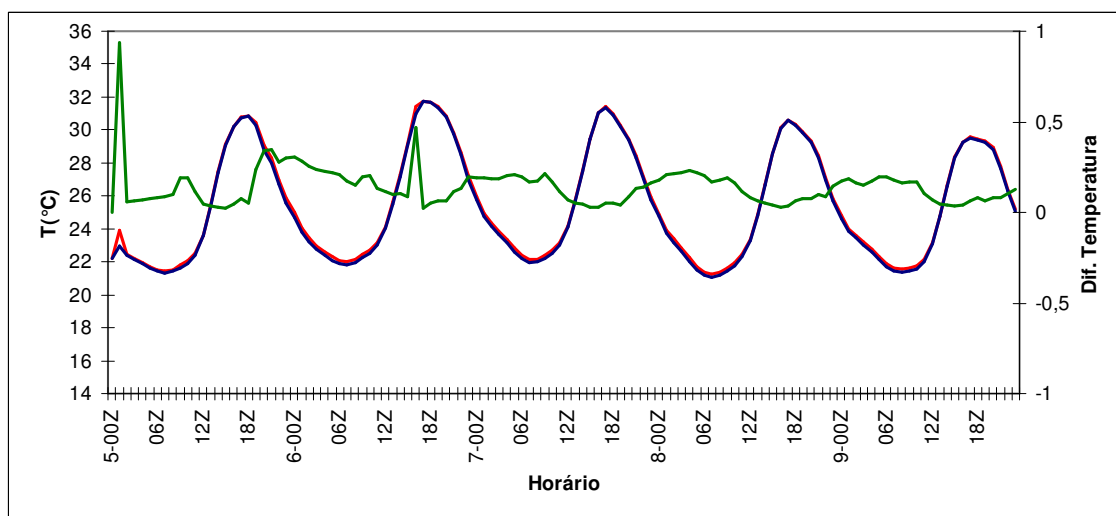


Figura 5.9 – Comparação da evolução temporal da temperatura do ar e diferença de temperatura entre as simulações com 10 m e 20 m para a estação SBAF.

5.4 - Avaliação da ICU na RMRJ

5.4.1 - Análise das séries de temperatura

Com o objetivo de avaliar e comparar o desempenho do TEB no modelo BRAMS foram realizadas duas simulações, sendo a primeira sem o uso do esquema TEB e a segunda com o uso do TEB. Esta comparação tem por intuito verificar se a utilização do TEB traz uma melhora na representação dos processos de superfície em áreas urbanas obtidos pela modelagem numérica com o BRAMS.

Na simulação realizada com o TEB, a configuração correspondente a ocupação urbana é mostrada na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Parâmetros utilizados no esquema TEB.

Parâmetro	Valor
Altura das construções	10 m
Largura das construções	6.8 m
Z0 (comprimento de rugosidade da área urbana)	3.0 m
Fonte veicular de calor sensível (máximo)	90.0 W/m ²
Fonte veicular de calor latente (máximo)	10.0 W/m ²
Fonte industrial de calor sensível (máximo)	10.0 W /m ²
Fonte industrial de calor latente (máximo) (*)	30.0 W/m ²
Relação entre altura e largura das construções (H/L)	30.0 W/m ²
Fração ocupada pelas construções	0.7

(*) Fonte industrial é entendida como a contribuição antropogênica dos fluxos de calor sensível e latente dos processos industriais, bem como demais atividades humanas (utilização de aparelhos domésticos, de ar-condicionado etc).

A comparação da série temporal entre as estações SBAF e Ecologia Agrícola para as simulações com e sem o uso do TEB é mostrada na Figura 5.10. As Figuras para as demais estações utilizadas estão no Apêndice F.

Na Figura 5.10, verifica-se que a fase dos máximos de temperatura é muito bem representada pelas simulações com e sem o uso do esquema TEB. Destaca-se que a série temporal que está sendo reproduzida nesta seção para a simulação sem o uso do TEB é a mesma apresentada na seção 5.1, sendo aqui novamente representada afim de comparação com a simulação com o esquema TEB. Na comparação entre as duas simulações, observa-se que a amplitude dos máximos é melhor representada pelo TEB, se aproximando mais das observações principalmente na estação SBAF (Figura 5.10a). Este efeito de elevação dos máximos de temperatura com o uso do TEB também é encontrado em Freitas (2003), destacando a presença da ICU.

Com relação às temperaturas mínimas, verifica-se que a fase e amplitude dos mínimos não são tão bem representadas pelas simulações. Observa-se que o esquema TEB na área urbana (SBAF) possui uma tendência de superestimar os valores mínimos, possivelmente pela influência das fontes veiculares (discutido com maiores detalhes na seção 5.3). Pela Figura 5.10b verifica-se que o esquema TEB não apresenta forte influência nos resultados para a estação de Ecologia Agrícola, devido a própria localização em área não urbana.

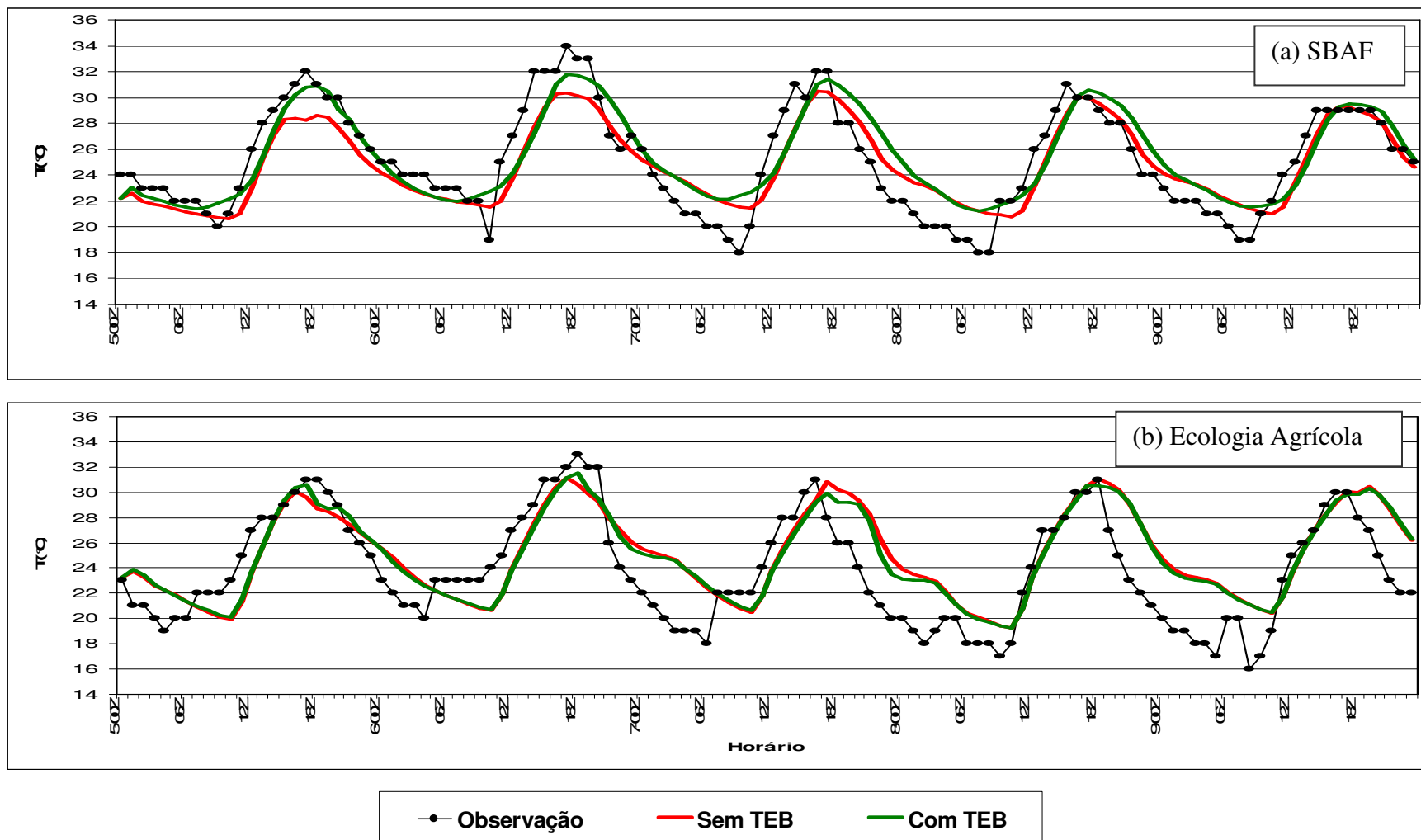


Figura 5.10 – Série temporal da temperatura do ar entre as simulações sem e com o TEB e as observações para as estações: (a) SBAF e (b) Ecologia Agrícola.

Através da comparação entre as simulações com e sem a presença do esquema TEB verificou-se que para a estação localizada na área urbana, o esquema TEB trouxe uma melhora aos resultados obtidos pela modelagem numérica, se mostrando eficiente na análise das temperaturas máxima para a área urbana.

Testes estatísticos também foram feitos para avaliar o desempenho da simulação com e sem o uso do esquema TEB. Os resultados são mostrados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Análise Estatística da temperatura do ar entre os dados observados e os dados simulados com e sem o esquema TEB para o segundo nível do modelo (30,7 m).

Estação SBGL					
Simulação	R	ME	RMSE	σ_{simul}	σ_{obs}
Sem TEB	0,87	0,25	1,86	2,50	3,63
Com TEB	0,87	0,67	1,95	2,59	
Estação SBRJ					
Simulação	R	ME	RMSE	σ_{simul}	σ_{obs}
Sem TEB	0,92	0,76	1,13	2,17	1,91
Com TEB	0,91	1,37	1,66	2,27	
Estação SBAF					
Simulação	R	ME	RMSE	σ_{simul}	σ_{obs}
Sem TEB	0,88	-0,27	1,93	3,07	4,07
Com TEB	0,87	0,34	1,99	3,32	
Estação SBSC					
Simulação	R	ME	RMSE	σ_{simul}	σ_{obs}
Sem TEB	0,90	0,69	1,87	2,87	3,88
Com TEB	0,90	0,68	1,86	2,86	
Estação Copacabana					
Simulação	R	ME	RMSE	σ_{simul}	σ_{obs}
Sem TEB	0,54	0,24	1,55	1,31	1,77
Com TEB	0,49	0,77	1,79	1,37	
Estação Niterói					
Simulação	R	ME	RMSE	σ_{simul}	σ_{obs}
Sem TEB	0,89	0,94	1,27	2,18	2,05
Com TEB	0,88	1,48	1,69	2,20	
Estação Jacarepaguá-INMET					
Simulação	R	ME	RMSE	σ_{simul}	σ_{obs}
Sem TEB	0,82	1,32	2,03	2,34	2,91
Com TEB	0,83	1,89	2,42	2,64	
Estação Jacarepaguá-FEEMA					
Simulação	R	ME	RMSE	σ_{simul}	σ_{obs}
Sem TEB	0,85	1,53	2,22	2,91	3,05
Com TEB	0,86	2,38	2,94	3,42	
Estação Marambaia					
Simulação	R	ME	RMSE	σ_{simul}	σ_{obs}
Sem TEB	0,81	0,74	1,91	1,92	2,96
Com TEB	0,82	0,84	1,95	1,84	

Tabela 5.4 – Continuação.

Estação Ecologia Agrícola					
Simulação	R	ME	RMSE	σ_{simul}	σ_{obs}
Sem TEB	0,75	1,24	3,06	3,44	4,29
Com TEB	0,77	1,17	2,92	3,43	
Estação Nova Iguaçu					
Simulação	R	ME	RMSE	σ_{simul}	σ_{obs}
Sem TEB	0,90	-1,43	2,10	3,05	3,62
Com TEB	0,88	-0,69	1,81	3,42	

De maneira geral, os índices estatísticos para a simulação com uso do TEB são similares aos sem o uso do TEB. Nas simulações com TEB, as estações Jacarepaguá-INMET, Jacarepaguá-FEEMA, Marambaia e Ecologia Agrícola apresentaram melhora na correlação linear e nas estações SBSC, Marambaia e Ecologia Agrícola ocorreram melhora no RMSE. Entretanto, estes resultados estatísticos não permitem afirmar que houve melhora significativa com o uso do TEB. É importante ressaltar que o TEB apresenta melhores resultados em relação às temperaturas máximas em relação às observações, porém o contrário ocorre em relação às temperaturas mínimo, como descrito anteriormente.

Uma comparação da variação de temperatura entre as estações SBAF e Ecologia Agrícola (correspondentes a área urbana e não urbana, respectivamente) para as observações e a simulação com o uso do TEB é apresentada na Figura 5.11.

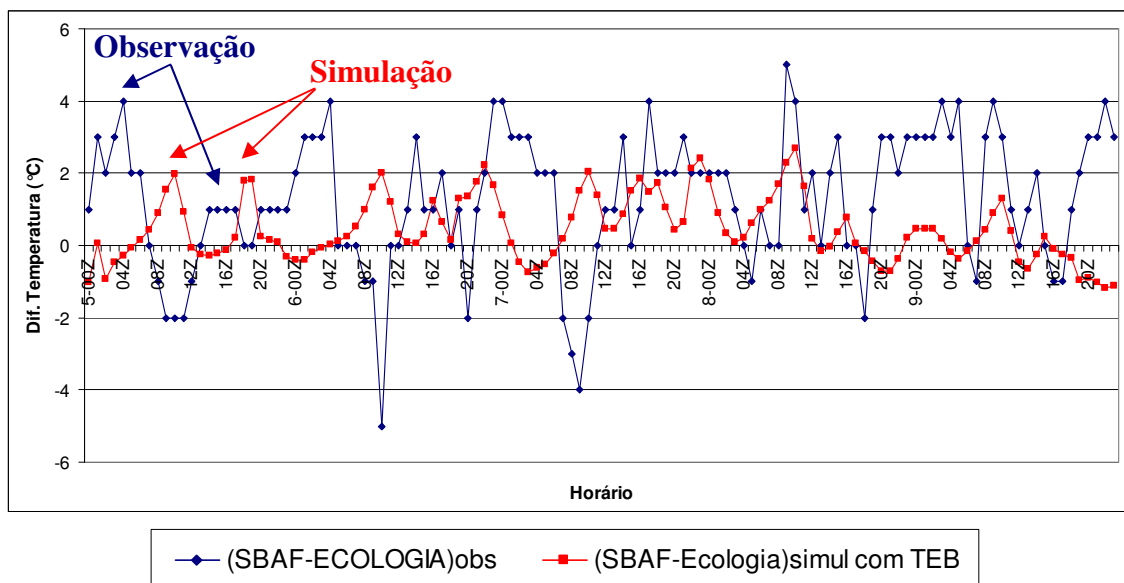


Figura 5.11 - Série temporal da diferença de temperatura entre as estações SBAF e Ecologia Agrícola para as observações e a simulação com o TEB.

Com relação à evolução temporal da diferença de temperatura entre as observações das duas estações verifica-se que o maior valor de diferença (intensidade da ICU) ocorre no período da madrugada (aproximadamente 4 °C) e um segundo maior valor de diferença ocorre no horário da noite, de cerca de 1 °C. Este comportamento de ocorrência de dois picos de maior diferença de temperatura entre a área urbana e a área não urbana é uma característica deste período estudado.

Na diferença de temperatura entre SBAF e Ecologia Agrícola para a simulação com o uso do TEB é observado dois picos de maior diferença no período da manhã e da tarde, porém com valores mais baixos que em relação à observação (aproximadamente 2°C). A ocorrência desses máximos de diferença de temperatura na simulação também é verificada em todo o período estudado. Ressalta-se que a simulação subestima os valores de intensidade da ICU em relação às observações.

5.4.2 - Análise dos meteogramas

Para a avaliação do campo de direção e intensidade dos ventos são feitos meteogramas para a simulação com o uso do TEB e para cada uma das onze estações.

Esta análise tem o objetivo de verificar se a simulação reproduz com detalhamento a circulação dos ventos na RMRJ. Para analisar o campo de vento entre as estações é feita uma subdivisão em três subáreas:

- subárea 1, área leste da RMRJ compreendendo as estações de Niterói, Copacabana, SBGL e SBRJ;
- subárea 2, área central da RMRJ abrangendo as estações de Jacarepaguá-INMET, Jacarepaguá-FEEMA, SBAF e Nova Iguaçu;
- subárea 3, área oeste da RMRJ incluindo as estações de Marambaia, SBSC e Ecologia Agrícola.

Pela análise geral das onze estações é evidenciado que a simulação subestima a magnitude dos ventos. Destaca-se que mesmo subestimando a magnitude das observações, a simulação representa de forma satisfatória a tendência do aumento e da diminuição desta magnitude no decorrer do dia. Além disso, nota-se que o modelo capturou muito bem o sinal da brisa marítima no período da tarde no que se refere à direção dos ventos. Alguns detalhes desta análise são expostas a seguir.

Análise da subárea 1:

Os meteogramas de acordo com a subárea 1 são mostrados na Figura 5.12.

Na subárea 1, de maneira geral, verifica-se que a simulação representa de forma adequada o padrão dos ventos observados, principalmente aqueles associados a brisa marítima no período da tarde, destacando-se a estação de SBGL.

Em SBRJ e Niterói as observações indicam ventos da brisa marítima predominantemente de sul, enquanto que a simulação mostra ventos de SE. A maior dificuldade na representação do vento ocorre na estação de Copacabana, mesmo assim o modelo evidencia ventos de SE no período da tarde.

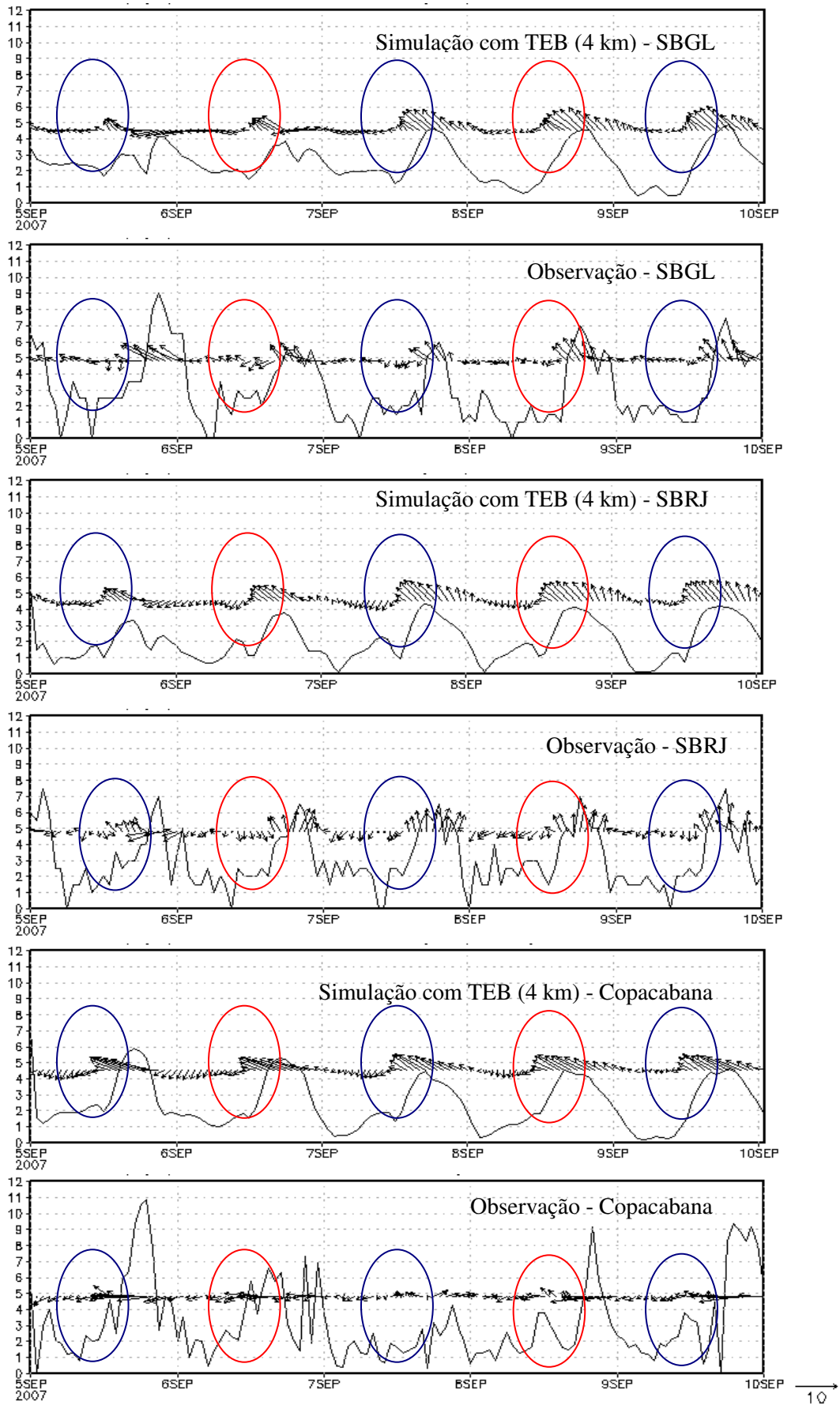


Figura 5.12 - Meteogramas da simulação com TEB e das observações para as estações localizadas na subárea 1: (a) SBGL, (b) SBRJ, (c) Copacabana e (d) Niterói.

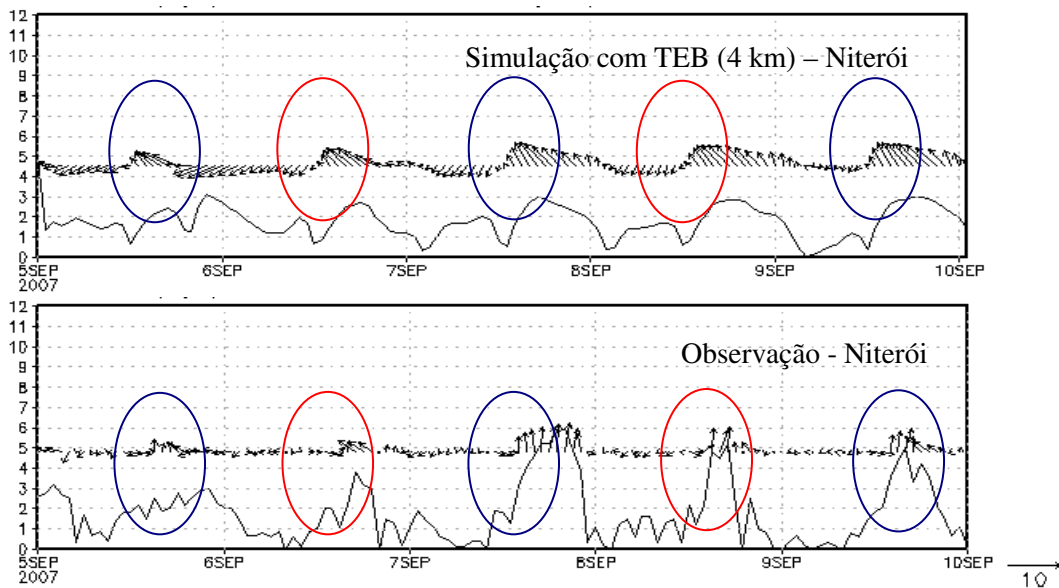


Figura 5.12 – Conclusão.

Análise da subárea 2:

A Figura 5.13 mostra os meteogramas para as estações localizadas nesta subárea. Na subárea 2, verifica-se que as estações Jacarepaguá-INMET e Jacarepaguá-FEEMA estão posicionadas próximas ao oceano Atlântico e as outras duas (SBAF e Nova Iguaçu) estão localizadas no centro da área urbana.

Nas estações de Jacarepaguá-INMET e Jacarepaguá-FEEMA as observações indicam ventos predominantemente de sul no período da tarde, sendo melhor evidenciados na estação FEEMA. Este aspecto é bem representado pela simulação.

Na estação SBAF, a simulação se mostrou com certa dificuldade na representação dos ventos, entretanto, a simulação apresenta algum sinal da brisa marítima nos dias 7, 8 e 9.

Em Nova Iguaçu, os ventos observados são demasiadamente fracos, o que dificultou na reprodução do padrão do vento na simulação.

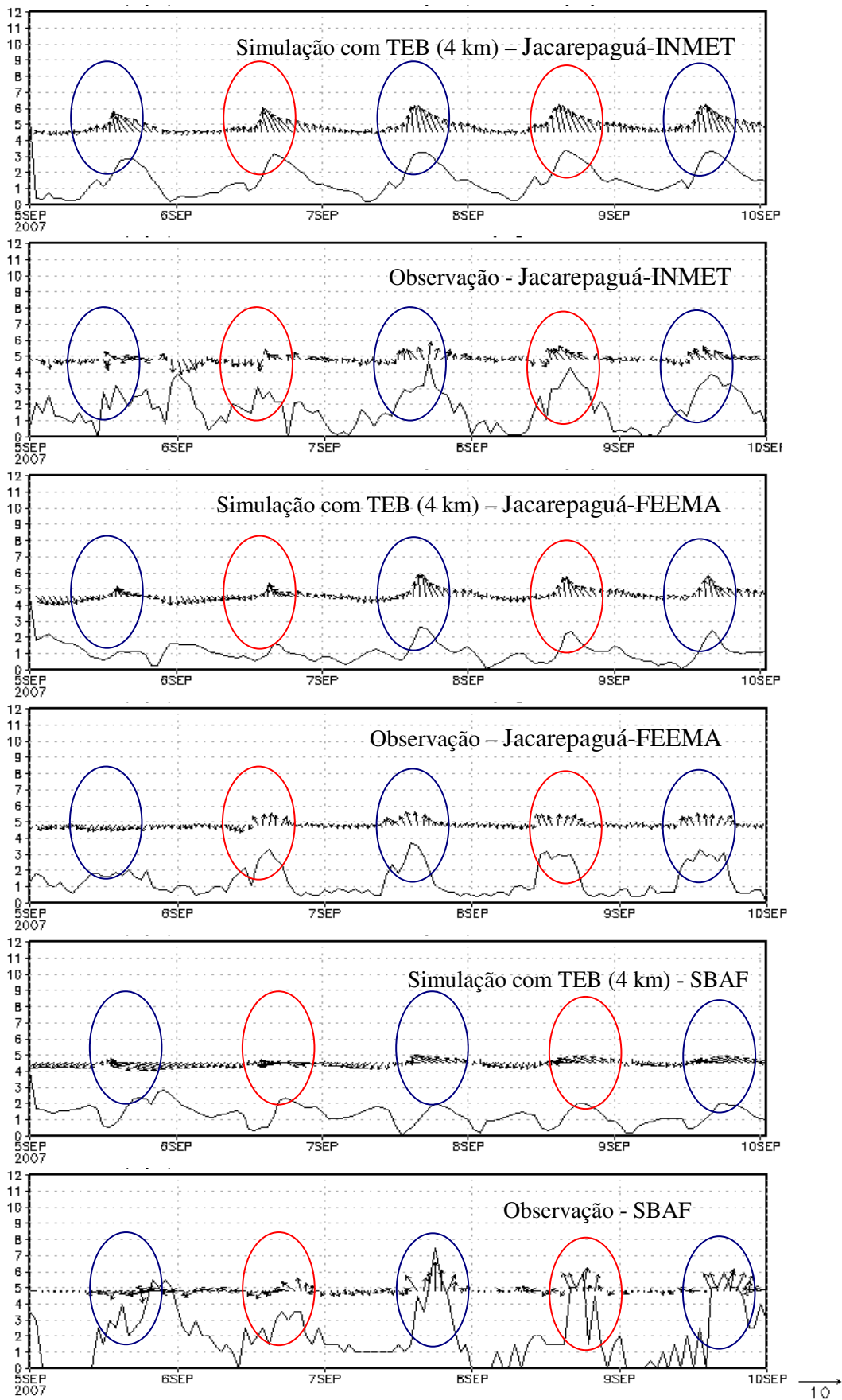


Figura 5.13 - Meteogramas da simulação com TEB e das observações para as estações localizadas na subárea 2: (a) Jacarepaguá-INMET, (b) Jacarepaguá-FEEMA, (c) SBAF e (d) Nova Iguaçu.

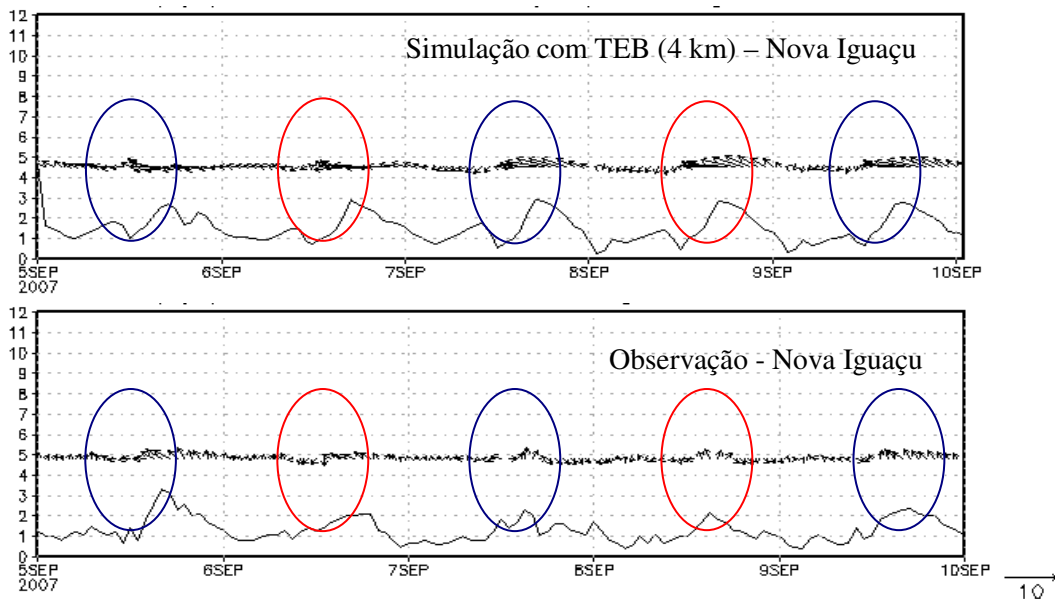


Figura 5.13 - Conclusão.

Análise da subárea 3:

Os meteorogramas para as estações da subárea 3 são mostrados na Figura 5.14.

Nesta subárea verifica-se para a estação de Marambaia, que a simulação representa bem a direção dos ventos de SE à tarde para os dias 07 a 09. Porém, nos dias 05 e 06 observa-se que a simulação ainda apresenta os ventos de SE no período da tarde, mas que não são verificados na observação.

As observações da estação SBSC mostram que no dia 05 e 06 não ficou evidente a ocorrência da brisa marítima, sendo observada a predominância dos ventos de NE. Entretanto nos dias 07 a 09 a brisa marítima já é bem configurada com ventos de SW e S. A simulação, por outro lado, representa a brisa marítima com ventos de SE durante o período de 05 a 09. Destaca-se que a simulação reproduz ventos de SW em torno do horário das 00Z, de acordo com as observações.

Na estação de Ecologia Agrícola, a brisa marítima é bem representada apesar de alguma discrepância na direção do vento. De maneira geral, o modelo BRAMS representou bem o campo de vento.

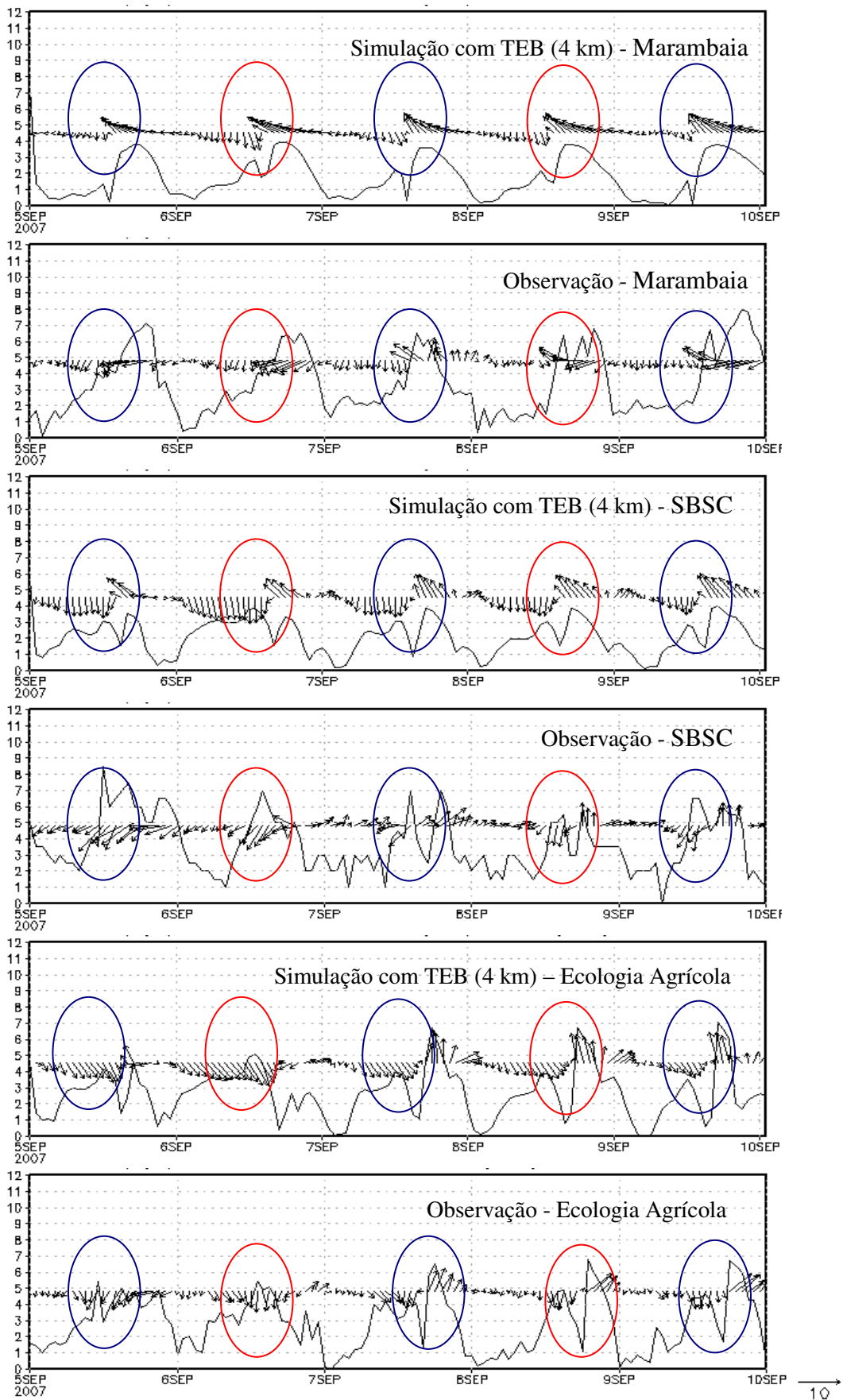


Figura 5.14 - Meteogramas da simulação com TEB e das observações para as estações localizadas na subárea 3: (a) Marambaia, (b) SBSC e (c) Ecologia Agrícola.

5.4.3 - Análise do campo horizontal de temperatura e vento

Nesta seção é analisado o campo horizontal de temperatura e vento entre as simulações com e sem o uso do TEB com o objetivo de verificar a eficiência do esquema TEB na formação e desintensificação da ICU.

A análise do campo horizontal de temperatura e vento para as simulações com e sem TEB referente os dias 06 e 07 de setembro são mostradas respectivamente na Figura 5.15 e 5.16, cuja coluna da esquerda corresponde à simulação sem o TEB e a coluna da direita correspondendo à simulação com o uso do esquema TEB.

As Figuras 5.15 e 5.16 descrevem o campo de temperatura e vento para um ciclo diário. Os valores mínimos de temperatura ocorrem nas regiões mais elevadas (Serra dos Órgãos) principalmente durante a noite e a madrugada (Figuras 5.16a a 5.16h). No decorrer do dia, os valores máximos de temperatura ocorrem por volta das 18Z em ambas as simulações. Ainda nesse horário, destaca-se que na simulação com o TEB ocorrem os valores mais elevados de temperatura (34°C), principalmente entre os maciços da RMRJ. No horário das 21Z observa-se que as simulações com e sem o TEB ainda apresentam altas temperaturas na área urbana. Entretanto, com o uso do TEB observa-se que a ICU é mais intensa e com maior extensão horizontal, devido ao calor aprisionado na RMRJ.

Na análise do vento no período da madrugada e manhã (06Z às 12Z) observa-se a predominância da brisa terrestre em todo o domínio. Destaca-se a presença de um corredor de ventos de norte nas mediações da Baía de Sepetiba e ventos fracos/calmaria da RMRJ, principalmente entre os maciços.

A partir das 12Z verifica-se a presença da brisa marítima com ventos de direção SE/E ao longo de quase toda a orla marítima, exceto nas proximidades da Baía de Sepetiba. Às 15Z a brisa marítima se intensifica em decorrência do aumento do gradiente de temperatura e avança mais para dentro do continente. Entre às 15Z e às 18Z a presença da brisa marítima já é dominante na RMRJ, estabelecendo ventos de SE/E na Baía de Sepetiba. Ressalta-se que no horário das 18Z a simulação com TEB apresenta ventos menos intensos entre os maciços. Estes ventos mais fracos conseqüentemente favorecem os máximos de temperatura devido à menor mistura do ar quente da área urbana com o ar menos quente da vizinhança. No horário das 21Z e das 00Z, a brisa marítima se desintensifica e novamente um ciclo reverso se inicia.

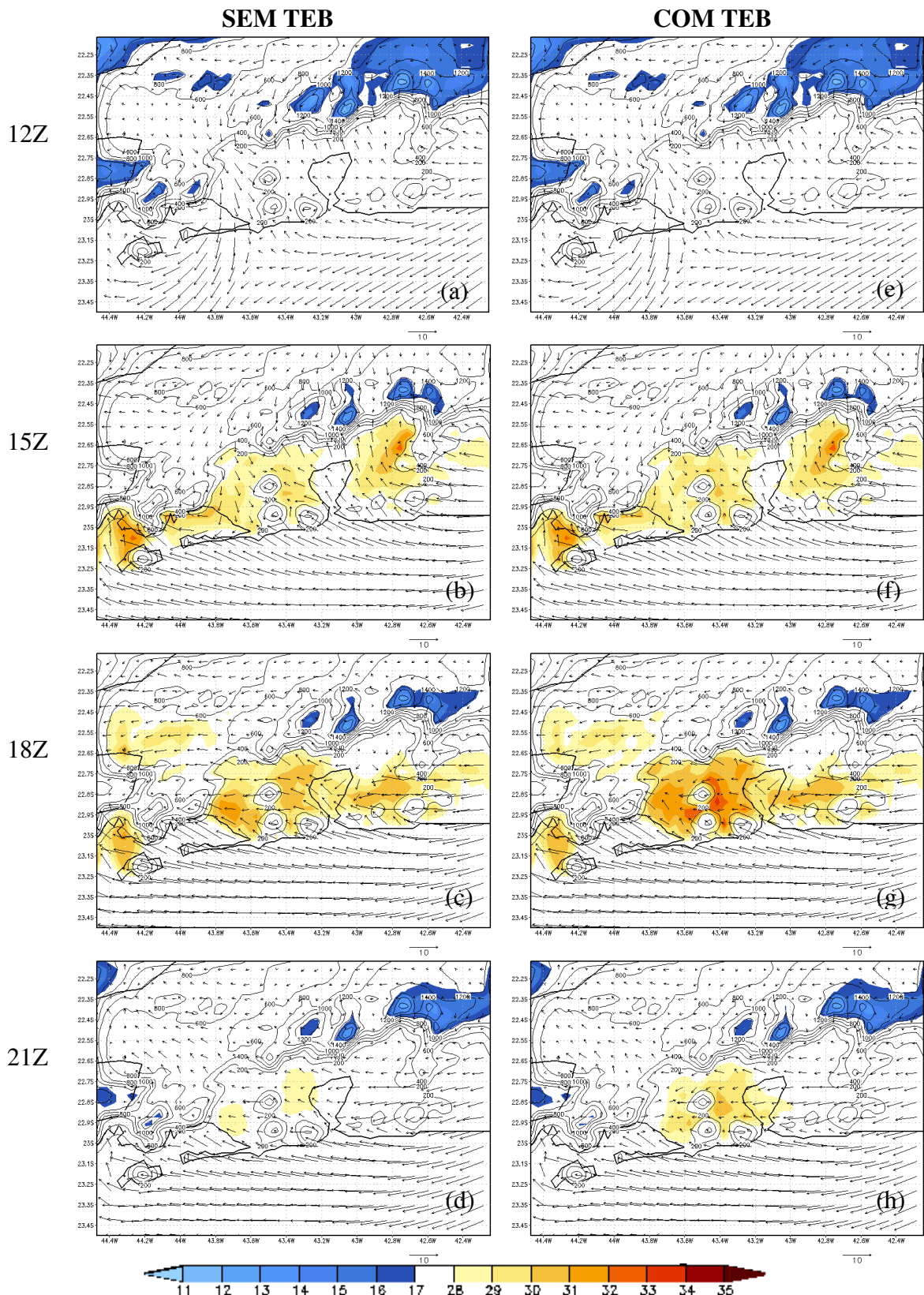


Figura 5.15 - Campo de temperatura do ar e direção do vento referente ao dia 06/09/2007 para as simulações sem TEB (a-d) e com TEB (e-h). A topografia é representada em contornos ao fundo

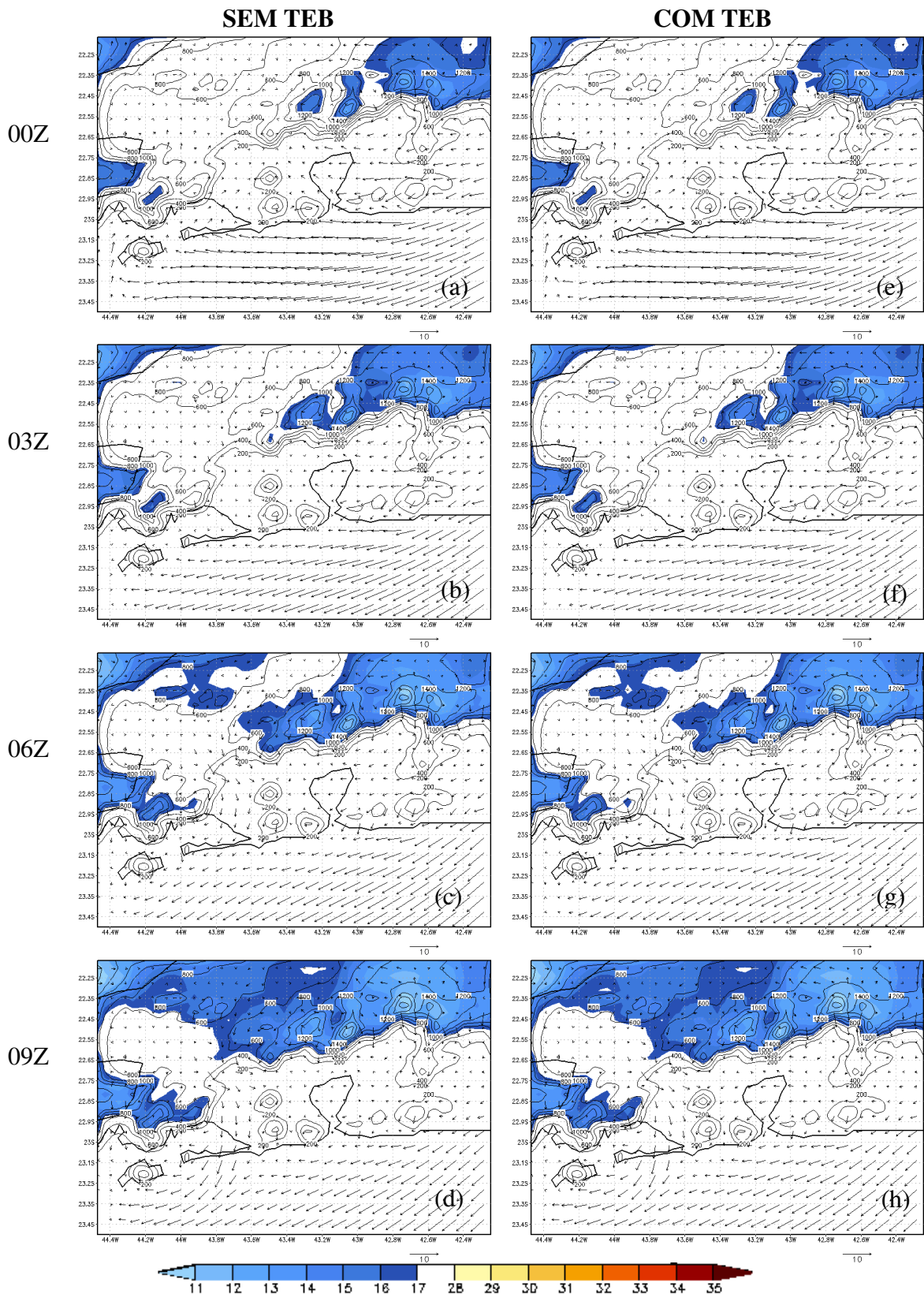


Figura 5.16 - Campo de temperatura do ar e direção do vento referente ao dia 07/09/2007 para as simulações sem TEB (a-d) e com TEB (e-h). A topografia é representada em contornos ao fundo.

Outro aspecto importante no campo horizontal de temperatura e vento é que durante o dia, devido ao efeito da brisa marítima não são verificadas na área urbana ao longo da orla marítima temperaturas tão elevadas como nas demais partes da RMRJ.

Com a finalidade de destacar o efeito do TEB na representação das áreas urbanas, a Figura 5.17 mostra a diferença no campo de temperatura entre as simulações com e sem TEB para os horários 15Z e 18Z do dia 06 de setembro.

A área representada pelos desvios positivos de temperatura (simulação TEB menos sem TEB) coincide com a maior ocupação urbana da RMRJ (Figura 5.16). Ressalta-se, ainda, que entre os maciços de Gericinó-Mendanha, Pedra Branca e Tijuca ocorrem os núcleos de máxima diferença, com valores em torno de 3,2°C no horário das 18Z e de cerca de 2,6°C no horário das 21Z. Nas demais áreas urbanas as diferenças de temperatura são menos intensas.

A análise acima permite concluir que o esquema TEB representa mais adequadamente os processos de superfície da área urbana, tendo em vista a melhor reprodução do campo de temperatura, especialmente nos horários de máxima intensidade da ICU.

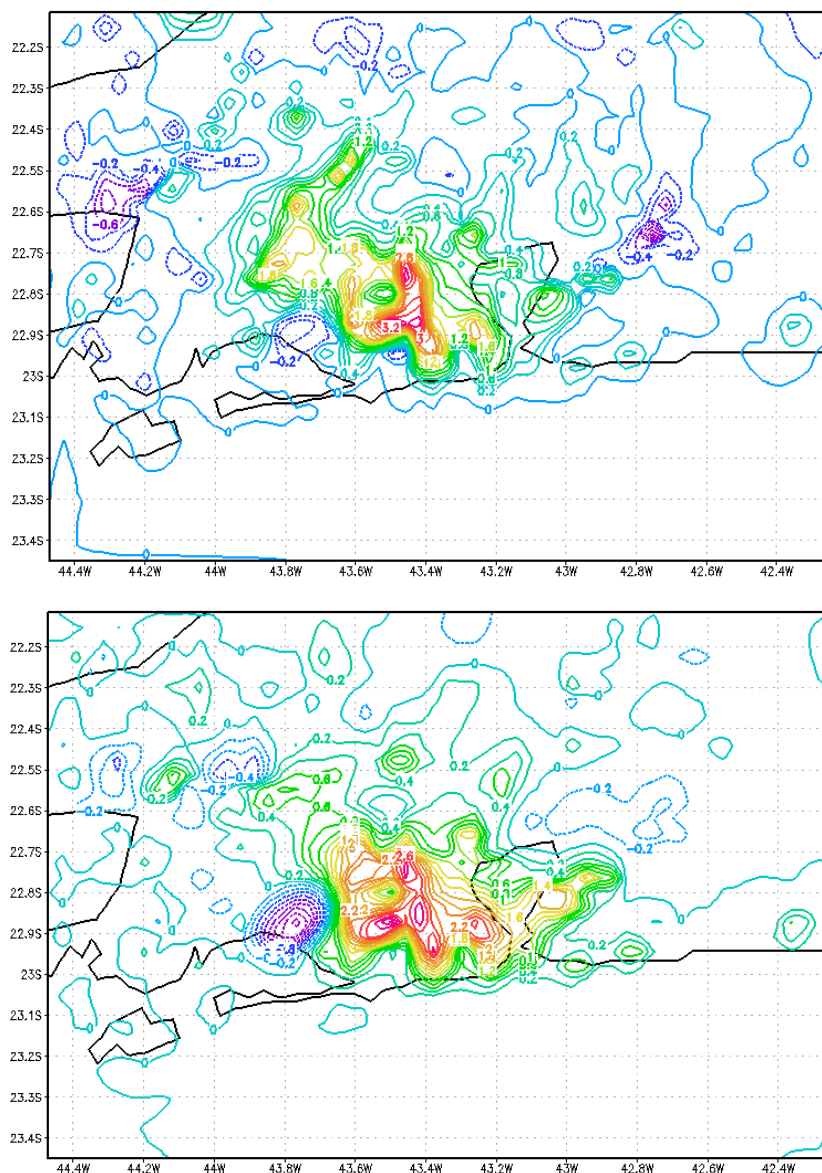


Figura 5.17 – Diferença horizontal de temperatura entre as simulações com e sem o TEB para o dia 06/09/2007 nos horários: (a) 18Z e (b) 21Z.

5.4.4 - Análise vertical da temperatura e do vento

Como descrito anteriormente, o dia 06 foi escolhido como representativo da formação da ICU no período de atuação da ASAS. Portanto, para avaliar o comportamento vertical da temperatura e do vento durante este dia foram escolhidos dois pontos na RMRJ. Estes pontos foram escolhidos a partir do campo horizontal de temperatura e vento apresentado na seção 5.4.3, onde se observou os núcleos de temperaturas mais altas para uma região urbana e não urbana. Os cortes verticais foram feitos para o domínio horizontal de 4 km a partir de duas longitudes fixas,

correspondente aos pontos escolhidos: ponto 1 (43.65°W) e ponto 2 (43.35°W). A Figura 5.18 ilustra os pontos 1 e 2 utilizados na análise vertical. Destaca-se que o ponto 1 é referente a uma região não urbana e o ponto 2 correspondente a parte urbana da RMRJ.

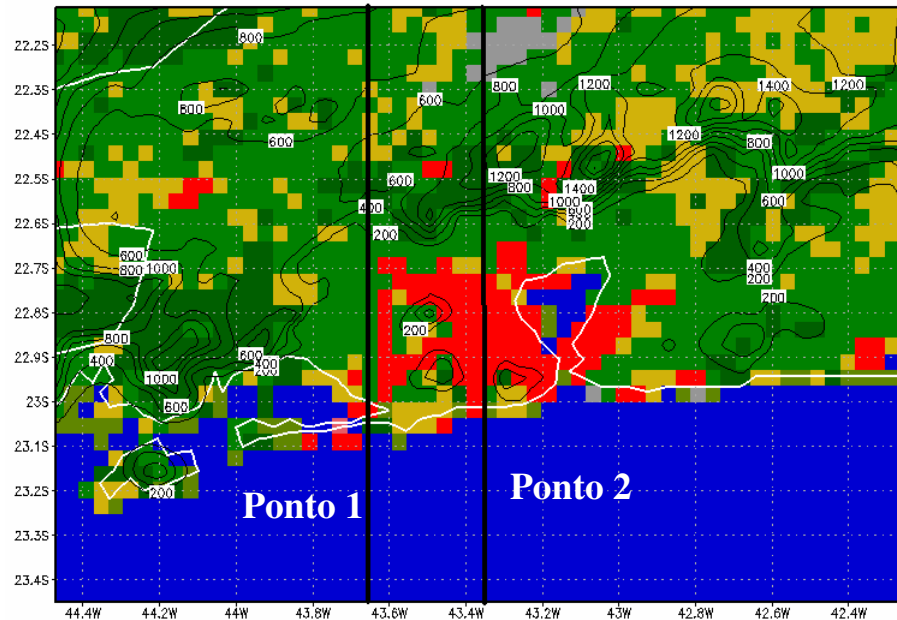


Figura 5.18 – Localização dos pontos 1 e 2 usados para a análise vertical.

Para realização da análise vertical foi estudado um ciclo diário de 06Z do dia 06 até as 03Z do dia 07. Com isso, pode se observar o comportamento da temperatura e do vento durante os horários de elevação e declínio da temperatura, caracterizando o ciclo da ICU.

O perfil de topografia para os pontos 1 e 2 são mostrados na Figura 5.19, em que a linha em vermelho representa a seção vertical referente ao ponto 1 (longitude 43.65°W) e a linha em preto corresponde a seção vertical no ponto 2 (43.35°W). Destaca-se nas proximidades da divisa oceano/continente uma elevação topográfica de cerca de 100 m para o ponto 1 e de aproximadamente 300 m no ponto 2 e a Serra dos Órgãos com 800 m e 1200 m, respectivamente.

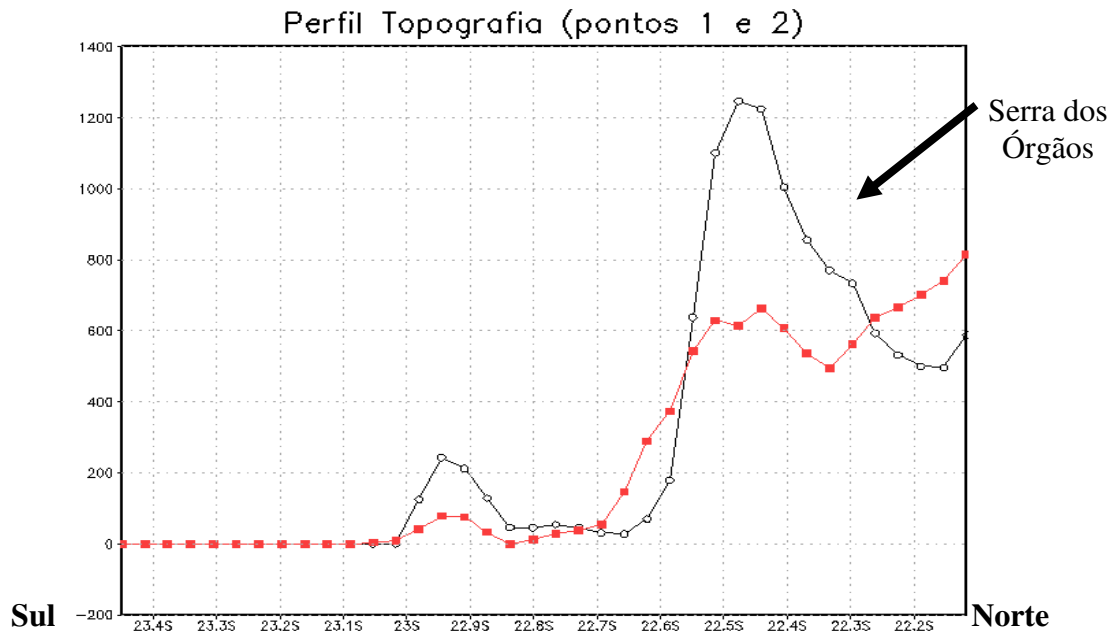


Figura 5.19 - Perfil de topografia para os pontos 1 e 2. Destaca-se a Serra dos Órgãos no setor mais elevado. A linha azul embaixo da figura delimita a superfície oceânica e a linha preta é a continental.

Análise no ponto 1

A Figura 5.20 mostra a análise vertical para o ponto 1 (43.65°W), onde o eixo vertical representa a variação dos níveis verticais de altura em metros e a horizontal representando a variação das latitudes.

No período da madrugada até o início da manhã (06Z às 12Z) observa-se próximo a superfície temperaturas de 22°C a 24°C sobre o oceano e parte do continente. Na circulação dos ventos é marcante a presença da brisa terrestre com ventos de norte desde da Serra dos Órgãos.

A partir das 15Z, observa-se na área urbana um bolsão de temperaturas mais elevadas, característico da ICU. Ao mesmo tempo ocorre um escoamento próximo à superfície do oceano para o continente, dando origem a uma frente de brisa marítima na divisa entre o mar e o continente. Como consequência, uma célula vertical é formada pela convergência do escoamento de componente norte da Serra dos Órgãos e do escoamento de componente sul da brisa marítima.

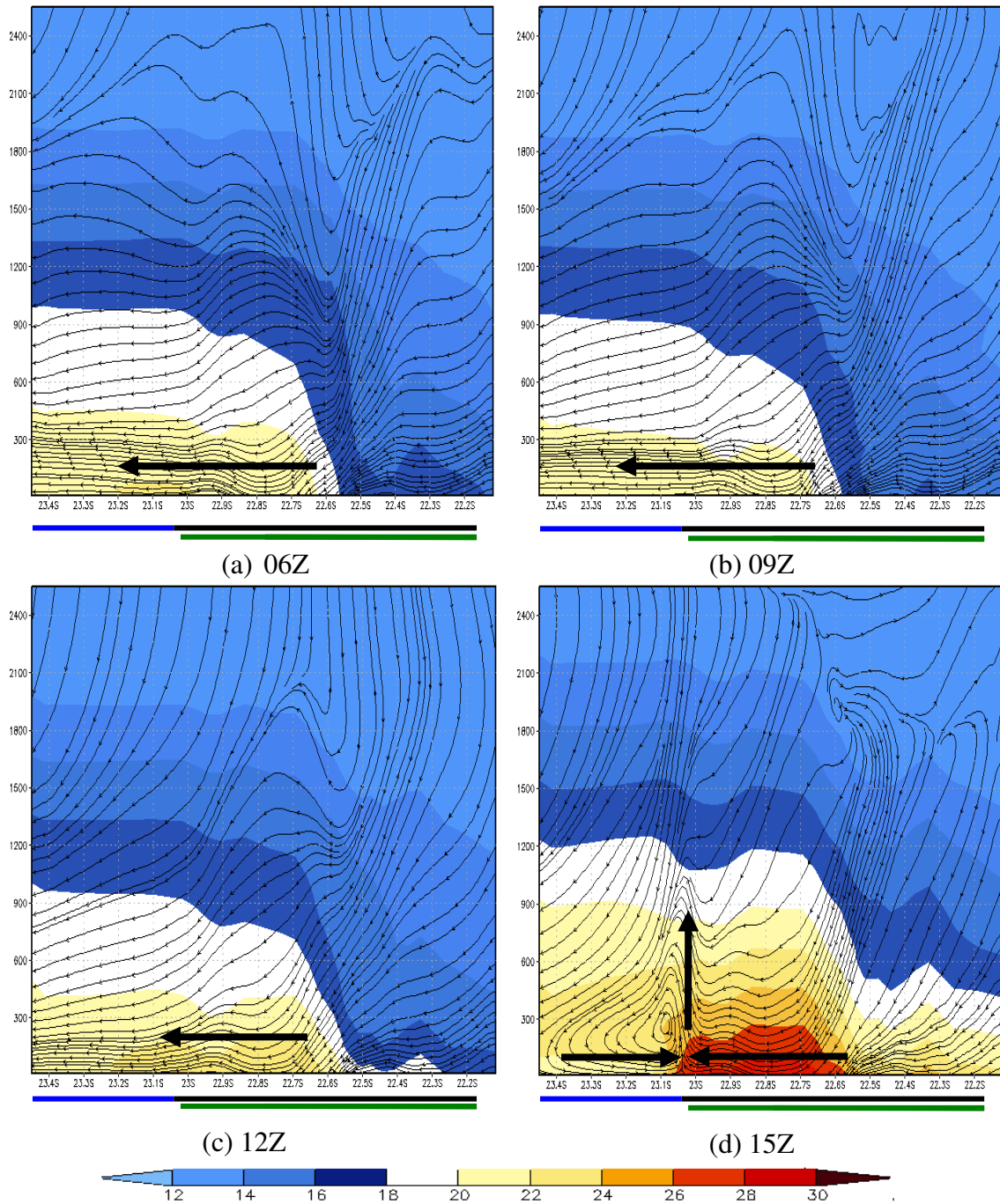


Figura 5.20 - Corte vertical da temperatura e linha de corrente do vento no ponto 1 referente aos dias 06/09/2007 e 07/09/2007: (a)06Z; (b)09Z; (c)12Z; (d)15Z; (e)18Z; (f)21Z; (g) 00Z e (h)03Z. A linha azul embaixo da figura delimita a superfície oceânica e a linha preta é a continental, enquanto a linha verde delimita a área vegetada e a linha vermelha é a área urbana.

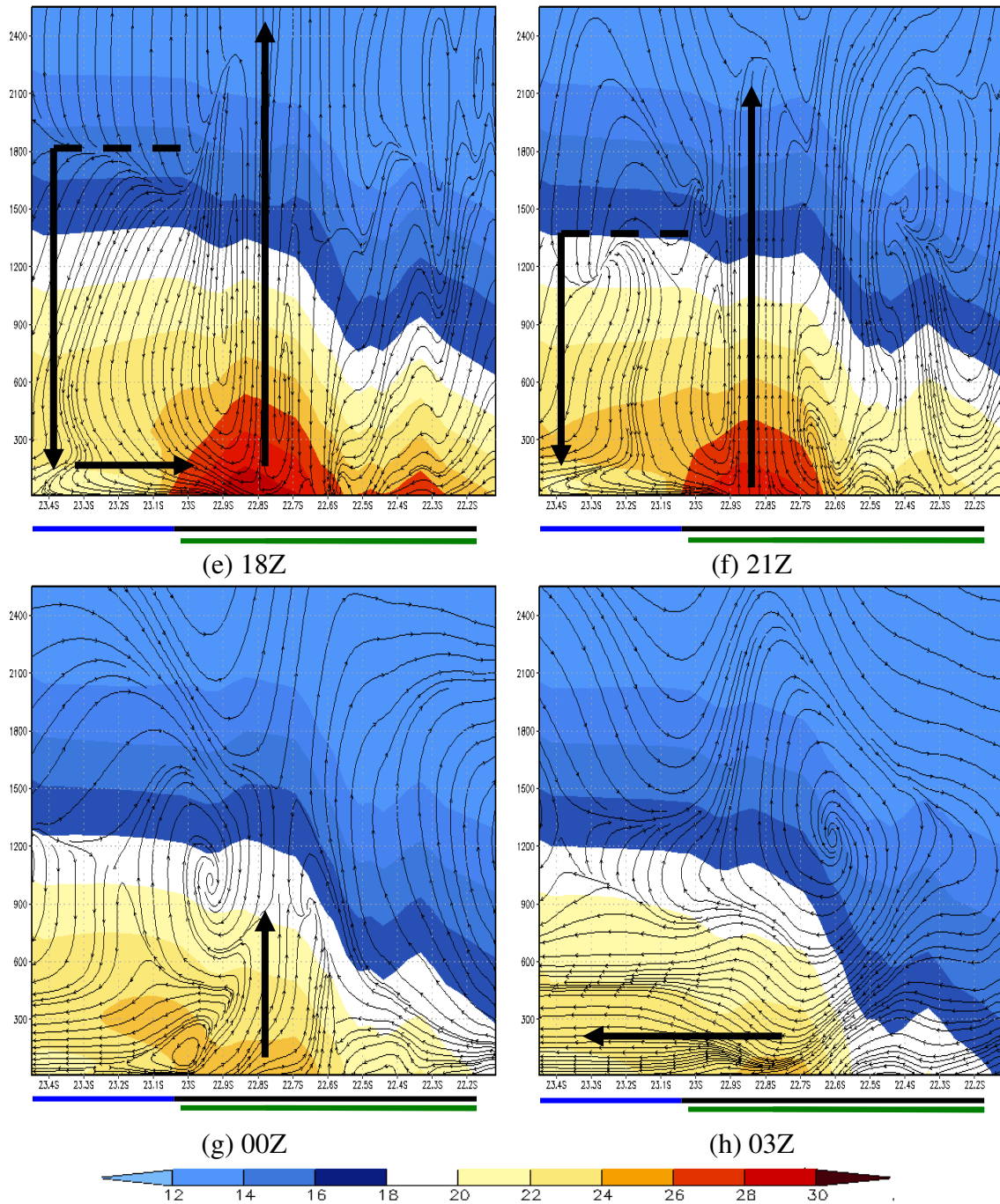


Figura 5.20 - Conclusão.

Às 18Z as temperaturas estão mais elevadas na região urbana (entre 28 a 30°C) principalmente em torno da latitude de 22.8°S, apresentando um maior gradiente horizontal de temperatura com seu entorno e conseqüentemente uma intensa ICU. Destaca-se neste horário, movimentos ascendentes na região urbana atingindo a altura de aproximadamente 2400 m, com movimentos de retorno mais evidentes sobre o oceano e extensão vertical de aproximadamente 1800 m.

Às 21Z verifica-se uma circulação com movimentos ascendentes bem organizados, ocupando uma maior extensão horizontal da área urbana, porém menor profundidade vertical (2200 m). Além disso, uma célula de retorno sobre o oceano menos desenvolvida também é verificada. Às 21Z, a ICU ainda se encontra bem formada e com temperaturas elevadas na RMRJ.

Entre os horários das 00Z e das 03Z do dia 07 observa-se uma diminuição do gradiente horizontal de temperatura. No horário das 00Z, ainda se percebe movimentos ascendentes, porém com menor extensão vertical (900 m). Na sequência (horário das 03Z) o escoamento é predominantemente de norte, caracterizando a brisa terrestre.

Análise no ponto 2

A Figura 5.21 mostra os perfis verticais de linhas de corrente e temperatura para o ponto 2 (43.35°W).

No período da madrugada (horário das 06Z e das 09Z) verifica-se sobre o oceano e parte do continente, núcleos mais elevados de temperaturas de 22 a 24°C. Destaca-se durante este período o escoamento tipicamente da brisa terrestre com ventos predominantemente de norte desde a Serra dos Órgãos até oceano.

Entre às 12Z e às 15Z, destaca-se a elevação das temperaturas na RMRJ em torno de 26 a 28°C e a intensificação do respectivo gradiente horizontal. Observa-se um escoamento raso sobre o oceano em direção ao continente caracterizando a origem a brisa marítima. Além disso, a confluência do escoamento de norte e de sul ocasiona movimentos ascendentes no limiar entre o mar e a terra. Ao mesmo tempo, observa-se na base da Serra dos Órgãos (latitude de 22.6°S) uma confluência do escoamento em superfície e consequente movimento ascendente. É importante ressaltar que na discussão do campo horizontal de temperatura e vento para o horário das 12Z e 15Z (Figuras 5.15e e 5.15f da seção 5.4.3), é verificado a presença da convergência entre ventos catabáticos da Serra dos Órgãos com ventos predominantemente de sul em sua base, os quais são reforçados no horário de 15Z pelo avanço da brisa marítima no continente.

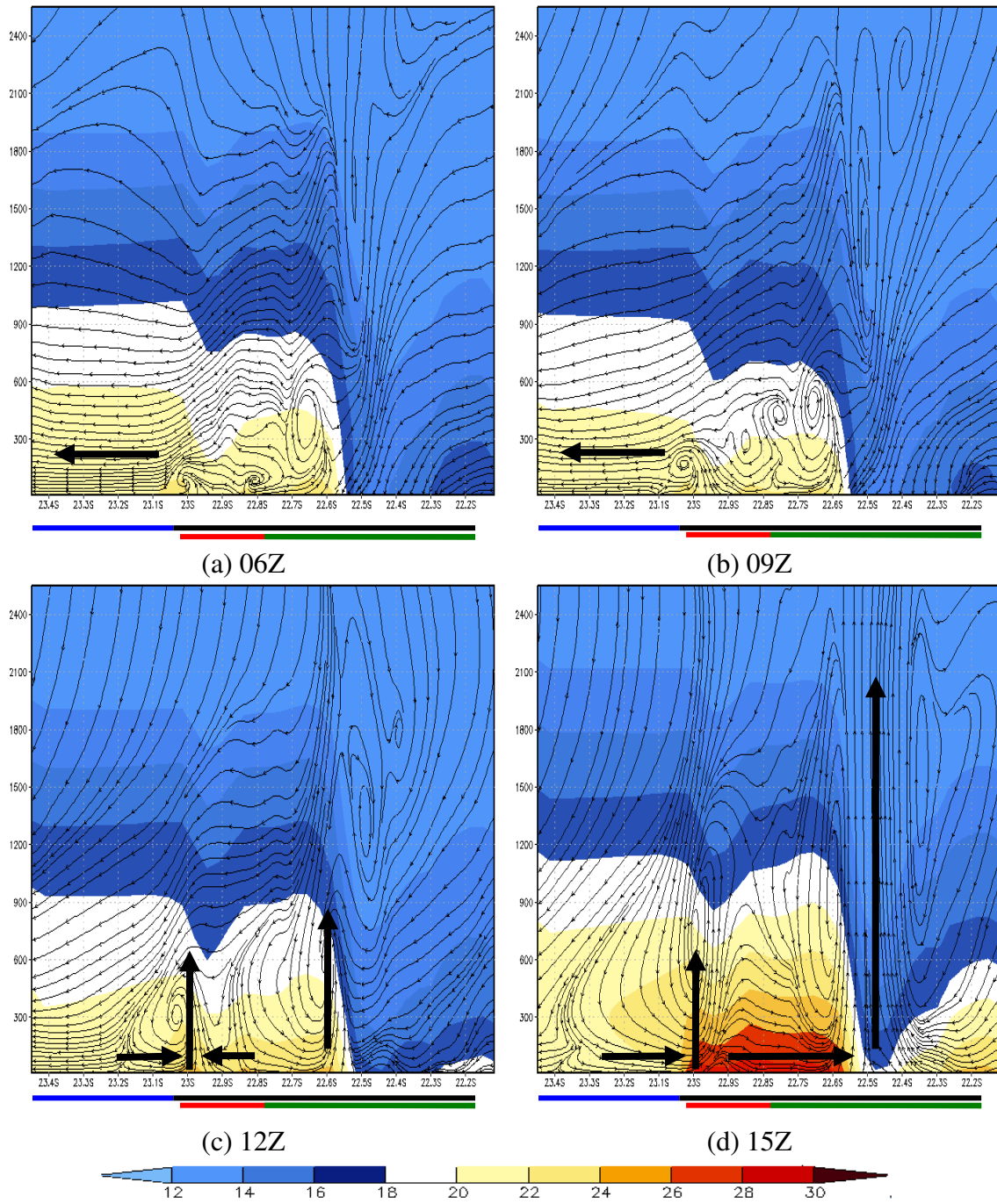


Figura 5.21 - Corte vertical da temperatura e linha de corrente do vento no ponto 2 referente aos dias 06/09/2007 e 07/09/2007: (a)06Z; (b)09Z; (c)12Z; (d)15Z; (e)18Z; (f)21Z; (g) 00Z e (h)03Z. A linha azul embaixo da figura delimita a superfície oceânica e a linha preta é a continental, enquanto a linha verde delimita a área vegetada e a linha vermelha é a área urbana.

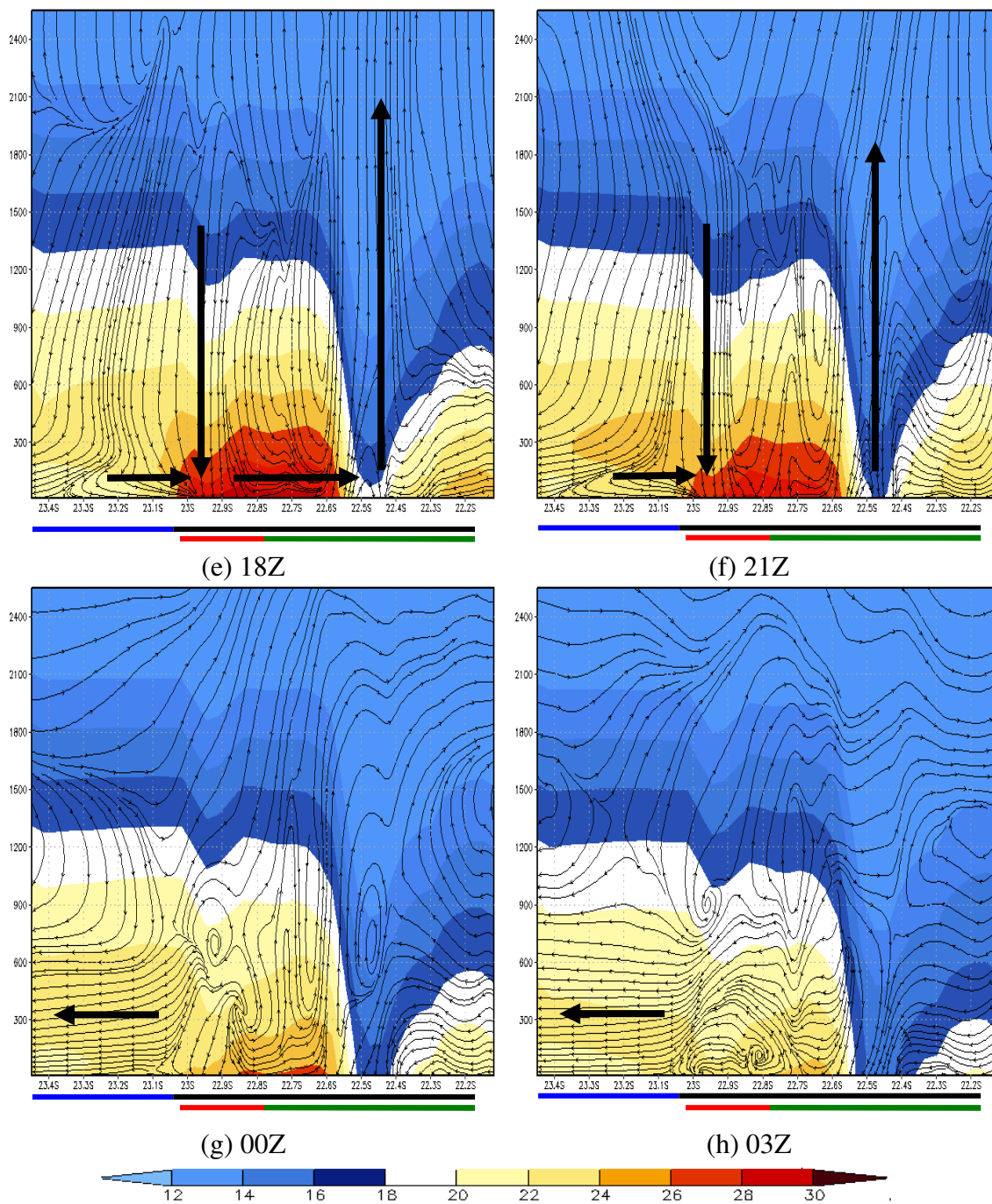


Figura 5.21 – Conclusão.

No horário das 18Z e 21Z não se verifica de forma evidente as correntes ascendentes na área urbana, possivelmente anulada pela corrente de retorno dos movimentos ascendentes gerados na base da Serra dos Órgãos. Durante a noite (00Z e 03Z) se observa a desintensificação das temperaturas na área marítima e continental, e consequente redução do gradiente horizontal de temperatura. O escoamento com ventos de norte, típico da brisa terrestre, passa a predominar na RMRJ.

Um resumo das conclusões acima são destacados a seguir.

- O escoamento em superfície é relativamente influenciado pela topografia nas proximidades da divisa oceano/continente (latitude 22.9°S, Figura 5.18). Este fato é bem evidente nos horários da madrugada;
- A brisa marítima se configura mais cedo na região do ponto 2 (antes de 12Z), enquanto no ponto 1 a brisa marítima é observada no horário de 15Z. Isto ocorre devido a maior intensidade no gradiente horizontal de temperatura no horário de 12Z para o ponto 2;
- A não verificação de movimento ascendente na região urbana (ponto 2) pode ser em decorrência do ramo descendente da corrente de retorno produzida na base da Serra dos Órgãos. Este aspecto visto no ponto 2 difere do trabalho de Moraes (2008), em que se verificou um padrão vertical semelhante ao do ponto 1. Destaca-se que em Moraes (2008) foi utilizado um domínio com melhor espaçamento de grade (1 km) e sem uso do TEB.

Uma simulação adicional com três domínios aninhados também foi feita. Entretanto, os resultados ficaram prejudicados pela produção de precipitação na Grade G3 (espaçamento de 1 km) e não aqui discutidos. Figuras de temperatura e vento para esta simulação são mostradas no Apêndice G.

CAPÍTULO 6

6 - CONCLUSÕES

No estudo foi discutida a Ilha de Calor Urbana e suas conseqüentes alterações na circulação da Região Metropolitana do Rio de Janeiro utilizando o modelo atmosférico BRAMS, avaliando-se o uso do esquema TEB na representação dos processos de superfície em áreas urbanas. Inicialmente foram avaliadas as simulações com o uso de diferentes condições iniciais e de contorno das análises do ETA, Global-CPTEC e as Reanálises do NCEP. As séries temporais de temperatura do ar para estas simulações foram comparadas para as onze estações distribuídas na RMRJ. Na análise estatística ficou evidenciado que as três condições iniciais e de fronteira fornecem bons resultados, destacando as análises do ETA que apresentam os melhores resultados dos índices de correlação e os baixos valores de RMSE. Nesse sentido, o estudo de ICU neste trabalho com o uso do BRAMS considerou a análise do ETA como condição inicial e de contorno.

Na avaliação da umidade do solo na simulação com o TEB foram testados três perfis: solo seco, solo úmido e solo controle. Para os solos seco e controle verificou-se que o ciclo diário de temperatura é pouco sensível a variação de umidade na região urbana (estação SBAF). Na área não urbana (estação Ecologia Agrícola), foi observado uma sensibilidade maior nos resultados, sendo que no solo seco foram encontradas temperaturas máximas mais elevadas. O perfil de solo úmido é o que apresentou a maior diferença entre as demais simulações, reduzindo todo o ciclo diário de temperatura na região urbana, e na área não urbana reduzindo somente nas máximas.

No estudo comparativo entre as diferentes opções do esquema TEB foram analisados os parâmetros de fluxo de calor veicular, altura dos prédios e o fluxo de calor sensível industrial. Na análise dos fluxos de calor veicular (latente e sensível), foi adotado como a máxima liberação de calor veicular os horários de aproximadamente 11Z e 19Z. Na simulação com a presença do fluxo veicular ficou evidenciado o aumento das temperaturas máximas na área urbana, fazendo com que estes valores se aproximem mais das observações. As temperaturas mínimas também ficam mais elevadas, porém este efeito provocou maior discrepância em relação à observação. Este

último aspecto necessita de um tratamento mais criterioso, pois este segundo máximo de calor adotado na curva de fontes veiculares pode não ser representativo da RMRJ.

Na avaliação dos valores dos fluxos de calor sensível industrial foi verificado que o valor duplicado para 20 W/m^2 ocasionou os maiores valores temperatura na área urbana, principalmente na madrugada em torno do horário das 06Z. Esta elevação de temperatura na madrugada é uma consequência direta do aprisionamento de calor na região urbana e ainda é melhor descrito neste caso pelos efeitos dos *canyons* presentes no esquema TEB.

Na comparação das simulações com altura de prédios de 10 metros e 20 metros observou-se que as maiores diferenças de temperaturas entre as simulações ocorreu no período da noite e da madrugada, exceto alguns picos transientes nos dois primeiros dias. Um fato que chamou a atenção foi que as temperaturas para a simulação com prédios de 10 metros apresentaram maiores valores. Entretanto, este é um resultado que merece maior investigação, pois se espera que construções mais altas tenham uma maior capacidade de aprisionamento de calor pelo efeito dos *canyons* urbanos.

Na avaliação da ICU na RMRJ, foi verificado na série temporal da temperatura para a área urbana (estação SBAF) que o uso do TEB ajustou de forma mais realística as temperaturas máximas, porém o mesmo não ocorreu nas temperaturas mínimas. Para a área não urbana (estação Ecologia Agrícola) não foi observado diferenças significativas entre as simulações com e sem o TEB. Este fato já era esperado, pois o esquema TEB não atua diretamente nas áreas não urbanas. Nesta comparação evidenciou-se que na simulação com o uso do TEB há uma melhor representação dos processos de superfície nas áreas urbanizadas.

Pela análise dos meteogramas verificou-se que as magnitudes dos ventos são subestimadas na simulação com o TEB. Por outro lado, o padrão de vento simulado representou bem as observações, detalhando principalmente as mudanças na direção do vento associada às circulações de brisa.

Com relação ao campo horizontal de temperatura para o dia 06 foram evidenciados máximos de temperatura na região urbana marcando a presença da ICU na RMRJ, principalmente nos horários das 18Z e 21Z. Este comportamento é ainda mais destacado com a utilização do TEB. Na análise do campo de vento, observou-se que as simulações com o TEB apresentaram ventos mais fracos na área urbana, favorecendo a menor mistura do ar quente da área urbana com o ar menos quente da vizinhança.

A estrutura vertical da ICU na RMRJ é analisada em cortes verticais em duas regiões distintas. A primeira (ponto 1) é referente a uma região não urbana e a segunda (ponto 2) correspondente a parte urbana da RMRJ. As análises verticais para os dois pontos evidenciam as circulações de brisa marítima e terrestre nos períodos diurno e noturno, respectivamente. A topografia tem papel importante nos ventos catabáticos da Serra dos Órgãos durante a madrugada/manhã, além disso, elevações menos pronunciadas próximas à divisa oceano/continente também perturbam o escoamento próximo à superfície. No ponto 1 a brisa marítima se inicia após 12Z (e já bem evidente no horário das 15Z), enquanto no ponto 2 esta tem início antes das 12Z. Nesta comparação entre os pontos 1 e 2 é evidenciado que na presença da área urbana (ponto 2) há um maior gradiente horizontal de temperatura e uma ICU mais intensa, contribuindo para um avanço mais rápido da brisa marítima. Enquanto o ponto 1 como a ilha de calor é menos intensa, há um atraso na entrada da brisa. O trabalho de Freitas (2003) mostra que a presença da ICU na região metropolitana de São Paulo atua no sentido de antecipar a chegada da brisa marítima. Este efeito, portanto, também é evidenciado para a RMRJ, como discutido acima. Os movimentos ascendentes associados a ICU são mais evidentes e organizados no setor do ponto 1 (entre 18Z e 00Z) do que no do ponto 2. Acredita-se que a não evidência dos movimentos ascendentes na área urbana no setor do ponto 2 estão associados as correntes de retorno dos movimentos ascendente na base da Serra dos Órgãos. A partir da análise desses cortes verticais foi possível identificar a extensão horizontal e vertical da ICU.

Com este trabalho foi possível avaliar que o esquema TEB mostrou-se como uma importante ferramenta no estudo da ICU na RMRJ.

6.1 - Sugestões para trabalhos futuros

Todas as análises realizadas nesse trabalho foram feitas com a presença da topografia da RMRJ. Sendo assim, a realização de simulações sem a presença do efeito da topografia é recomendada a fim de verificar a influência desta nas circulações locais na RMRJ. Além disso, estudos sobre o impacto da vegetação (homogênea x não homogênea) na RMRJ poderiam ser feitos para identificar a formação, intensificação e desintensificação da ICU.

Dada a grande habilidade do esquema TEB na representação dos processos de área urbana, seria de grande importância a realização de um maior detalhamento da

ocupação urbana (verticalização e espaçamento entre as construções) e uso do solo na RMRJ. Um aspecto de grande importância que traria grandes benefícios nessa etapa seria a aplicação e uso de produtos de sensoriamento remoto. Um maior detalhamento das fontes veiculares também é desejável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARNFIELD, A. J., 2006, “Micro and Mesoclimatology”, *Progress in Physical Geography* 30, pp. 677-689.

AMORIM, M. C. C. T. DUBREUIL, V. ; QUENOL, H. ; SANT'ANNA NETO, J. L., 2009, “Características das Ilhas de Calor em Cidades de Porte Médio: Exemplos de Presidente Prudente (Brasil) e Rennes (França)”, *Confins (Paris)*, v. 7, pp. 1-16.

BARNES, S. L., 1964, “A Technique for Maximizing Details in Numerical Weather Map Analysis”, *J.Appl. Meteor.*, v.3, pp. 396-409.

BRAZEL, A.; GROSSMAN-CLARKE, S.; ZEHNDER, J. A.; HEDQUIST, B. C., 2003, “Observations and MM5 Simulations of the Urban Heat Island in Phoenix, Arizona, USA With a Modified Land Cover Scheme”. In: *5th International Conference on Urban Climate*, American Meteorological Society, Lodz, Poland.

CABRAL, F. C., 2008, *Estudo numérico sobre os impactos da expansão de áreas de pastagem e cultivo de soja nas circulações locais da região amazônica*. Dissertação de M.Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

CHEN, C., COTTON, W. R., 1983, “A One Dimensional Simulation of the Stratocumulus Capped Mixed Layer”, *Bound- Layer Meteor.*, v. 25, pp. 289-3321.

CHEN, F, KUSAKA, H., TEWARI, M, BAO, J-W, HIRAKUCHI, H., 2004, “Utilizing the Coupled WRF/LSM/Urban Modeling System With Detailed Urban Classification to Simulate the Urban Heat Island Phenomena Over the Greater Houston Area”. In: *5th Urban Environment Conference*, American Meteorological Society, Boulder, Colorado.

COTTON, W. R.; PIELKE SR. R. A.; WALKO, R. L.; LISTON, G. E.; TREMBACK, C. J.; JIANG, H.; MCANELLY, R. L.; HARRINGTON, J. Y.; NICHOLLS, M. E.;

CARRIO, G. G.; MCFADDEN, J. P., 2003, “RAMS 2001: Current Status and Future Directions”, *Meteor. Atmos. Phys.*, v. 82, pp. 5-29.

COSTA, A. C. L.; MATTOS, A., 1998, “Estudo da Ilha de Calor Urbana em Cidade de Grande Porte na Região Equatorial”. In: *Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Brasília, v. 1.

ERIKSEN, W., 1978, “Okologische Crapekter Umwelt Belastung Hannovers Stadtklina und Lutverunreinigung”, *Hannover und sein Unland*, Hannover.

FARIAS, H. S., 2007, *O Ritmo Semanal do Ciclo no Bairro Maracanã*. Dissertação de M.Sc., Departamento de Geografia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, São Paulo, SP, Brasil.

FIALHO, E. S.; AZEVEDO, T. R., 2009, “Refletindo sobre o conceito de ilha de calor”. In: *XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada: A Geografia Física Aplicada e as dinâmicas de apropriação da natureza*. Viçosa: UFV, v. 1.

FREITAS, S. R., 1999, *Modelagem numérica do transporte e das emissões de gases e aerossóis de queimadas no cerrado e floresta tropical da América do Sul*. Tese de D.Sc., Instituto de Física da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

FREITAS, E. D.; SILVA DIAS, P. L. , 2000, “O Efeito da Ilha de Calor Urbana sobre os Fluxos de Calor Através da Utilização do Modelo RAMS”. In: *Anais do XI Congresso Brasileiro de Meteorologia*, pp. 3566-3574, Rio de Janeiro - RJ

FREITAS, E. D.; SILVA DIAS, P. L., 2002, “Análise da Eficiência de Parametrizações para Regiões Urbanas Acopladas ao Modelo RAMS. In: *Anais do XII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, pp. 2408-2417, Foz do Iguaçu - PR.

FREITAS, E. D., 2003, *Circulações locais em São Paulo e sua influência sobre a dispersão de poluentes*. Tese de D.Sc., Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

FREITAS, E. D. ; SILVA DIAS, P. L., 2005, “Alguns Efeitos de Áreas Urbanas na Geração de uma Ilha de Calor”, *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 20, n. 3, pp. 355-366.

FREITAS, E. D.; ROZOFF, C; COTTON, W. R.; SILVA DIAS, P. L., 2007, “Interactions of Urban Heat Island and Sea Breeze Circulations During Winter Over The Metropolitan Area of São Paulo – Brazil”, *Bound-Layer Meteorol.*, v. 122, n. 1, pp. 43-65.

GOUVÊA, M. L.; SAAD, S. I. ; FREITAS, E. D.; SILVA DIAS, P. L.; CAMARGO, R., 2006, “Estudo de caso: tempestade envolvendo interação entre a brisa marítima e o efeito de ilha de calor urbana em 01/03/99”. In: *Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Florianópolis - SC.

GOUVÊA, M. L., 2007, *Cenários de impacto das propriedades da superfície sobre o conforto térmico humano na cidade de São Paulo*. Dissertação de M.Sc., Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

GRELL, G.A.; DEVENYI, D., 2002, “A Generalized Approach to Parameterizing Convection Combining Ensemble and Data Assimilation Techniques”, *Geophysical Research Letters*, v. 29, pp.1-38.

GRIMMOND, C. S. B., 2006, “Progress in Measuring and Observing the Urban Atmosphere”, *Theoretical and Applied Climatology*, v. 84, pp.3-22.

KLEMP, J. B., WILHELMSON, R. B., 1978, “The Simulation of Three-Dimensional Convective Storm Dynamics”, *J. Atmos. Sci.*, v. 35, pp.1070-1096.

LANDSBERG, H.E., 1981, *The Urban Climate*. New York, Academic Press.

LEI M., NIYOGIL D., KISHTAWAL C., PIELKE R. A., BELTRÁN-PRZEKURAT A., NOBIS T. E., VAIDYA S. S., 2008, “Effect of Explicit Urban Land Surface

Representation on the Simulation of the 26 July 2005 Heavy Rain event over Mumbai, India”, *Atmos. Chem. Phys.*, v.8, pp 5975–5995.

LOMBARDO, M. A., 1984, “A Ilha de Calor da Metrópole Paulistana: Subsídio ao Planejamento Urbano”. *In: Anais do III Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Belo Horizonte - MG.

MASSON, V., 2000, “A Physically-Based Scheme for the Urban Energy Budget in Atmospheric Models”, *Boundary-Layer Meteorology*, v. 94, pp. 357-397.

MASSON, V.; GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T. R., 2002, “Evaluation of the Town Energy Budget (TEB) Scheme with Direct Measurements from Dry Districts in Two Cities”, *J. Appl. Meteorol.*, v. 41, n. 10, p. 1011-1026.

MELLOR, G. L., YAMADA, T., 1974, “A Hierarchy of Turbulence Closure Models for Planetary Boundary Layers”, *J. Atmos. Sci.*, v. 31, pp. 1791-1806.

MELLOR, G. L., YAMADA, T., 1982, “Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problems”, *Rev. Geophys. and Space Phys.*, v. 20, n. 4, pp. 851-875.

MESINGER, F. e ARAKAWA, A., 1976, “Numerical Methods Used in Atmospheric Models”, *GARP Publication Series*, No. 17, WMO/ICSU Joint Organizing Committee, p. 64.

MOURA, J. R. S.; ANTUNES, F.S.; SAMPAIO, A. C.; BARBOSA, D. R.; SANTOS, H. M.; RAMALHO, R. S.; GUEDES, R. S. C. & GAMA, S. V. G., 1998, *Modificações Sócios Ambientais e Zoneamento de Risco na Zona Oeste do Rio de Janeiro*. *In: Relatório Parcial do Projeto Interinstitucional: O Porto de Sepetiba –Cenário, Impactos e Perspectivas*, 1. Rio de Janeiro: CPCH/IGEO/UFRJ, p. 48.

MORAES, N. O. ; PIMENTEL, L. C. G.; MARTON, E., 2005, “Simulações Numéricas da Formação de Ilha de Calor na Região Metropolitana do Rio de Janeiro”, *Anuário do*

Instituto de Geociências (Rio de Janeiro), Universidade Federal do RJ, v. 28 2, pp. 116-138.

MORAES, N. O., 2008, *Modelagem do mecanismo de formação e desintensificação de ilha de calor na Região Metropolitana do Rio de Janeiro*. Dissertação de M.Sc., Programa de Engenharia Mecânica da COPPE/ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

NORWINE, J. R., .1973, “Heat Island Properties of an Enclosed Multilevel Suburban Shopping Center”, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, v. 54, pp. 637-641.

NIELSEN-GAMMON, J.W., 2000, “The Houston Heat Pump: Modulation of a Land-Sea Breeze by an Urban Heat Island”. In: The Tenth Penn State/NCAR MM5 Users' Workshop Mesa Laboratory, NCAR.

OKE, T. R. E EAST, C., 1971, “The Urban Boundary Layer in Montreal”, *Boundary Layer Meteorol.*, v.1, pp.411-437.

OKE, T. R., 1973,. “City Size and The Urban Heat Island”, *Atmos. Environ.*, v.7, pp. 769-779.

OKE, T. R. , 1978, *Boundary Layer Climates*. London: Methuen & Ltd. A. Halsted Press Book, John Wiley & Sons, New York.

OKE, T. K. , 1982, “The Energetic Basic of The Urban Heat Island”. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 108, pp.1-24.

OKE, T.R. , 1987, *Boundary Layer Climates*. 2. ed., London; New York: Routledge.

PEREIRA FILHO, A. J. , 2000, “Chuvas de Verão e as Enchentes na Grande São Paulo: El Niño, Brisa Marítima e Ilha de Calor”. In: II Seminário Brasileiro de Hidrometeorologia, Rio de Janeiro. XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Rio de Janeiro- RJ.

PIELKE, R. A.; COTTON, W. R.; WALKO, L. R.; TREMBACK, C. J.; LYONS, W. A.; GRASSO, L. D.; NICHOLLS, M. E.; MORAN, M. D.; WESLEY, D. A.; LEE, T. J.; COPELAND, J. H., 1992, “A Comprehensive Meteorological Modeling System – RAMS”, *Meteorol. Atmos. Phys.*, v. 49, p. 69-91.

RIZWAN, A. M.; DENNIS, Y.C. L.; LIU, C., 2008, “A Review on The Generation, Determination and Mitigation of Urban Heat Island”, *Journal of Environmental Sciences*, v.20, pp.120–128.

ROZOFF, C.M.; COTTON, W.R.; ADEGOKE, J.O., 2003, “Simulation of St. Louis, Missouri, Land Use Impacts on Thunderstorms”, *J. Appl. Meteorol.*, v. 42, n 6, pp. 716–738.

RUSSO, P. R., 2002, *A Distribuição das Concentrações de Partículas em Suspensão na Atmosfera da Porção Centro-Oriental do Município do Rio de Janeiro*. Dissertação de M.Sc., Departamento de Geografia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, São Paulo, SP, Brasil.

SANTAMOURIS, M., 2001, “Energy and Climate in the Urban Built Environment”, *James & James Science Publishers Ltd.*, London.

SILVA, H. S., 1986, *Estudo da Circulação Associada a uma Ilha de Calor Urbana com um Modelo de Simulação da Brisa Marítima*. Dissertação de M.Sc., Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

TREMBACK, C. J.; WALKO, R. L., 2004, “Implementing Very-High Resolution Capabilities into a Mesoscale Atmospheric Model: New Capabilities for the Regional Atmospheric Modeling System (RAMS)”. In: *Mesoscale And CFD Modeling For Military Applications*, Jackson, MS.

TRIPOLI, G. J.; COTTON, W. R., 1982, “The Colorado State University Three-Dimensional Cloud Meso-scale Model – 1982. Part. I: General Theoretical Framework and Sensitivity Experiments”, *J. Rech. Atmos.*, v. 16, n. 3, pp. 185-220.

VENDRASCO, E. P.; FREITAS, E. D. ; SILVA DIAS, P. L., 2004, “Separação de Fatores para Estudo dos Efeitos do Albedo e Emissividade sobre o Ciclo Diurno de Temperatura”. In: *Anais do XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Fortaleza-CE.

WALKO, R. L.; BAND, L. E.; BARON, J.; KITTEL, T. G.F.; LAMMERS, R.; LEE, T. J.; OJIMA, D.; PIELKE, R. A.; TAYLOR, C.; TAGUE, C.; TREMBACK, C. J.; VIDALE, P. L., 2000, “Coupled Atmosphere-Biophysics-Hydrology Models for Environmental Modeling”, *Journal of Applied Meteorology*, v. 39, pp. 931-944.

APÊNDICE A

Tabela A1 – Ponto real das estações e os pontos de grades mais próximos no domínio 2 utilizado para a comparação pontual de temperatura e vento.

Estação	Ponto real da estação convertido para graus	Ponto usado de grade mais próximo da estação no domínio 2
SBGL	-22.8°/-43.25°	-22.801°/-43.221°
SBRJ	-22.9°/-43.16°	-22.909°/-43.182°
SBAF	-22.86°/-43.38°	-22.873°/-43.377°
SBSC	-22.93°/-43.71°	-22.945°/-43.728°
Ecologia Agrícola	-22.800°/-43.6833°	-22.801°/-43.689°
Marambaia	-23.0500°/-43.6000°	-23.053°/-43.611°
Jacarepaguá - INMET	-22.9867°/-43.3700°	-22.981°/-43.377°
Niterói	-22.9063°/-43.133°	-22.909°/-43.143°
Copacabana	-22.9883°/-43.1901°	-22.981°/-43.182°
Nova Iguaçu	-22.75°/-43.43°	-22.765°/-43.416°
Jacarepaguá - FEEMA	-22.933°/-43.366°	-22.945°/-43.377°

APÊNDICE B

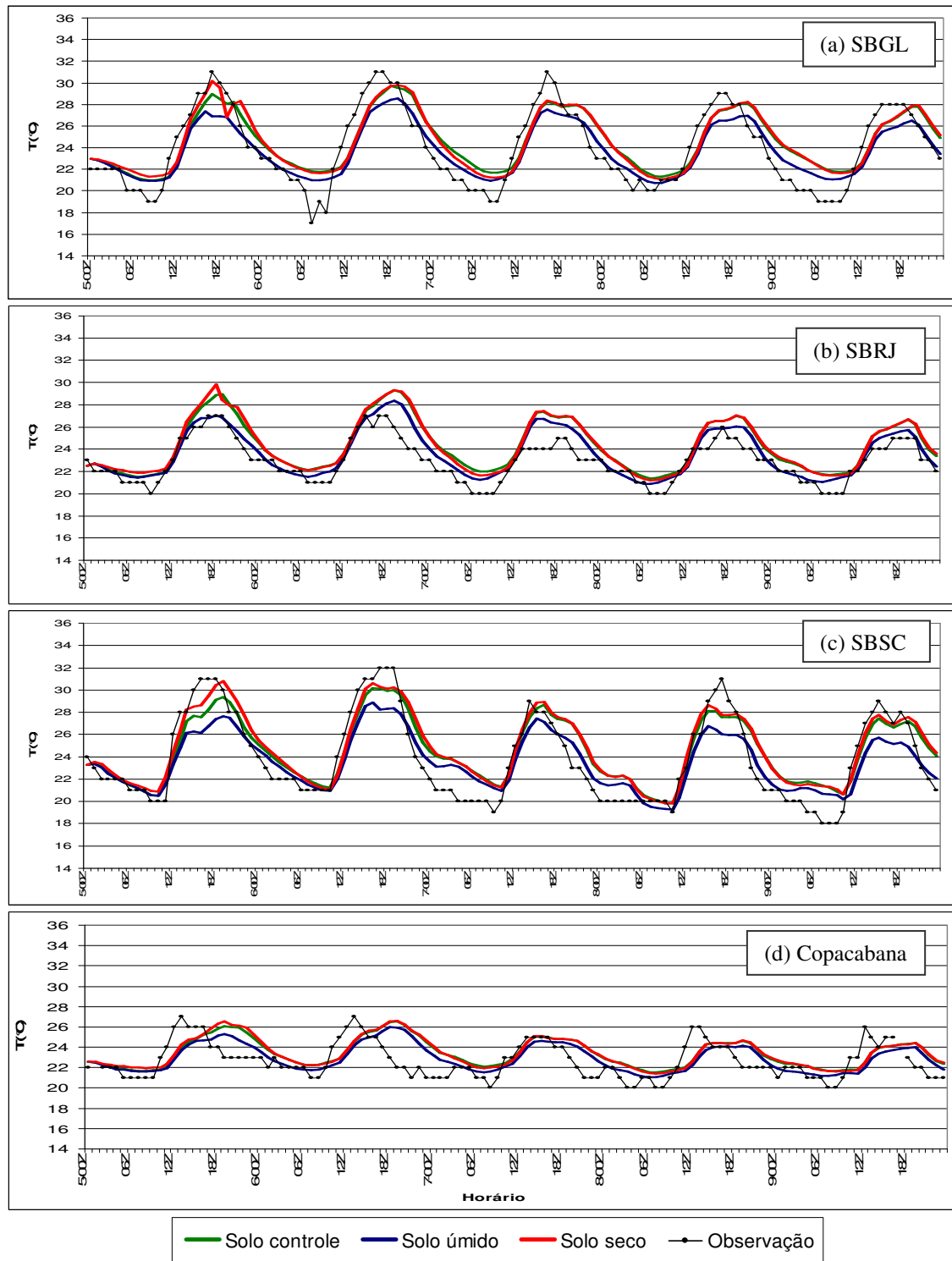


Figura B1 - Série temporal da temperatura do ar entre as simulações com solo controle, solo seco e solo úmido e as observações para as estações: (a) SBGL, (b) SBRJ, (c) SBSC, (d) Copacabana, (e) Niterói, (f) Jacarepaguá-INMET, (g) Jacarepaguá-FEEMA, (h) Marambaia e (i) Nova Iguaçu.

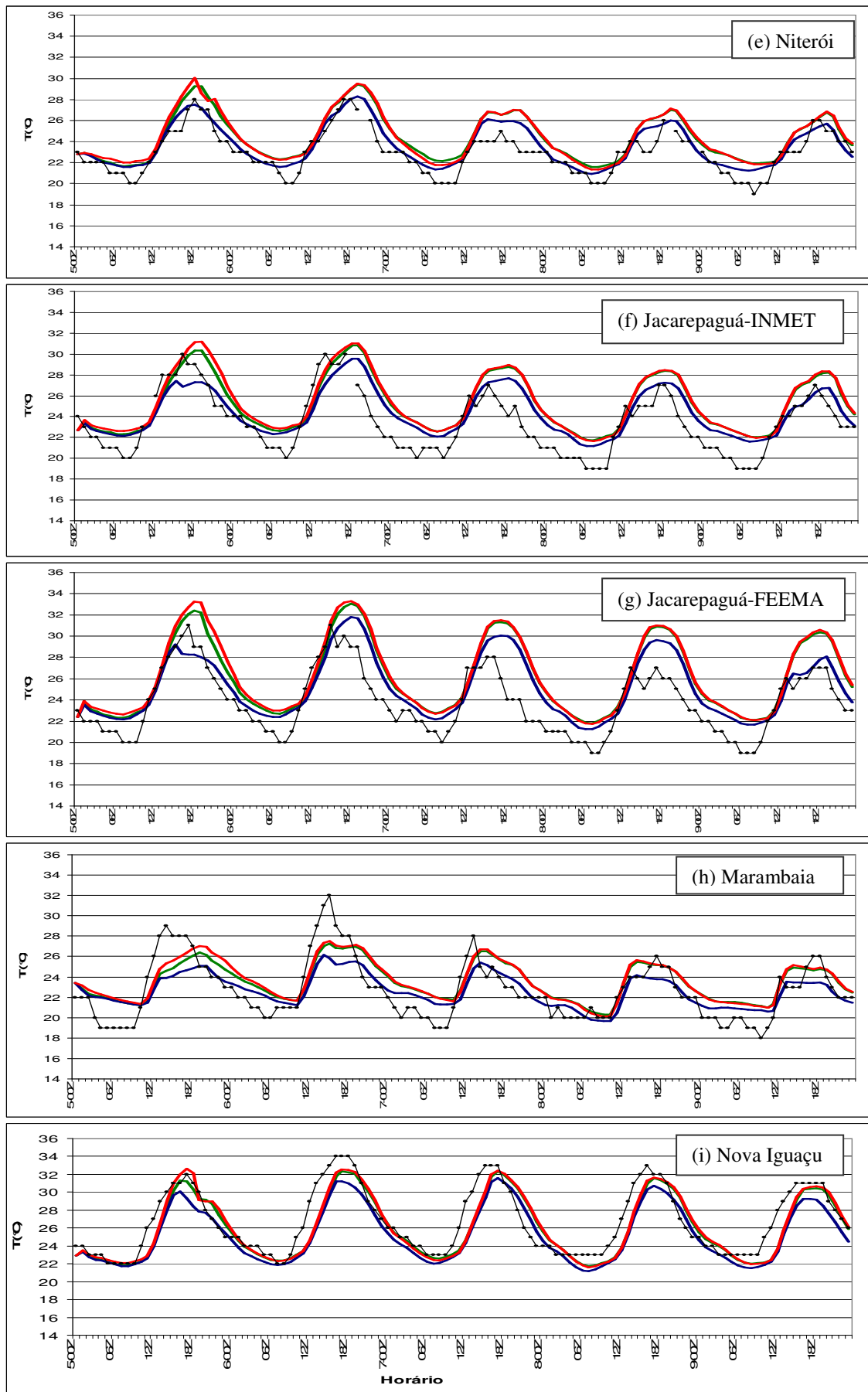


Figura B1 – Conclusão.

APÊNDICE C

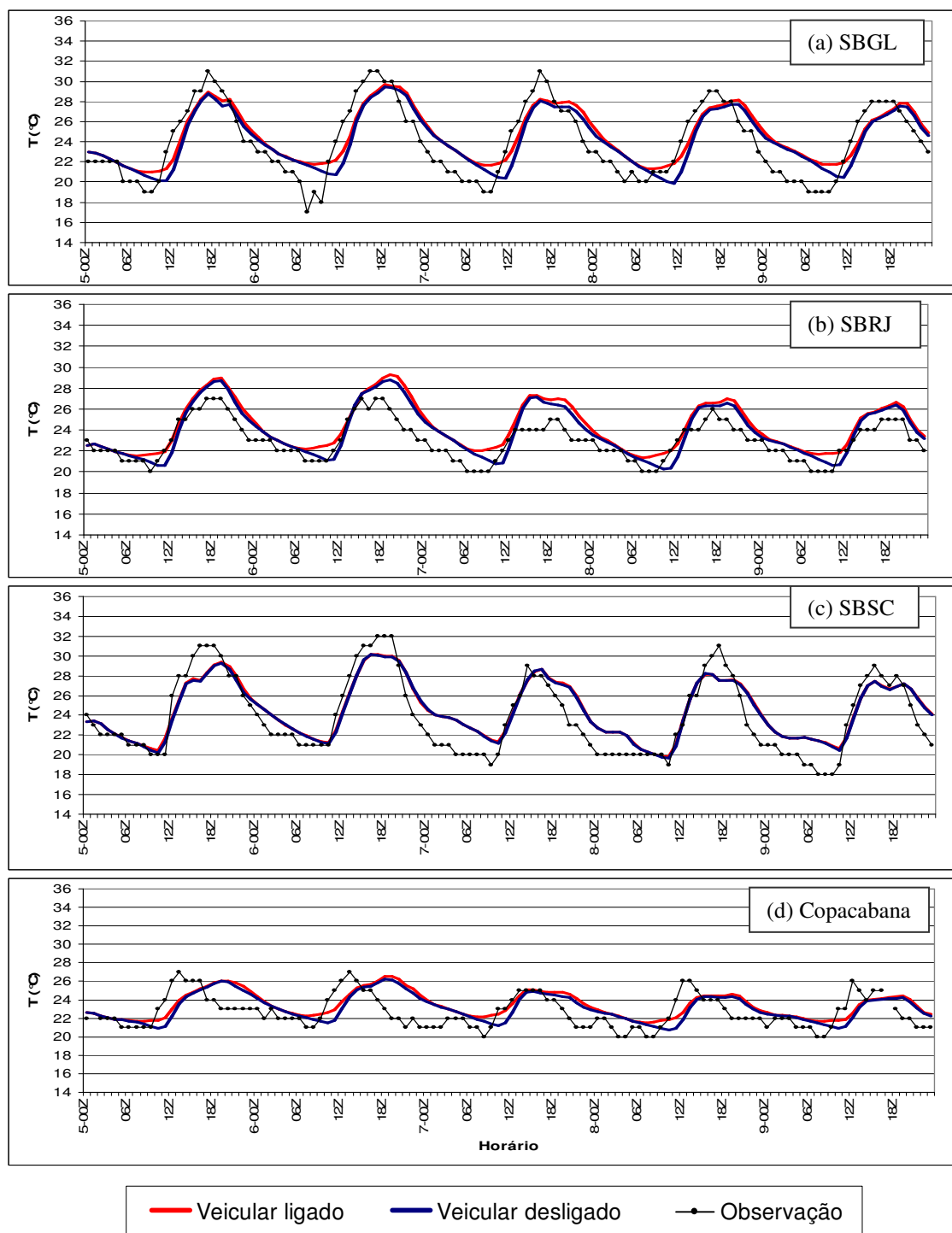


Figura C1 - Série temporal da temperatura do ar entre as simulações com fluxo veicular ligado e fluxo veicular desligado e as observações para as estações: (a) SBGL, (b) SBRJ, (c) SBSC, (d) Copacabana, (e) Niterói, (f) Jacarepaguá-INMET, (g) Jacarepaguá-FEEMA, (h) Marambaia e (i) Nova Iguaçu.

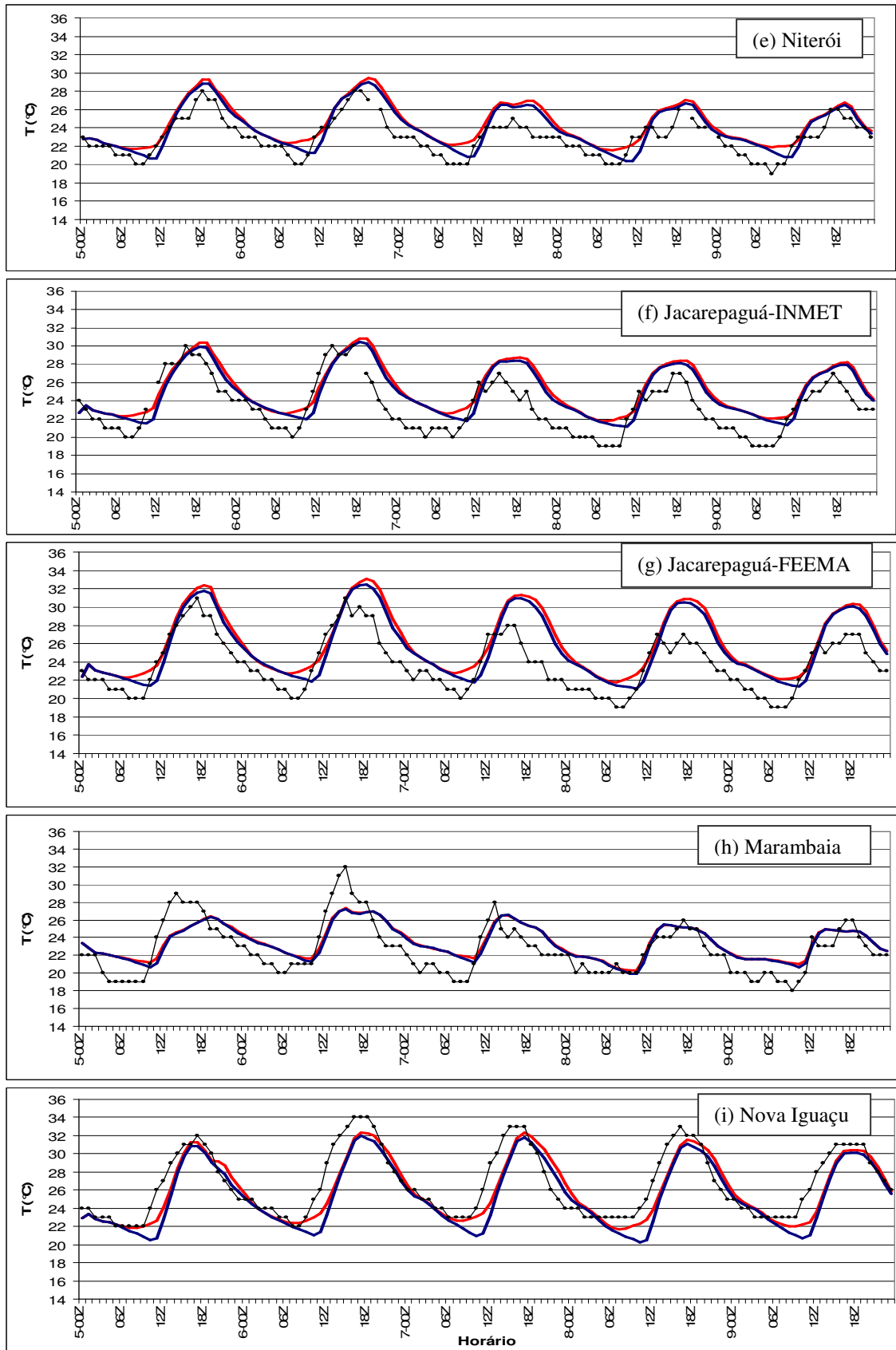


Figura C1 – Conclusão.

APÊNDICE D

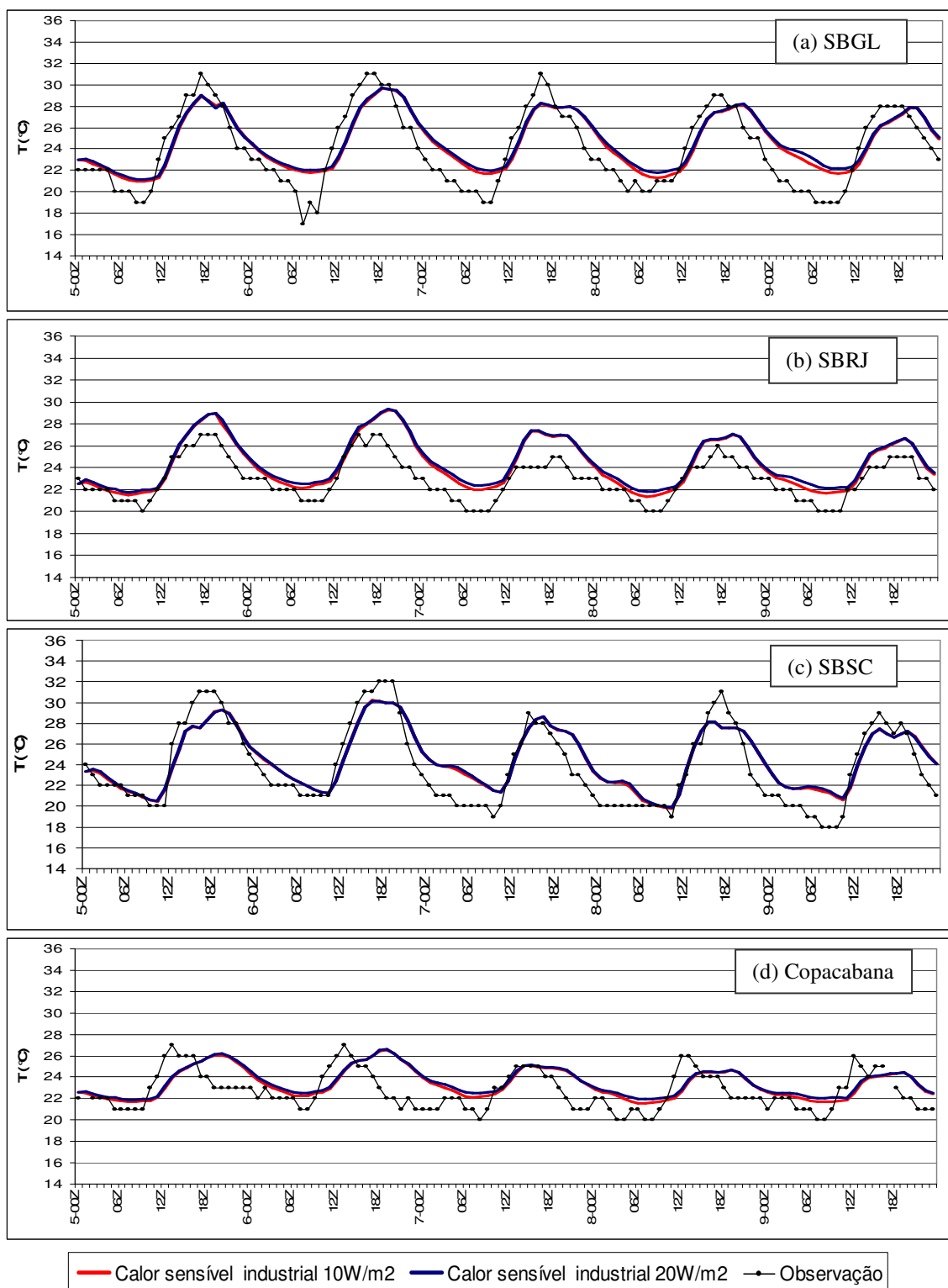


Figura D1 - Série temporal da temperatura do ar entre as simulações de calor sensível industrial 10 W/m^2 e calor sensível industrial 20 W/m^2 e as observações para as estações: (a) SBGL, (b) SBRJ, (c) SBSC, (d) Copacabana, (e) Niterói, (f) Jacarepaguá-INMET, (g) Jacarepaguá-FEEMA, (h) Marambaia e (i) Nova Iguaçu.

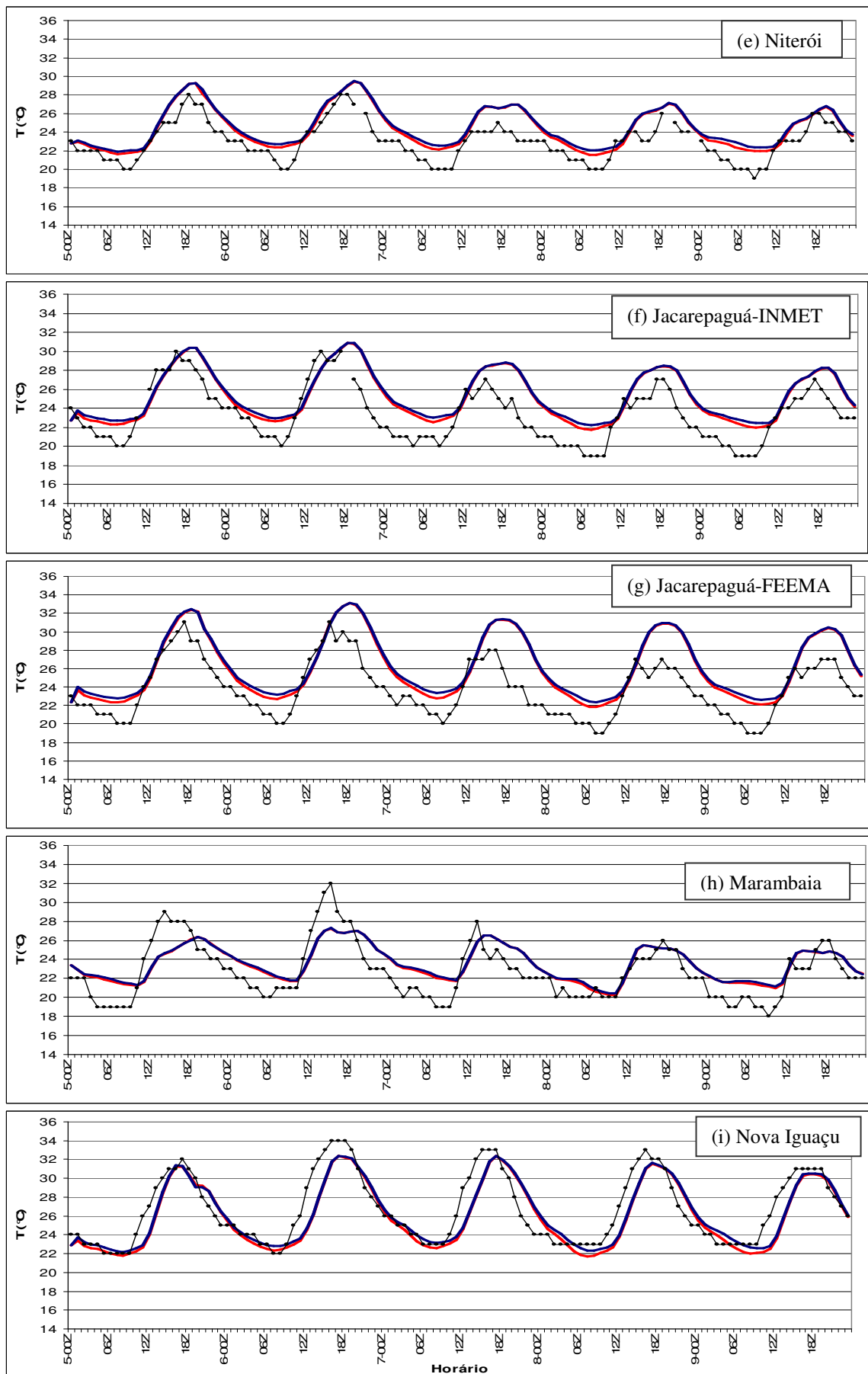


Figura D1 – Conclusão.

APÊNDICE E

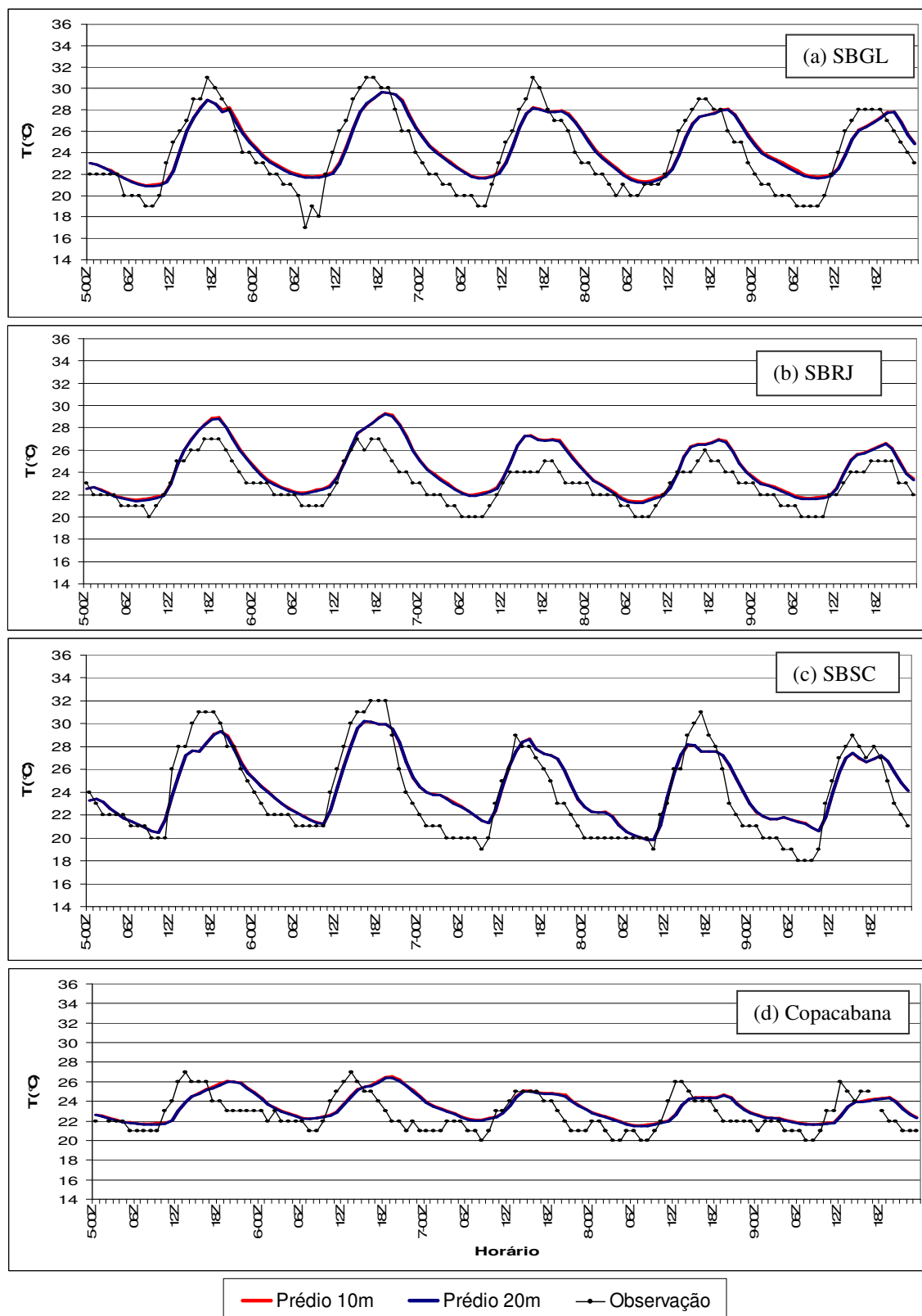


Figura E1 - Série temporal da temperatura do ar entre as simulações com altura de prédios de 10 metros e de 20 metros e as observações para as estações: (a) SBGL, (b) SBRJ, (c) SBSC, (d) Copacabana, (e) Niterói, (f) Jacarepaguá-INMET, (g) Jacarepaguá-FEEMA, (h) Marambaia e (i) Nova Iguaçu.

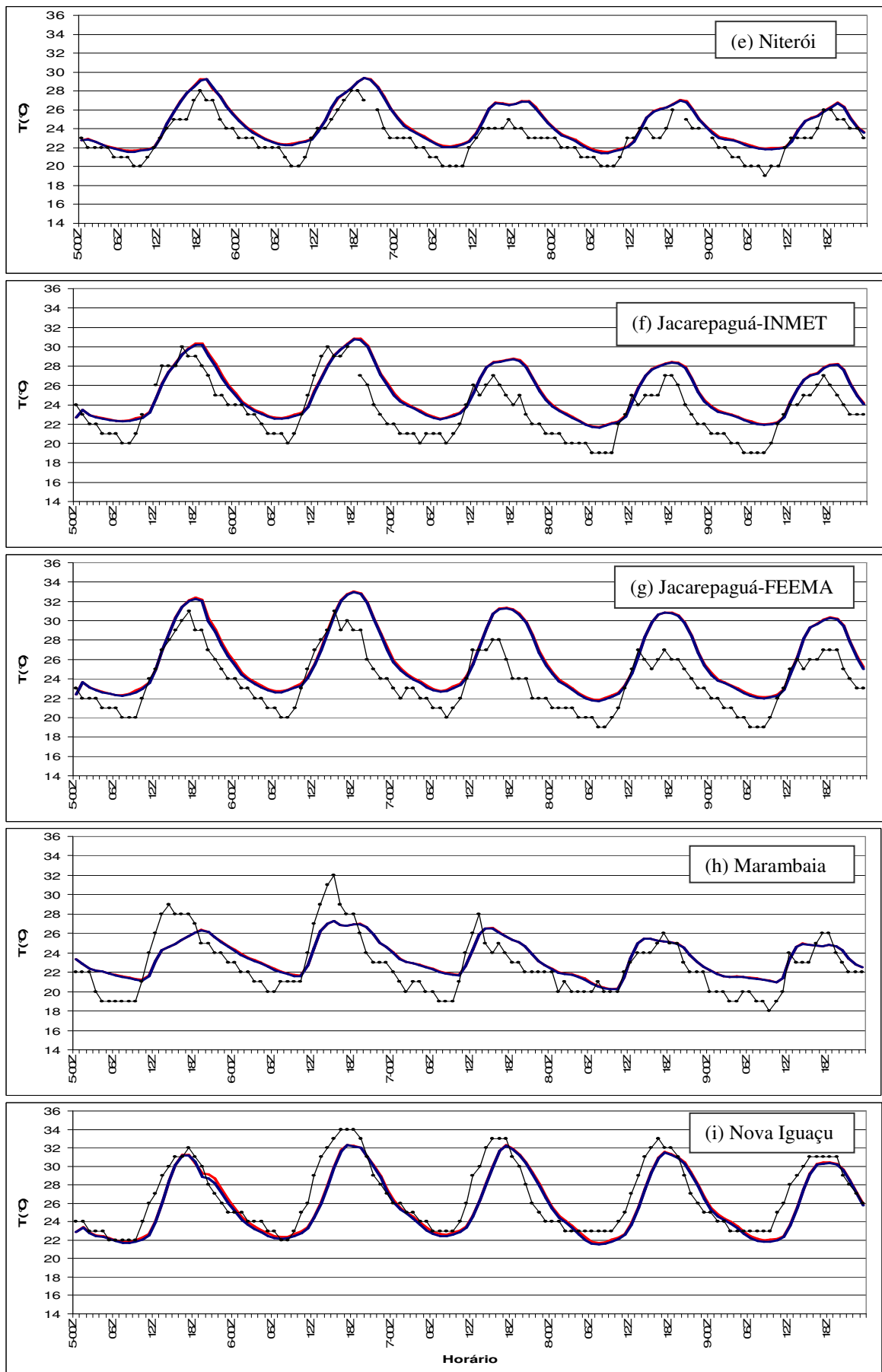


Figura E1 – Conclusão.

APÊNDICE F

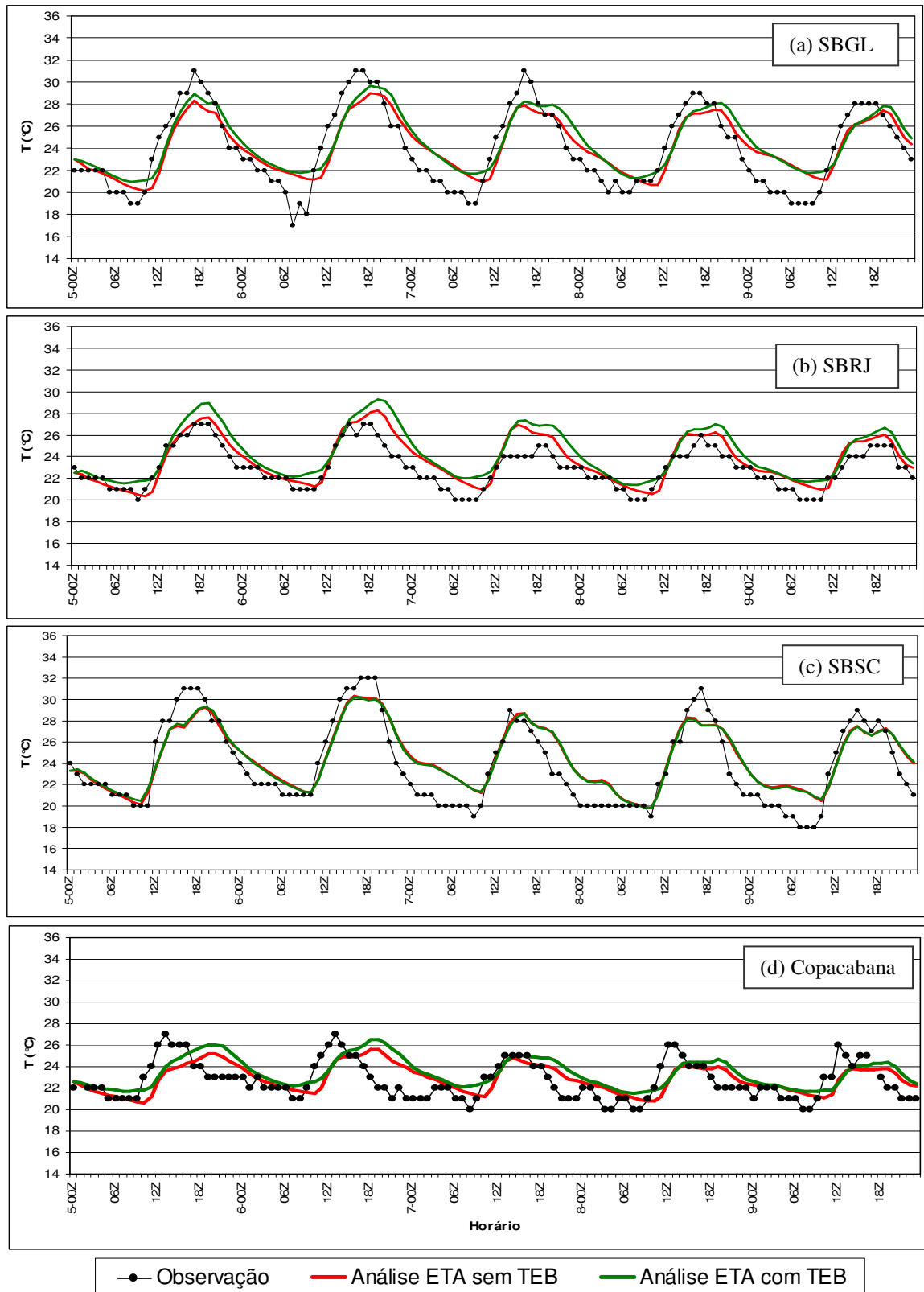


Figura F1 - Série temporal da temperatura do ar entre as simulações com e sem uso do TEB e as observações para as estações: (a) SBGL, (b) SBRJ, (c) SBSC, (d) Copacabana, (e) Niterói, (f) Jacarepaguá-INMET, (g) Jacarepaguá-FEEMA, (h) Marambaia e (i) Nova Iguaçu.

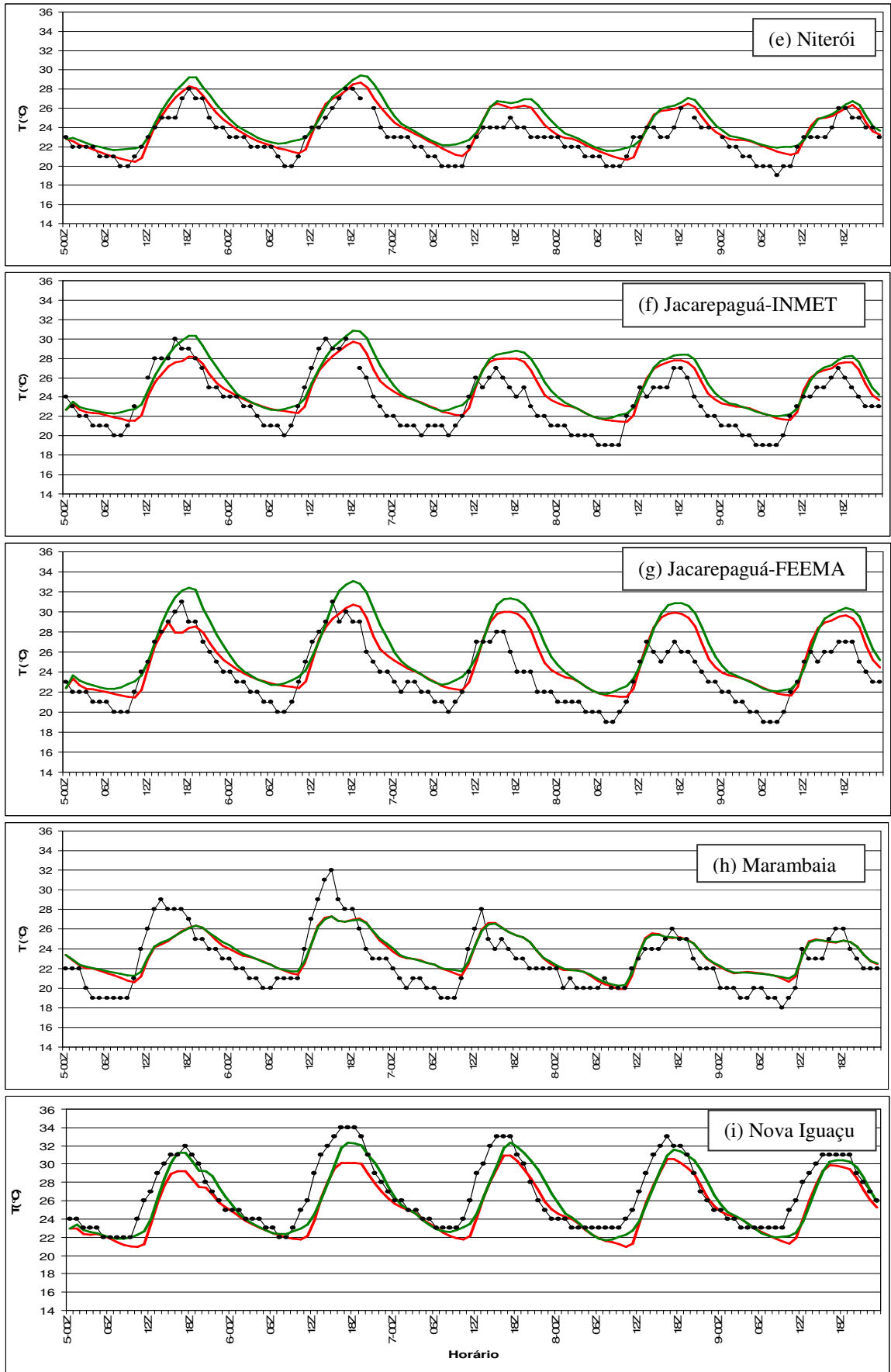


Figura F1 – Conclusão.

APÊNDICE G

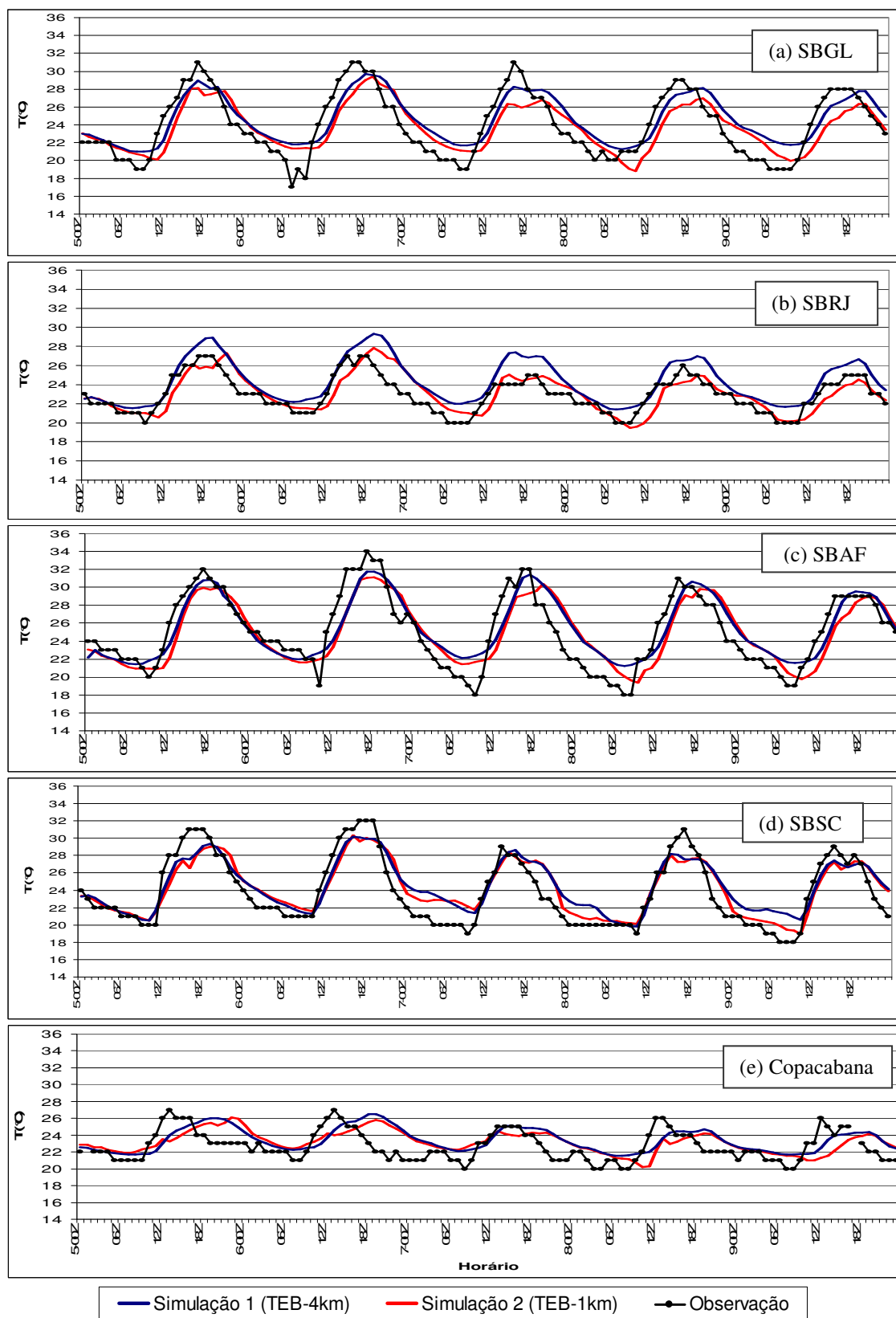


Figura G1 - Série temporal da temperatura do ar entre as simulações 1 (espaçamento de 4 km) e 2 (espaçamento de 1 km) e as observações para as estações: (a) SBGL, (b) SBRJ, (c) SBAF, (d) SBSC, (e) Copacabana, (f) Niterói, (g) Jacarepaguá-INMET, (h) Jacarepaguá-FEEMA, (i) Marambaia, (j) Ecologia Agrícola e (l) Nova Iguaçu.

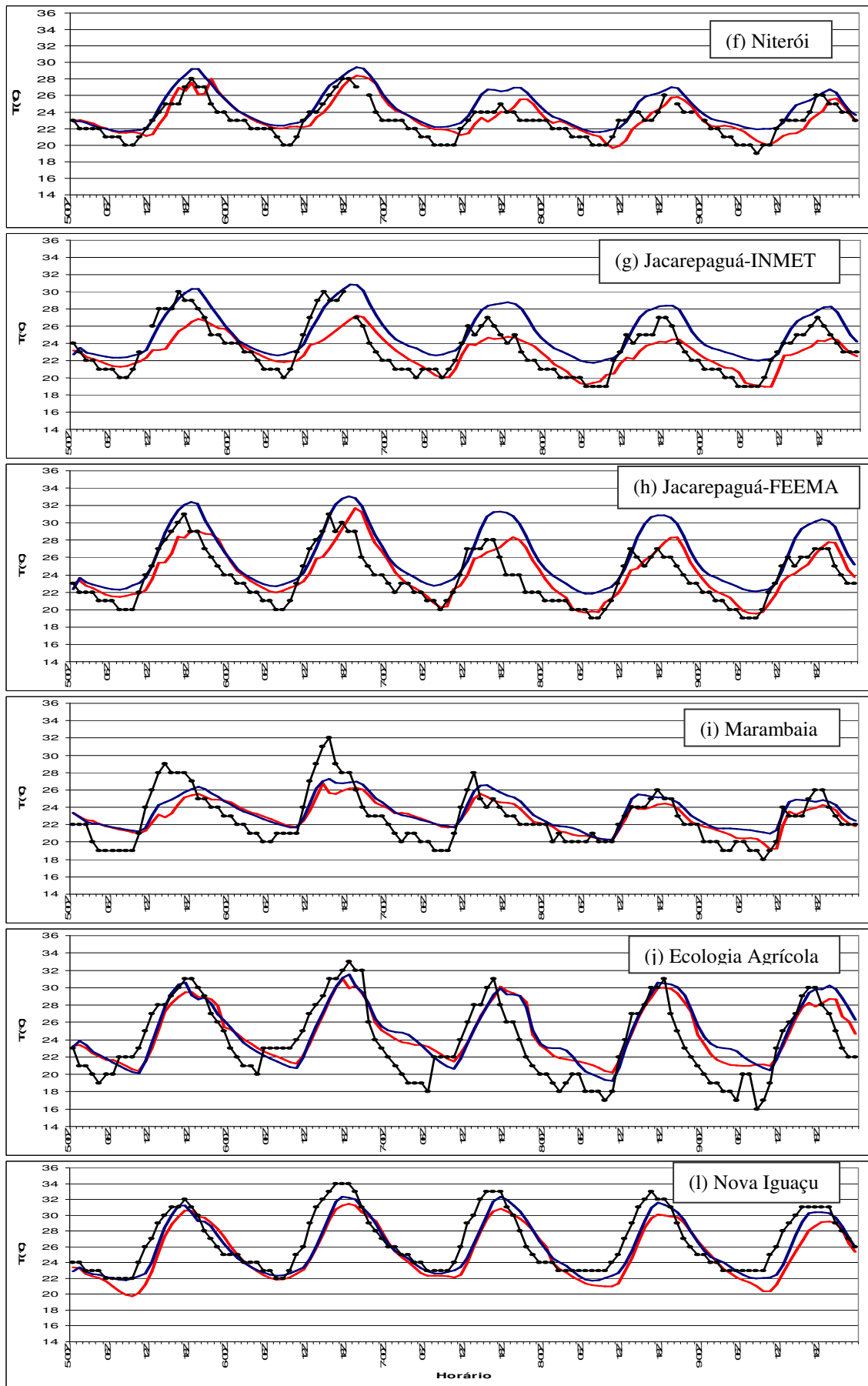


Figura G1 – Conclusão.

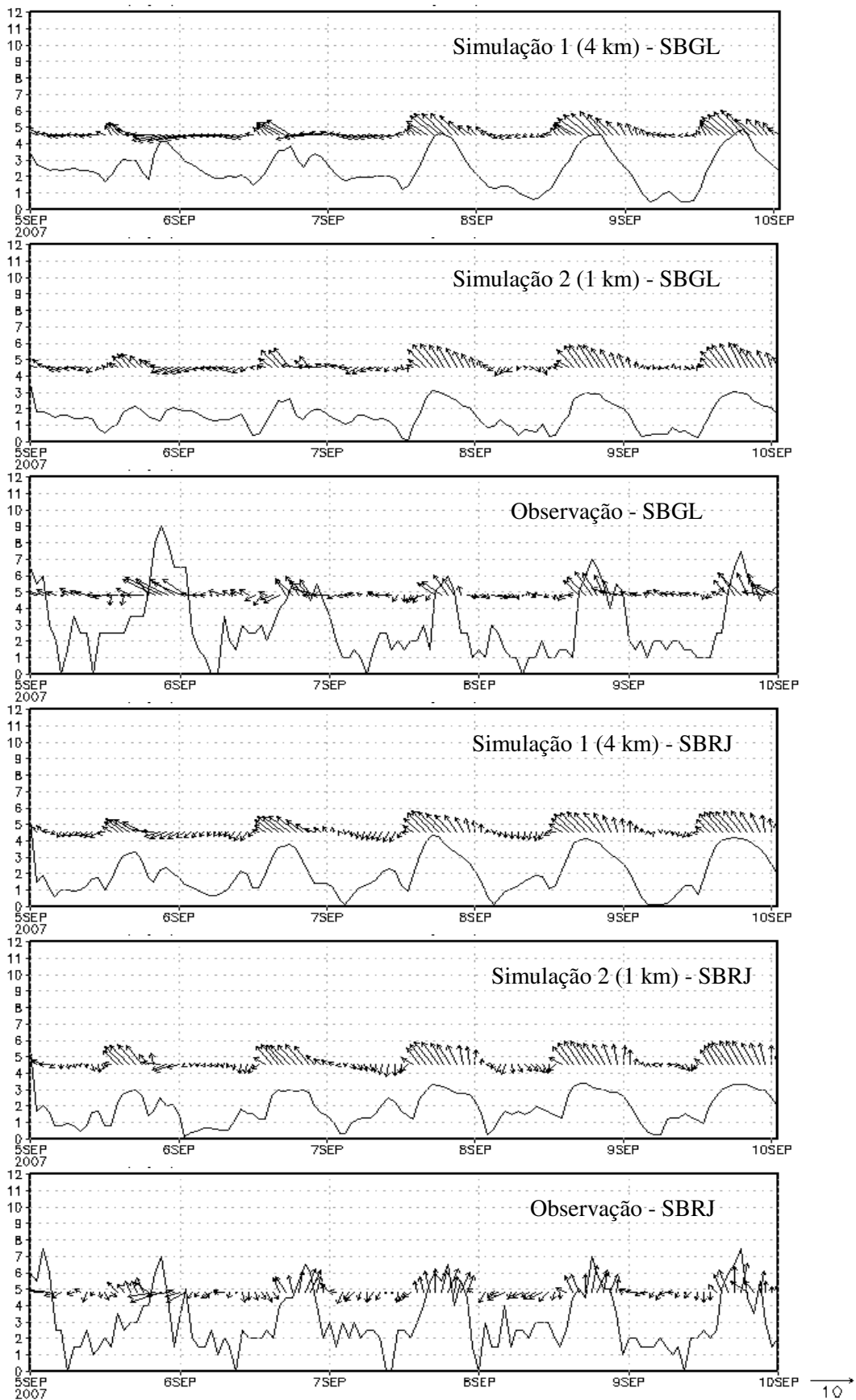


Figura G2 - Meteogramas da simulação 1 (4 km), simulação 2 (1 km) e das observações para as estações localizadas na subárea 1: (a) SBGL, (b) SBRJ, (c) Copacabana e (d) Niterói.

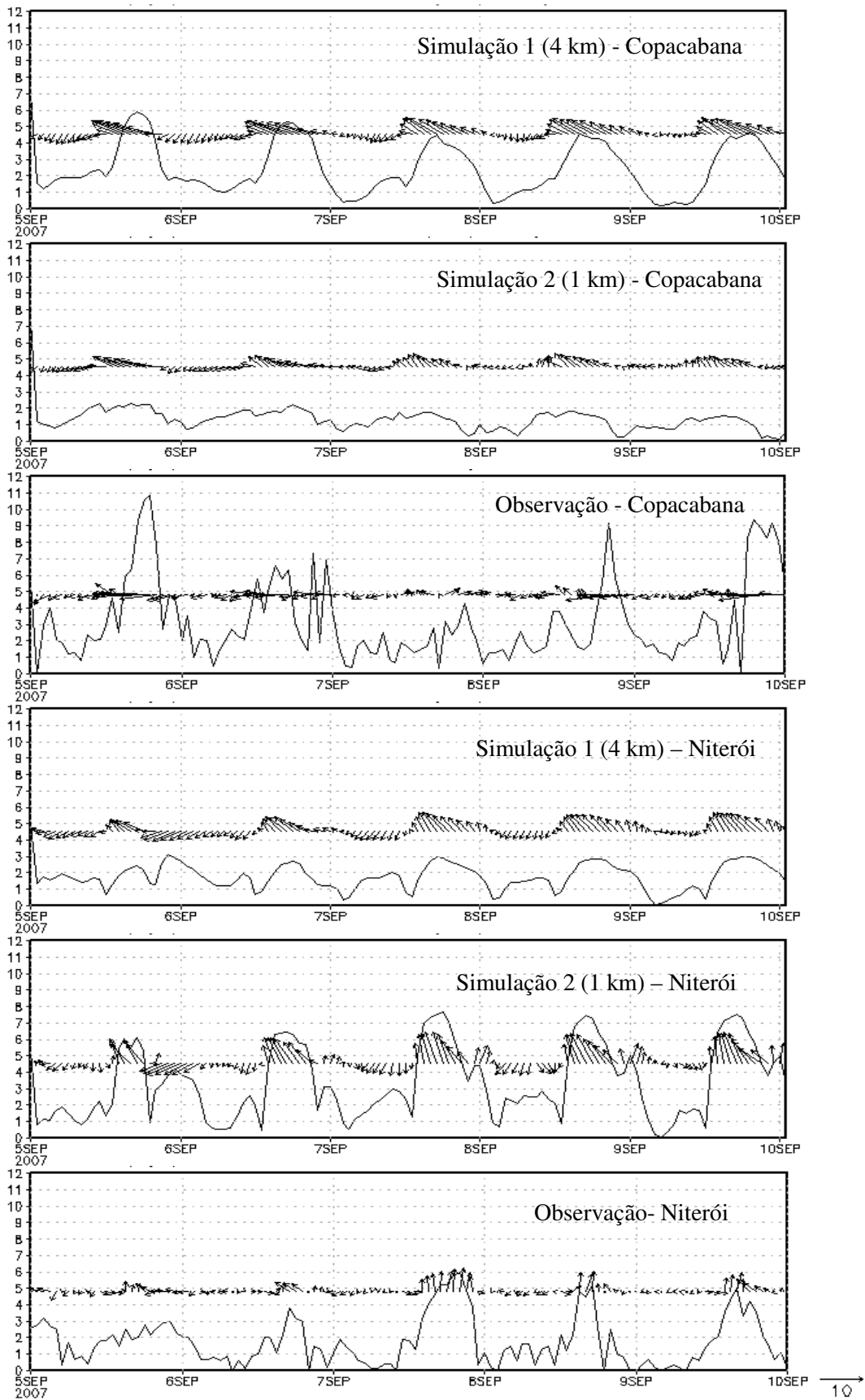


Figura G2 – Conclusão.

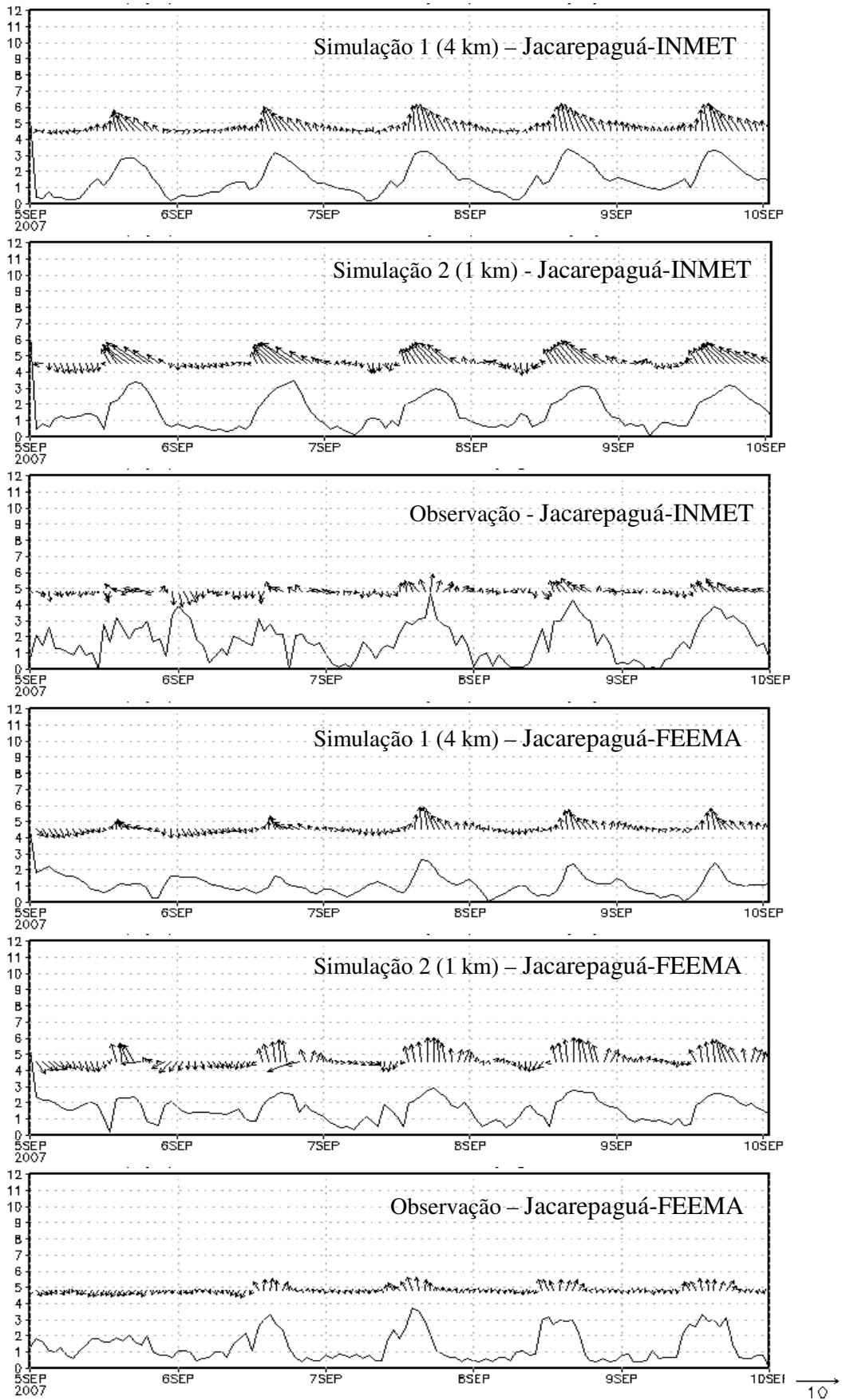


Figura G3 - Meteogramas das simulações 1 (4 km) e 2 (1 km) e das observações para as estações localizadas na subárea 2: (a) Jacarepaguá-INMET, (b) Jacarepaguá-FEEMA, (c) SBAF e (d) Nova Iguaçu .

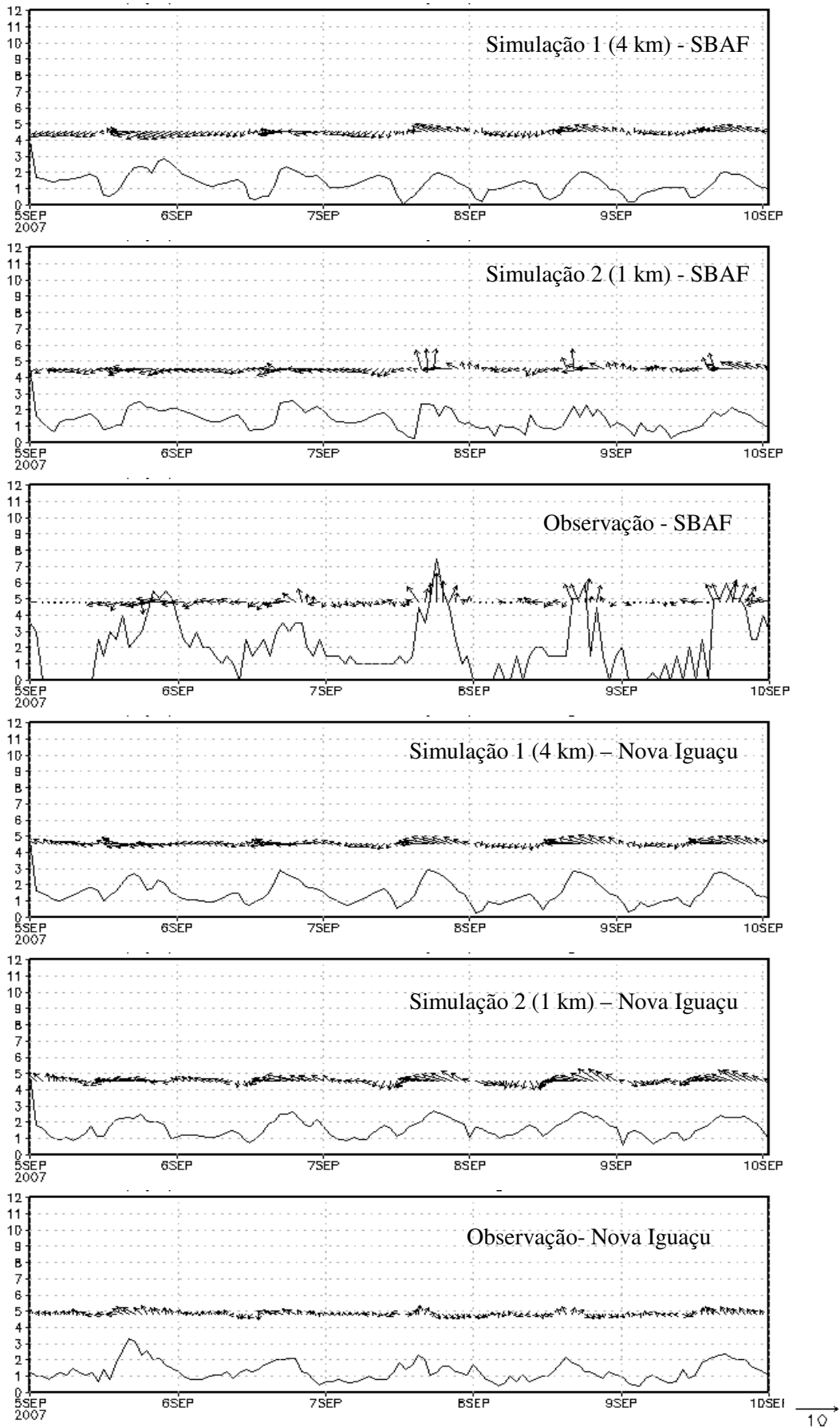


Figura G3 – Conclusão.

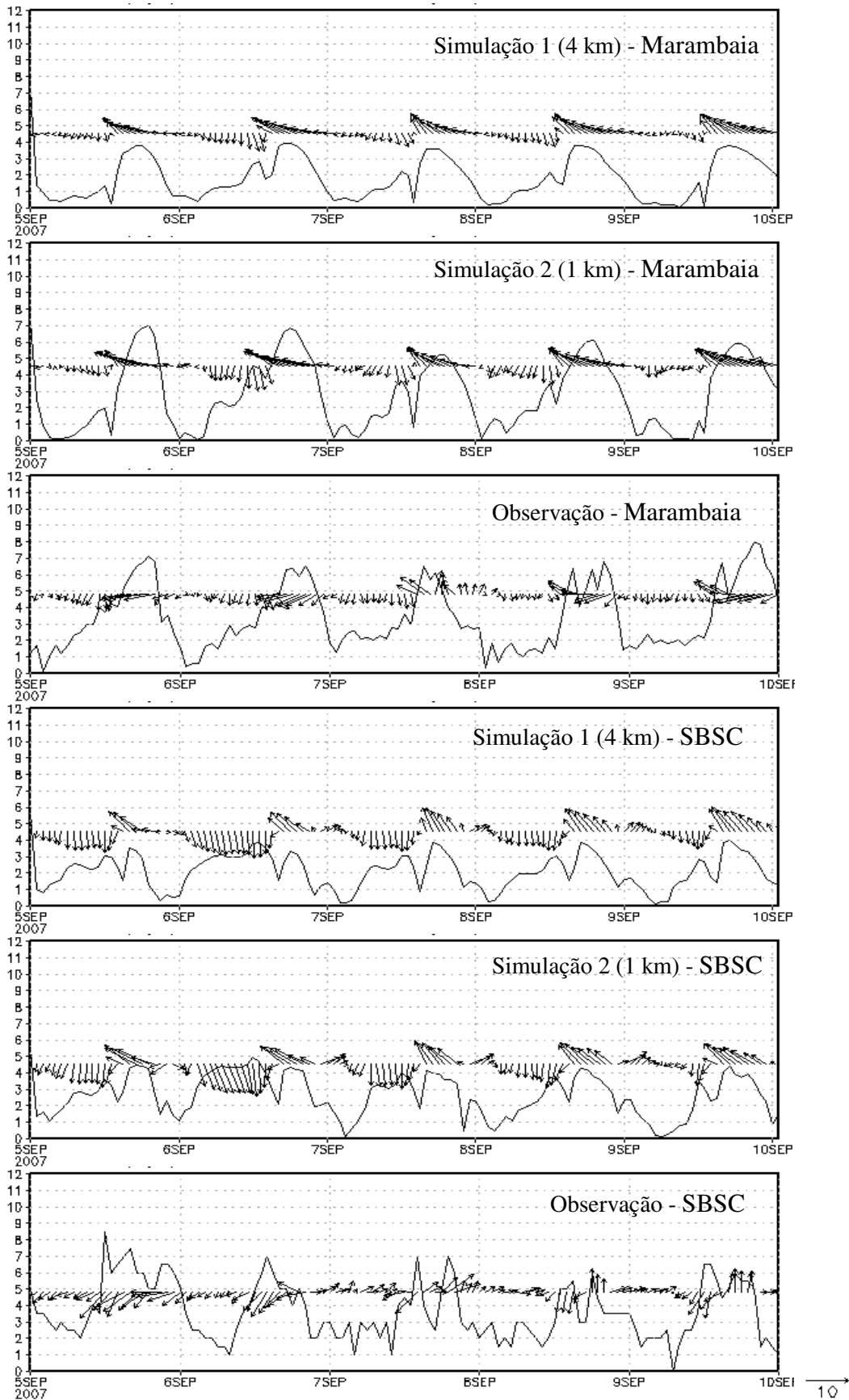


Figura G4 - Meteogramas das simulações 1 (4 km) e 2 (1 km) e das observações para as estações localizadas na subárea 3: (a) Marambaia, (b) SBSC e (c) Ecologia Agrícola.

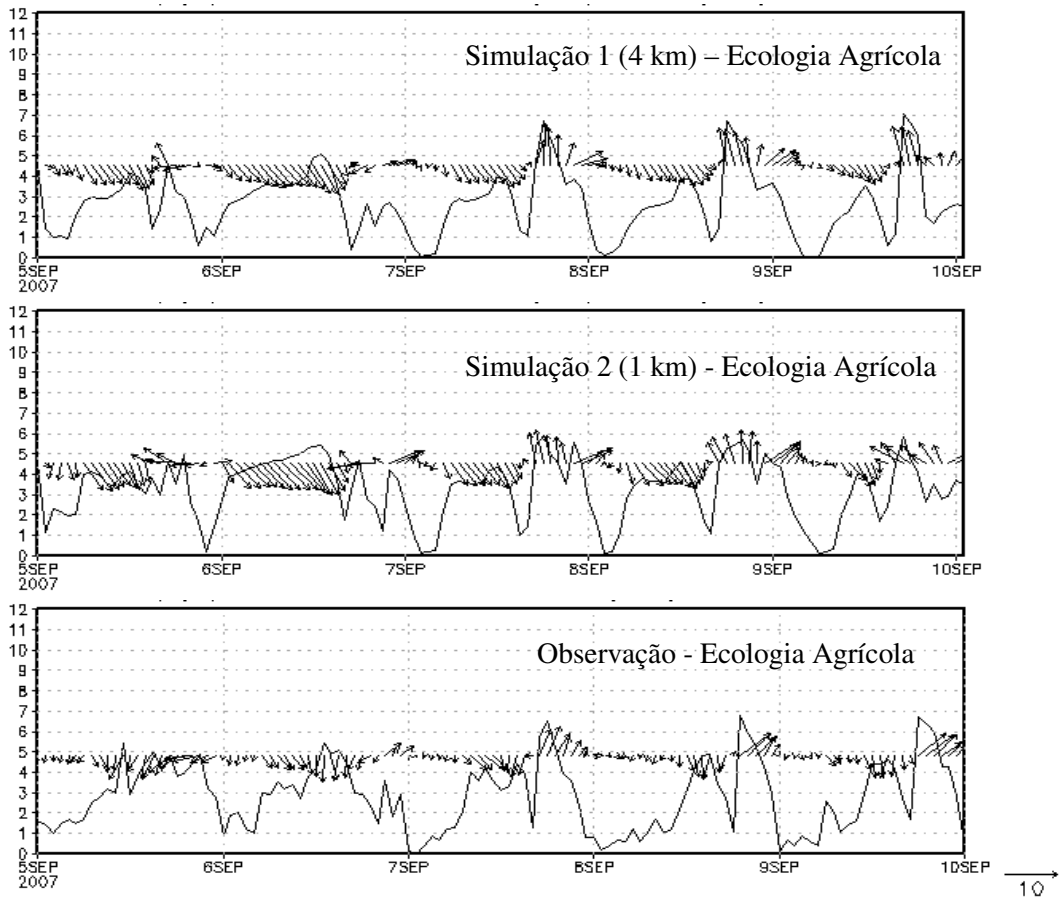


Figura G4 - Conclusão.

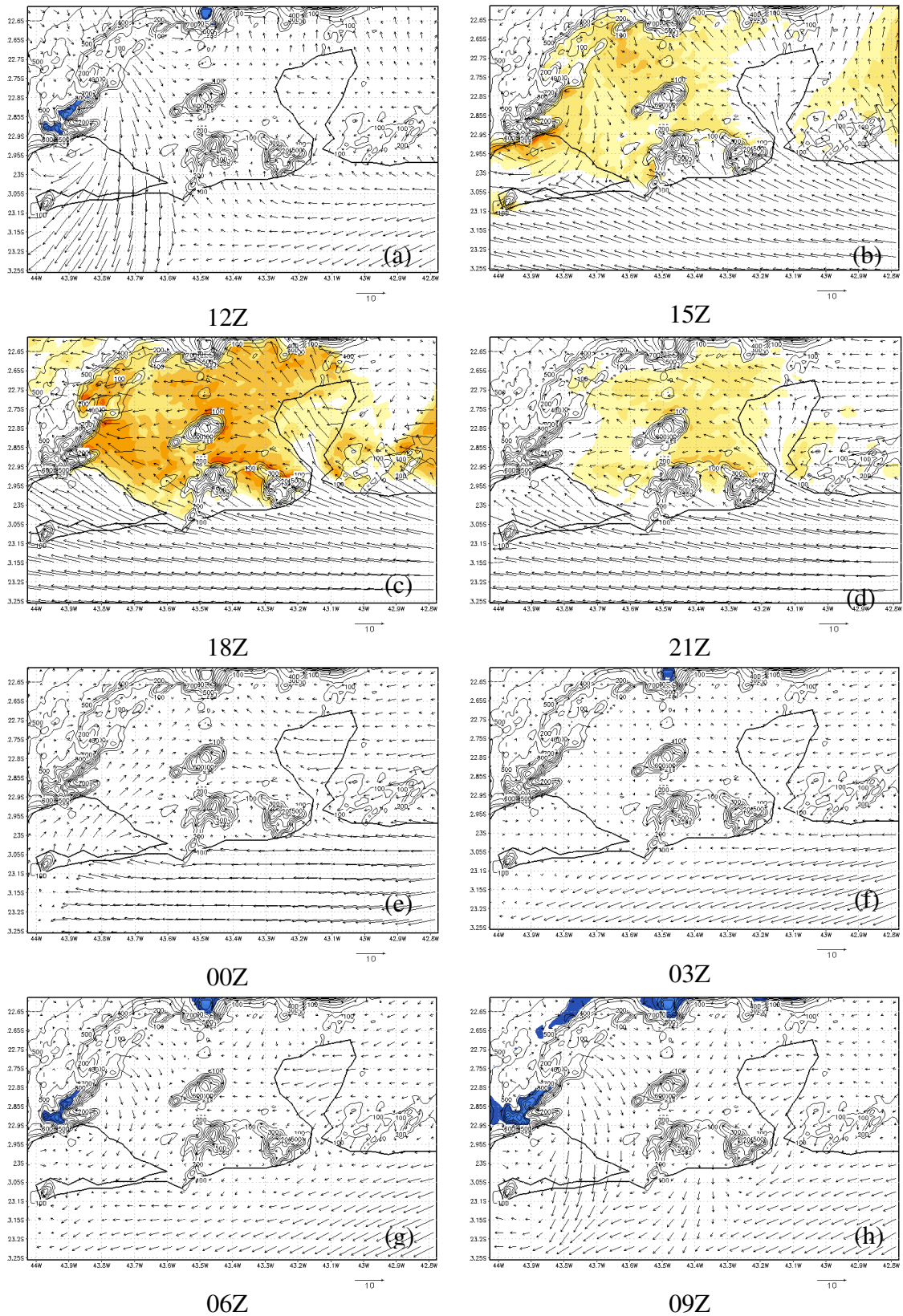


Figura G5 - Campo de temperatura do ar e direção do vento referente ao dia 06/09/2007 as (a)12Z, (b) 15Z, (c) 18Z, (d)21Z e ao dia 07/09/2007 as (e)00Z, (f) 03Z, (g) 06Z, (h)09Z para a simulação 2 (TEB-1km). A topografia é representada em contornos ao fundo.