



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2012/03.20.09.43-TDI

INFLUÊNCIA DA ILHA DE CALOR URBANA NAS CIDADES DE MANAUS E BELÉM SOBRE O MICROCLIMA LOCAL

Diego Oliveira de Souza

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pela Dra. Regina Célia dos Santos Alvalá, aprovada em 26 de março de 2012.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BHRQFH>>

INPE
São José dos Campos
2012

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):

Presidente:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Luciana Manacero - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2012/03.20.09.43-TDI

INFLUÊNCIA DA ILHA DE CALOR URBANA NAS CIDADES DE MANAUS E BELÉM SOBRE O MICROCLIMA LOCAL

Diego Oliveira de Souza

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pela Dra. Regina Célia dos Santos Alvalá, aprovada em 26 de março de 2012.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BHRQFH>>

INPE
São José dos Campos
2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Souza, Diego Oliveira de.
So89i Influência da ilha de calor urbana nas cidades de Manaus e Belém sobre o microclima local / Diego Oliveira de Souza. – São José dos Campos : INPE, 2012.
xxx + 187 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/03.20.09.43-TDI)

Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.
Orientadora : Dra. Regina Célia dos Santos Alvalá.

1. ilha de calor urbana. 2. BRAMS. 3. urbanização. 4. climatologia. 5. modelagem. I.Título.

CDU 551.588.7 (811)

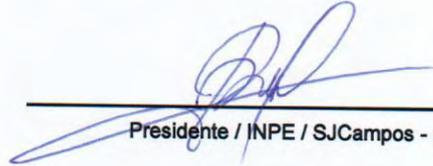


Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

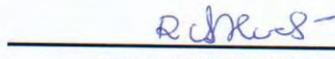
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Doutor(a) em
Meteorologia

Dr. Julio Pablo Reyes Fernandez



Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dra. Regina Célia dos Santos Alvalá



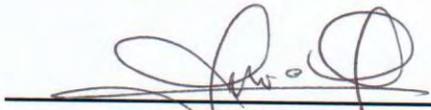
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Gilberto Fernando Fisch



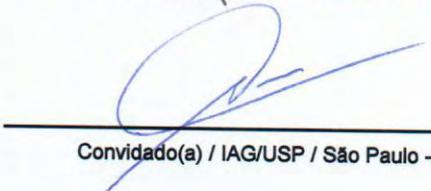
Membro da Banca / IAE/DCTA / SJCampos - SP

Dra. Julia Clarinda Paiva Cohen



Convidado(a) / UFPA / Belém - PA

Dr. Adilson Wagner Gandu



Convidado(a) / IAG/USP / São Paulo - SP

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

unanimidade

Aluno (a): Diego Oliveira de Souza

São José dos Campos, 26 de março de 2012

“Quanto maior for a crença em seus objetivos, mais depressa você os conquistará”.

Maxwell Maltz

À Marília.

A meus pais.

AGRADECIMENTOS

À Dra. Regina Célia dos Santos Alvalá pela orientação e apoio técnico-científico, fundamentais para a execução deste trabalho

À minha esposa Marília Guedes do Nascimento pelo companheirismo, amizade, paciência e amor em todos os momentos. Muito obrigado por estar sempre presente. Eu te amo!

A meus pais Otávio José Granada de Souza e Neiva Alzira de Oliveira de Souza e minha irmã Camila de Oliveira de Souza pelo grande amor e apoio durante todos estes anos. Vocês foram essenciais em todas minhas conquistas.

Ao Dr. João Baptista da Silva que despertou meu interesse para a pesquisa.

À Dra. Jaci Maria Bilhalva Saraiva e ao Dr. Dirceu Luis Herdies que sempre incentivaram o trabalho e acreditaram no meu potencial.

Todos os colegas de INPE.

Aos colegas Rita Márcia e Sebastião Ferraz Neto pela ajuda na criação dos mapas de vegetação e usos da terra.

Ao Dr. Saulo Freitas e à equipe do Grupo de Modelagem da Atmosfera e Interfaces (GMAI) pela ajuda e suporte com o modelo BRAMS.

Ao corpo docente da PGMET do INPE.

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo pela bolsa e suporte financeiro concedido durante o doutorado (processo nº 2007/07260-7).

Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e Instituto de Pesquisa da Amazônia (INPA) pelos conjuntos de dados concedidos.

À estrutura computacional do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) essenciais para o desenvolvimento da pesquisa.

RESUMO

A América Latina está passando por um intenso processo de desenvolvimento nos últimos anos, o que está diretamente associado ao crescimento das áreas urbanas. O relatório das Nações Unidas destaca que a população urbana crescerá 94% entre os anos de 2010 e 2020. Para a América Latina este crescimento é ainda maior, com as estimativas da ONU apontando que em 2030 aproximadamente 83% da população desta região também estará vivendo em áreas urbanas. Salienta-se que a população das cidades de Manaus e Belém apresentaram uma grande elevação, atingindo um número significativo de habitantes no último ano. Considerando que o crescimento urbano, relacionado com o processo de urbanização, é um processo de mudanças definitivas da vegetação e nos usos da terra, estas podem modificar diretamente o balanço de energia em superfície gerando modificações na atmosfera que podem variar da escala local até regional. Assim sendo, no contexto apresentando, e procurando entender as dimensões dos efeitos da urbanização, o principal objetivo deste trabalho é estudar a formação das ICUs das cidades de Manaus e Belém e suas influências sobre o microclima local. Os resultados obtidos mostraram que uma tendência de elevação na temperatura nos últimos 50 anos é observada para as duas cidades analisadas, mostrando uma possível relação com o crescimento da área urbana. Análises de extremos de temperatura diária também comprovaram que o microclima das cidades de Manaus e Belém está modificando, sendo influenciado não só pela variabilidade climática, como também por mudanças nos usos da terra relacionados com processos de urbanização. Para entender os impactos do crescimento urbano na modificação do microclima das cidades de Manaus e Belém, foram realizadas simulações numéricas para diferentes cenários de área urbana, contemplando um cenário atual, um cenário referente ao ano de 1973 e um cenário com a área urbana das duas cidades duplicada. Observou-se que com o crescimento da área urbana há uma elevação na temperatura em superfície, queda na umidade relativa e conteúdo de água na atmosfera, modificações no escoamento em superfície e nas características da camada limite planetária, sobre as duas cidades. Os resultados obtidos através da modelagem atmosférica suportam a hipótese levantada através dos estudos observacionais, a qual cita que um dos principais fatores responsáveis pelas tendências observadas está relacionada com o crescimento da área urbana. No contexto geral dos resultados foi possível observar que o crescimento da área urbana, aumento da população e conseqüentemente dos fluxos de calor antropogênicos, apresenta relação direta com modificações no microclima local das cidades de Manaus e Belém. Salienta-se assim que políticas públicas que tenham como objetivo um crescimento organizado de áreas urbanas e o conforto da população são necessárias para que os efeitos das mudanças climáticas não sejam potencializados por efeitos já existentes no microclima local relacionados com o processo de urbanização.

INFLUENCE OF URBAN HEAT ISLAND OF THE CITIES OF MANAUS AND BELÉM ON THE LOCAL MICROCLIMATE

ABSTRACT

Latin America is undergoing an intense process of development in recent years, which is directly associated with the growth of urban areas. The UN report notes that urban population will grow about 94% between 2010 and 2020. For Latin America this growth is even greater, with the UN estimates that in 2030 approximately 83% of the population will be living in urban areas. It should be noted that had a great elevation on the population of Manaus and Belém, reaching a significant number of inhabitants in the last year. Whereas the urban growth, related to the urbanization process is a process that change vegetation and kinds of land uses, they can directly modify the surface energy balance generating changes in the atmosphere that can range from local to regional scale. Thus, in the present context, and trying to understand the dimensions of the effects of urbanization, the main objective of this work is study the formation of UHI in the cities of Manaus and Belém, and their influence on the local microclimate. The results obtained showed a increase trend in temperature over the past 50 years for the two cities analyzed, showing a possible relationship with the growth of the urban area. Analysis of daily temperature extremes have also shown that the microclimate of the cities of Manaus and Belem is changing, being influenced not only by climatic variability, but also by changes in land-related processes, such as urbanization. To understand the impacts of urban growth in the microclimate of the cities, numerical simulations were performed for different scenarios of the size of urban area, comprising a current scenario, a scenario for 1973 and a scenario with two times of the original urban area size. It was observed that with the increase of urban area there is a rise in surface temperature, decrease in relative humidity, surface modifications in the flow and the characteristics of the boundary layer on the two cities. The results obtained by the atmospheric modeling support the hypothesis through observational studies, which cites that one of the main factors behind the observed trends are related to the growth of the urban area. In the general context of the results it was observed that the growth of urban areas, population growth and therefore of the anthropogenic heat flux, has a direct relationship with changes in local microclimate of the cities of Manaus and Belém. It should be noted as well that public policies that aim at an organized growth of urban areas and comfort of the population are necessary for the effects of climate change effects are not exacerbated by the existing local microclimate related to the urbanization process.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 3.1 – Diagrama esquemático da metodologia empregada para o desenvolvimento do trabalho proposto	18
Figura 3.2 – Esquema da transferência de calor e umidade entre as componentes do esquema LEAF-3. FONTE: Walko et al. (2000).....	35
Figura 3.3 – Vista esquemática de um esquema de superfície urbana de uma camada (Adaptado de Masson, 2006)	38
Figura 3.4 – (a) Discretização das temperaturas das superfícies dos telhados, ruas e paredes, (b) perfil do vento dentro e fora do canyon e (c) esquema da radiação solar recebida no canyon. (Adaptado de Masson, 2000).....	39
Figura 3.5 – Domínio das simulações descritas na metodologia. Retângulo em vermelho representa a grade 1, em azul a grade 2 e laranja a grade 3	41
Figura 4.1 – Mapeamento do crescimento da área urbana da cidade de Manaus, AM, entre os anos de 1973 e 2008.	48
Figura 4.2 – Mapeamento do crescimento da área urbana da cidade de Belém, PA, entre os anos de 1973 e 2008.	51
Figura 4.3 – Anomalias e tendências observadas para a variável temperatura média em (a) Manaus e (b) Belém entre os anos de 1961 e 2010.	57
Figura 4.4 – Valores baseados no teste seqüencial de Mann-Kendall para a variável temperatura média em (a) Manaus e (b) Belém entre os anos de 1961 e 2010.	58
Figura 4.5 – Anomalias e tendências de temperatura média observadas para cada década em (a) Manaus e (b) Belém entre os anos de 1961 e 2010.	59
Figura 4.6 – Anomalias e tendências observadas em Manaus para a variável temperatura (a) máxima e (b) mínima entre os anos de 1961 e 2008.....	62
Figura 4.7 – Valores baseados no teste seqüencial de Mann-Kendall para a variável temperatura (a) máxima e (b) mínima em Manaus entre os anos de 1961 e 2008.	63

Figura 4.8 – Anomalias e tendências de temperaturas médias observadas para cada década para as variáveis (a) Temperatura máxima e (b) mínima em Manaus entre os anos de 1961 e 2010.	64
Figura 4.9 – Anomalias e tendências observadas em Belém para a variável temperatura (a) máxima e (b) mínima entre os anos de 1961 e 2010.	65
Figura 4.10 – Valores baseados no teste seqüencial de Mann-Kendall para a variável temperatura (a) máxima e (b) mínima em Belém entre os anos de 1961 e 2008.	66
Figura 4.11 – Anomalias e tendências de temperaturas média observadas para cada década para as variáveis (a) Temperatura máxima e (b) mínima em Belém entre os anos de 1961 e 2010.	67
Figura 4.12 – Anomalias e tendências observadas para a variável precipitação acumulada média anual em (a) Manaus e (b) Belém entre os anos de 1961 e 2008. ...	69
Figura 4.13 – Valores baseados no teste seqüencial de Mann-Kendall para a variável precipitação acumulada média anual em (a) Manaus e (b) Belém entre os anos de 1961 e 2008.	70
Figura 4.14 – Anomalias e tendências de precipitação observada para cada década para as cidades de (a) Manaus e (b) Belém entre os anos de 1961 e 2010.	72
Figura 4.15 – Anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) (contorno) e sua significância estatística (sombreado) para o período de (a) 1961-1970, (b) 1971-1980 (c) 1981-1990, (d) 1991-2000 e (e) 2001-2010	73
Figura 4.16 – Comparação entre os dados NNR e as observações de superfície em Manaus para a variável temperatura (a) média, (b) máxima e (c) mínima.	81
Figura 4.17 – Comparação entre os dados NNR e as observações de superfície em Belém para a variável temperatura (a) média, (b) máxima e (c) mínima.	83
Figura 4.18 – Ciclo diurno da temperatura média observada em área urbana e floresta entre os anos de 2000 e 2008.	87
Figura 4.19 – Ciclo diurno da intensidade da ICU da cidade de Manaus observada (a) abaixo e (b) acima do dossel entre os anos de 2000 e 2008.	90

Figura 4.20 – Variação diurna da taxa de aquecimento/resfriamento entre área urbana e valores obtidos abaixo do dossel em área de floresta entre os anos de 2000 e 2008.	91
Figura 4.21 – Variação diurna da taxa de aquecimento/resfriamento entre área urbana e valores obtidos acima do dossel em área de floresta entre os anos de 2000 e 2008.	92
Figura 4.22 – Ciclo diurno da temperatura observada e simulada em Manaus nos diferentes experimentos para as estações do (a) INMET, (b) aeroporto Eduardo Gomes, (c) INPA, (d) aeroporto de Ponta Pelada e (e) ZF2 em área de floresta.	106
Figura 4.23 – Ciclo diurno da temperatura observada e simulada em Belém nos diferentes experimentos para as estações do (a) INMET e (b) aeroporto internacional de Belém.	109
Figura 4.24 – Ciclo diurno da umidade relativa observada e simulada em Manaus nos diferentes experimentos para as estações do (a) INMET, (b) aeroporto Eduardo Gomes, (c) INPA, (d) aeroporto de Ponta Pelada e (e) ZF2 em área de floresta.	110
Figura 4.25 – Ciclo diurno da umidade relativa observada e simulada em Belém nos diferentes experimento para as estações do (a) INMET e (b) aeroporto internacional de Belém.	113
Figura 4.26 – Mapa de uso e cobertura da terra em Manaus para o ano de 2008 gerado pelo modelo BRAMS e utilizado durante as simulações do EXPCTRL.	115
Figura 4.27 – Mapa de uso e cobertura da terra em Manaus para o ano de 1973 gerado pelo modelo BRAMS e utilizado durante as simulações do EXPPAS.	116
Figura 4.28 – Mapa de uso e cobertura da terra em Manaus para o futuro gerado pelo modelo BRAMS e utilizado durante as simulações do EXPFUT.	117
Figura 4.29 – Mapa de uso e cobertura da terra em Belém para o ano de 2008 gerado para o modelo BRAMS e utilizado durante as simulações do EXPCTRL.	118
Figura 4.30 – Mapa de uso e cobertura da terra em Belém para o ano de 1973 gerado para o modelo BRAMS e utilizado durante as simulações do EXPPAS.	119

Figura 4.31 – Mapa de uso e cobertura da terra em Belém para o futuro gerado para o modelo BRAMS e utilizado durante as simulações do EXPFUT.....	120
Figura 4.32 – Campo médio para o período de 02/06/2008 a 30/06/2008, em Manaus, para as variáveis (a) temperatura (°C), (b) razão de mistura do vapor d’água (g/kg), (c) vento (m/s) e (d) advecção de temperatura (°Cm/s). Áreas com contorno preto representam os limites continente e corpos de água. Áreas com contorno azul e verde representam a área urbana de Manaus no EXPCTRL.	124
Figura 4.33 – Campo médio para o período de 02/06/2008 a 30/06/2008, em Belém, para as variáveis (a) temperatura (°C), (b) razão de mistura do vapor d’água (g/kg), (c) vento (m/s) e (d) advecção de temperatura (°Cm/s). Áreas com contorno preto representam os limites continente e corpos de água. Áreas com contorno azul e verde representam a área urbana de Belém no EXPCTRL.	125
Figura 4.34 – Variação diurna média para o período de análise do perfil vertical médio de temperatura potencial, razão de mistura do vapor d’água e componentes (a) zonal e (b) meridional do vento para o EXPCTRL em Manaus.	128
Figura 4.35 – Variação diurna média para o período de análise do perfil vertical médio de temperatura potencial, razão de mistura do vapor d’água e componentes (a) zonal e (b) meridional do vento para o EXPCTRL em Belém.	129
Figura 4.36 – Hodógrafa do vento simulado em Manaus para o EXPCTRL.....	130
Figura 4.37 – Hodógrafa do vento simulado em Belém para o EXPCTRL.	131
Figura 4.38 – Ciclo diurno médio para o período de análise da razão de mistura do vapor d’água (g/kg) simulado no EXPCTRL em Manaus.	132
Figura 4.39 – Ciclo diurno médio para o período de análise da razão de mistura do vapor d’água (g/kg) simulado no EXPCTRL em Belém.	132
Figura 4.40 – Perfil vertical da (a) temperatura potencial (K) e (b) razão de mistura do vapor d’água, simulados pelo EXPCTRL em Manaus.	133
Figura 4.41 – Perfil vertical de (a) temperatura potencial (K) e (b) razão de mistura do vapor d’água simulados pelo EXPCTRL em Belém.	135

Figura 4.42 – Ciclo diurno da intensidade da ICU de Manaus simulada pelo EXPCTRL nas estações (a) INMET, (b) aeroporto Eduardo Gomes, (c) INPA e (d) aeroporto de Ponta Pelada.....	137
Figura 4.43 – Ciclo diurno da intensidade da ICU de Belém simulada pelo EXPCTRL nas estações (a) INMET e (b) aeroporto internacional de Belém.....	139
Figura 4.44 – Diferença entre o EXPCTRL e EXPPAS do campo médio para o período de análise para as variáveis (a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), (b) razão de mistura do vapor d'água (g/kg), (c) vento (m/s) e (d) advecção de temperatura ($^{\circ}\text{Cm/s}$). Áreas com contorno preto representam os limites continente e corpos de água. Áreas com contorno azul representam a área urbana de Manaus no cenário atual (EXPCTRL) e verde representam a área urbana de Manaus no cenário passado (EXPPAS).	145
Figura 4.45 – Diferença entre o EXPCTRL e EXPPAS do campo médio para o período de análise para as variáveis (a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), (b) razão de mistura do vapor d'água (g/kg), (c) vento (m/s) e (d) advecção de temperatura ($^{\circ}\text{Cm/s}$). Áreas com contorno preto representam os limites continente e corpos de água. Áreas com contorno azul representam a área urbana de Belém no cenário atual (EXPCTRL) e verde representam a área urbana de Belém no cenário passado (EXPPAS).	147
Figura 4.46 – Diferença média para o período de análise entre os EXPCTRL e EXPPAS para as variáveis (a) fluxo de calor sensível (w/m^2) e (b) fluxo de calor latente (w/m^2). Áreas com contorno preto representam os limites continente e corpos de água. Áreas com contorno azul representam a área urbana de Manaus no cenário atual (EXPCTRL) e verde representam a área urbana de Manaus no cenário passado (EXPPAS).	148
Figura 4.47 – Diferença média para o período de análise entre os EXPCTRL e EXPPAS para as variáveis (a) fluxo de calor sensível (w/m^2) e (b) fluxo de calor latente (w/m^2). Áreas com contorno preto representam os limites continente e corpos de água. Áreas com contorno azul representam a área urbana de Belém no cenário atual (EXPCTRL) e verde representam a área urbana de Belém no cenário passado (EXPPAS).	149

Figura 4.48 – Variação diurna média para o período de análise do perfil vertical médio de temperatura potencial, razão de mistura do vapor d'água e componentes (a) zonal e (b) meridional do vento para o EXPPAS em Manaus.	150
Figura 4.49 – Variação diurna média para o período de análise do perfil vertical médio de temperatura potencial, razão de mistura do vapor d'água e componentes (a) zonal e (b) meridional do vento para o EXPPAS em Belém.	152
Figura 4.50 – Perfil vertical de (a) temperatura potencial (K) e (b) razão de mistura do vapor d'água simulados pelo EXPPAS em Manaus.	153
Figura 4.51 – Perfil vertical de (a) temperatura potencial (K) e (b) razão de mistura do vapor d'água simulados pelo EXPPAS em Belém.	154
Figura 4.52 – Hodógrafa do vento simulado no EXPPAS em Manaus.	155
Figura 4.53 – Hodógrafa do vento simulado no EXPPAS em Belém.	156
Figura 4.54 – Diferença entre o EXPFUT e EXPCTRL do campo médio para o período de análise para as variáveis (a) temperatura (°C), (b) razão de mistura do vapor d'água (g/kg), (c) vento (m/s) e (d) advecção de temperatura (°Cm/s). Áreas com contorno preto representam os limites continente e corpos de água. Áreas com contorno azul representam a área urbana de Manaus no cenário futuro (EXPFUT) e verde representam a área urbana de Manaus no cenário atual (EXPCTRL).	157
Figura 4.55 – Diferença entre o EXPFUT e EXPCTRL do campo médio para o período de análise para as variáveis (a) temperatura (°C), (b) razão de mistura do vapor d'água (g/kg), (c) vento (m/s) e (d) advecção de temperatura (°Cm/s). Áreas com contorno preto representam os limites continente e corpos de água. Áreas com contorno azul representam a área urbana de Belém no cenário futuro (EXPFUT) e verde representam a área urbana de Belém no cenário atual (EXPCTRL).	158
Figura 4.56 – Variação diurna média para o período de análise do perfil vertical médio de temperatura potencial, razão de mistura do vapor d'água e componentes (a) zonal e (b) meridional do vento para o EXPFUT em Manaus.	160

Figura 4.57 – Variação diurna média para o período de análise do perfil vertical médio de temperatura potencial, razão de mistura do vapor d'água e componentes (a) zonal e (b) meridional do vento para o EXPFUT em Belém.	161
Figura 4.58 – Diferença média para o período de análise entre os EXPFUT e EXPCTRL para as variáveis (a) fluxo de calor sensível (w/m ²) e (b) fluxo de calor latente (w/m ²). Áreas com contorno preto representam os limites continente e corpos de água. Áreas com contorno azul representam a área urbana de Manaus no cenário futuro (EXPFUT) e verde representam a área urbana de Manaus no cenário atual (EXPCTRL).	162
Figura 4.59 – Diferença média para o período de análise entre os EXPFUT e EXPCTRL para as variáveis (a) fluxo de calor sensível (w/m ²) e (b) fluxo de calor latente (w/m ²). Áreas com contorno preto representam os limites continente e corpos de água. Áreas com contorno azul representam a área urbana de Belém no cenário futuro (EXPFUT) e verde representam a área urbana de Belém no cenário atual (EXPCTRL).	163
Figura 4.60 – Perfil vertical de (a) temperatura potencial (K) e (b) razão de mistura do vapor d'água simulados pelo EXPFUT em Manaus.....	164
Figura 4.61 – Perfil vertical de (a) temperatura potencial (K) e (b) razão de mistura do vapor d'água simulados pelo EXPFUT em Belém.	165
Figura 4.62 – Hodógrafa do vento simulado no EXPFUT em Manaus.	166
Figura 4.63 – Hodógrafa do vento simulado no EXPFUT em Belém.....	166
Figura 4.64 – Diferença média para o período de análise para as taxas de precipitação (mm/h) entre os (a) EXPCTRL e EXPPAS e (b) EXPFUT e EXPCTRL. Áreas com contorno preto representam os limites continente e corpos de água. Áreas com contorno azul representam a área urbana de Manaus (a) no cenário atual (EXPCTRL) e (b) no cenário futuro (EXPFUT). Áreas em verde representam a área urbana de Manaus no (a) cenário passado (EXPPAS) e (b) no cenário atual (EXPCTRL).....	167
Figura 4.65 – Diferença média para o período de análise para as taxas de precipitação (mm/h) entre os (a) EXPCTRL e EXPPAS e (b) EXPFUT e EXPCTRL. Áreas com contorno preto representam os limites continente e corpos de água. Áreas com contorno azul representam a área urbana de Belém (a) no cenário atual (EXPCTRL) e (b) no cenário	

futuro (EXPFUT). Áreas em verde representam a área urbana de Belém no (a) cenário passado (EXPPAS) e (b) no cenário atual (EXPCTRL)..... 168

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 3.1 - Definição dos índices de temperatura utilizados no estudo: Tmax e Tmin são as temperaturas máxima e mínima diária, respectivamente	22
Tabela 4.1 – Valores das áreas urbanas das cidades de Manaus e Belém observadas através das imagens LANDSAT	49
Tabela 4.2 – Valores climatológicos de temperaturas média, máxima e mínima e de precipitação observados em Manaus e em Belém entre os anos de 1961 e 2010.....	54
Tabela 4.3 – Valores dos índices encontrados para a cidade de Manaus entre 1961 e 2010.....	78
Tabela 4.4 – Valores dos índices encontrados para a cidade de Belém entre 1961 e 2010.....	78
Tabela 4.5 – Diferenças entre cidade e floresta para as variáveis temperaturas média, mínima e máxima, e umidade relativa entre os anos de 2000 e 2008 observados na cidade de Manaus	86
Tabela 4.6 – Valores dos parâmetros do esquema TEB utilizados nas diferentes simulações de realizadas para as cidades de Manaus e Belém.	98
Tabela 4.7 – Análise do desempenho do modelo BRAMS para temperatura em Manaus.	101
Tabela 4.8 - Análise do desempenho do modelo BRAMS para umidade relativa em Manaus.....	102
Tabela 4.9 – Análise do desempenho do modelo BRAMS para temperatura em Belém.	103
Tabela 4.10 – Análise do desempenho do modelo BRAMS para umidade relativa em Belém.	103
Tabela 4.11 – Classes de cobertura e usos da terra do modelo de interação SVAT LEAF-3	121

Tabela 4.12 – Diferenças entre os diferentes cenários de área urbana em Manaus para as variáveis Temperatura, umidade Relativa e Razão de mistura do Vapor d'água. ... 141

Tabela 4.13 – Diferenças entre os diferentes cenários de área urbana em Belém para as variáveis Temperatura, umidade Relativa e Razão de mistura do Vapor d'água 142

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AER – Aeroporto Ineternacional de Belém

ANP – Agência Nacional de Petróleo

AROAD – Albedo das ruas

AROOF – Albedo dos telhados

AWALL – Albedo das paredes

BARCA – Balanço Regional de Carbono na Amazônia

BATS - Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme

BES – Balanço de Energia em Superfície

BLD – Razão entre construções

BLD_HEIGHT – Altura média das construções

BRAMS – Brazilian Regional Modeling System

CATT - Coupled Aerosol and Tracer Transport

CC – Parametrização de Chen e Cotton

CLC – Camada Limite Convectiva

CLP – Camada Lomote Planetária

CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

CTRL – controle

DISME – Distrito de Meteorologia

ECT – Energia Cinética Turbulenta

EG – Aeroporto Eduardo Gomes

EMQ – Erro Médio Quadrático

ENOS – El Niño/Oscilação Sul

EROAD – Emissividade das ruas

EROOF – Emissividade dos telhados

EUA – Estados Unidos da América

EWALL – Emissividade das paredes

EXCTRL – Experimento Controle

EXFUT – Experimento Futuro

EXPAS – Experimento Passado

FMA – Fevereiro/Março/Abril

HINDU – Calor sensível de fontes industriais

HL – Hora Local

HTRAF – Calor sensível de fontes automotoras

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICU – Ilha de Calor Urbana

IGBP - International Geosphere-Biosphere Programme

IICU – Intensidade da Ilha de Calor Urbana

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPA – Instituto de Pesquisas da Amazônia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

JBN – Jato de Baixos Níveis

JFMA – Janeiro/fevereiro/Março/Abril

LBA – Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia

LEAF - Land Ecosystem-Atmosphere Feedback

LES – Large Eddy simulator

LIA – Linhas de instabilidade Atmosféricas

MM5 - Mesoscale Model 5

MP – Mahrer e Pielke

NASA - National Aeronautics and Space Administration

NCAR – National Center of Atmospheric Research

NCEP – National Center of Environment Prediction

NDVI - Normalized Difference Vegetation Index

NNR – NCEP/NCAR reanalysis

ODP – Oscilação Decadal do Pacífico

OGE – Olson Global Ecosystem

ONU – Organização das Nações Unidas

PLEINDU – Fluxo de Calor latente emitido por fontes industriais

PLETRAF – Fluxo de Calor latente emitido por fontes automotoras

PP – Aeroporto de Ponta Pelada

PRODES – Projeto de monitoramento de Desmatamento na Amazônia

PROVEG – Projeto de mapeamento de vegetação e usos da Terra na Amazônia

R – Razão de mistura do vapor d'água

RAMS – Regional Atmospheric Modeling System

REMQ – Raiz do Erro Médio Quadrático

RUSH – Hora de maior tráfego de veículos

S_FLUXOS – Experimento sem fluxos

SETHAB – Secretaria de Habitação

SON – Setembro/outubro/Novembro

SPM - Simplified Photochemical Model

SSIB - Simplified Simple Biosphere Scheme

SVAT – Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer

TEB – Town Energy Budget

TEMP – Temperatura

THETA – Temperatura Potencial

TMAX – Temperatura máxima

TMIN – Temperatura mínima

TSM – Temperatura da Superfície do mar

UNESCO - United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

UR – Umidade Relativa

USGS – United States Geological Survey

WRF – Weather Regional Forecast System

ZOTOWN – Rugosidade da superfície urbana

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
3. MATERIAS E MÉTODOS	17
3.1 Conjunto de dados observacionais	18
3.2 METODOLOGIA	19
3.2.1 Análise das tendências e ilha de calor urbana.....	19
3.2.2 Análise do crescimento urbano e elaboração do mapa de vegetação e usos da terra	23
3.2.3 Simulações numéricas	25
3.2.3.1 O modelo BRAMS	25
3.2.3.1.1 Parametrizações	27
3.2.3.1.1.1 Radiação	27
3.2.3.1.1.2 Convecção	29
3.2.3.1.1.3 Microfísica de nuvens	30
3.2.3.1.1.4 Camada limite planetária (clp).....	31
3.2.3.1.2 Modelo de interação Solo-Vegetação-Atmosfera (SVAT).....	32
3.2.3.1.3 O esquema TEB	36
3.2.3.2 Descrição das simulações	40
3.2.3.3 Validação das simulações	44
4. RESULTADOS	47
4.1 Avaliação do crescimento urbano das cidades de Manaus e Belém	47
4.2 Evolução das características do microclima das cidades de Manaus e Belém	51
4.3 Análise da ilha de calor urbana de Manaus	85
4.4 Considerações finais sobre os estudos observacionais	92

4.5 Estudo numérico da icu das cidades de Manaus e Belém	97
4.5.1 Análise de desempenho do modelo BRAMS	97
4.5.2 ICU e o crescimento urbano das cidades de Manaus e Belém	114
4.5.3 Considerações finais sobre as simulações numéricas para as cidades de Manaus e Belém	169
5 CONCLUSÃO	173
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	177

1. INTRODUÇÃO

A América Latina está passando por um intenso processo de desenvolvimento nos últimos anos, o que está diretamente associado ao crescimento das áreas urbanas. Segundo relatório da Organização das Nações Unidas - ONU (UN, 2008) aproximadamente metade da população mundial (3,3 bilhões de pessoas) vive em áreas urbanas, e estima-se que mais de 60% viverá em áreas urbanas por volta de 2030. O relatório também destacou que a população urbana crescerá 94% entre os anos de 2010 e 2020. Para a América Latina este crescimento é ainda maior, com as estimativas da ONU apontando que em 2030 aproximadamente 83% da população desta região também estará vivendo em áreas urbanas.

O crescimento da população urbana está diretamente relacionado com mudanças nos usos da terra e também com a emissão de gases do efeito estufa, fatores que apresentam influência direta na modificação do clima, que vão da escala local até a global.

Particularmente na região amazônica brasileira, um acelerado processo de ocupação levou nas últimas 3 décadas a um desmatamento de mais de 14% de sua área (NEPSTAD et al., 1999; PRODES, 2011). No contexto da ocupação do território da região amazônica, incentivos fiscais, que levaram à criação da Zona Franca de Manaus, e promessas de crescimento da região no início dos anos 60, provocaram uma intensa migração de trabalhadores para esta região. A população da Amazônia Brasileira cresceu de 4,5 milhões em 1970 para aproximadamente 23 milhões em 2010, a qual corresponde a 12,32% da população brasileira (CENSO IBGE - 2010).

No contexto da região amazônica, as cidades de Manaus e Belém apresentam papel importante na economia da região, assim como representam a maior população urbana da Amazônia, sendo Manaus a sétima cidade mais populosa do Brasil. Manaus está localizada no ponto média de 3° 8' de latitude Sul e 60° 1' de latitude Oeste, com elevação média de 21 m em relação ao nível médio do mar, praticamente no centro na maior floresta tropical do mundo, sem áreas urbanizadas em um raio maior que 50 km. A cidade de Belém, situada no ponto médio de 01°23' de latitude Sul e 48°29' de longitude Oeste, tem elevação de 13 metros em relação ao nível médio do mar. Localizada próximo à costa do Oceano Atlântico tropical, Belém está situada na região

da foz do rio Amazonas, com uma região metropolitana apresentando mais de 2 milhões de habitantes.

Segundo o Atlas do Desenvolvimento Urbano do Brasil e o censo do IBGE (2010), em 1991 a cidade de Belém possuía aproximadamente 1 milhão de habitantes, enquanto em 2010 a população alcançou 1,4 milhões de habitantes. Ressalta-se, neste contexto, a migração da população da área rural para áreas urbanas. Em 1991, a população rural de Belém era de aproximadamente 230 mil pessoas, passando para apenas 8 mil em 2000. Os dados da cidade de Manaus, maior cidade da região amazônica e sétima maior cidade do Brasil, mostram um crescimento ainda maior. Em 1991, a cidade possuía aproximadamente 1 milhão de habitantes. Já no ano de 2010, esta população cresceu mais de 80%, apresentando aproximadamente 1,9 milhões de habitantes.

As informações apresentadas acima ressaltam o intenso crescimento populacional da região amazônica e, principalmente, o crescimento da população em área urbana. As pressões para as mudanças do uso da terra na Amazônia continuam fortes, com planos para a construção de um número significativo de novas estradas ou asfaltamento de estradas existentes nos próximos 15 anos, conforme ressaltaram Nepstad et al. (2001) e Laurance et al. (2001). A falta de uma política de crescimento urbano impede o estabelecimento de uma estratégia de desenvolvimento sustentável para a Amazônia, que não seja predatória para o ecossistema.

Considerando que a região amazônica contém a maior extensão de florestas tropicais do planeta, com mais de 5 milhões de km², possuindo aproximadamente 1/3 das espécies animais e vegetais do globo, com abundantes recursos hídricos, florestais e minerais, é fundamental a exploração de forma correta de sua biodiversidade, tal que possa trazer benefícios por várias gerações. Grandes projetos de pesquisas, tais como o projeto de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera – LBA, especificamente o Milênio-LBA e vários projetos temáticos, em conjunto com o programa LBA-Ecologia da NASA e os projetos da Comunidade Européia, dentre muitos outros, deram passos importantes para o entendimento do funcionamento do ecossistema amazônico, mostrando que, embora localizadas, alterações significativas nas características de uso do solo, tais como queimadas e desmatamento, interferem de forma direta nos fluxos de água, energia, carbono e no ciclo de nutrientes, alterando diretamente a composição da atmosfera (AVISSAR et al., 2002, ANDREAE et al., 2002; CORREIA et al. 2007).

Além de desmatamentos e queimadas, a urbanização é também um fator extremo de mudança no uso da terra. Atividades humanas ligadas ao fenômeno de urbanização também provocam impactos locais, tais como mudanças na composição da atmosfera, no balanço de umidade e modificações no ecossistema. Um claro indicador dos efeitos no clima local de uma área urbana é a formação das chamadas Ilhas de Calor Urbanas (ICU).

O termo ICU é definido, por Arya (2001), como o aumento da temperatura da superfície e do ar sobre uma área urbana, em relação às áreas rurais ou suburbanas vizinhas. Este nome deve-se à similaridade no comportamento da elevação das isotermas com uma ilha oceânica isolada.

Muitos dos fatores relacionados com a formação da ICU incluem o uso de materiais de construção, principalmente concreto e asfalto, assim como metais e vidros. Estes materiais possuem capacidade térmica diferente da cobertura vegetal natural, o que irá resultar em grandes diferenças de temperatura principalmente durante a noite, quando a superfície irá liberar maior quantidade de calor para a atmosfera (COMARAZAMY et al, 2007).

Assim sendo, a formação das chamadas ICUs irá influenciar de forma direta o Balanço de Energia em Superfície (BES). As mudanças no BES podem ser geralmente observadas nas áreas urbanas, com diminuição na radiação solar refletida e aumento na emissão de radiação infravermelha, diminuição nos valores de fluxo de calor latente e aumento nos valores de fluxo de calor sensível, aumento no armazenamento de energia em superfície através de prédios e obstáculos, além da adição do termo de emissões de calor antropogênico na equação do BES. A modificação do BES em áreas urbanas é diretamente afetado pela estrutura urbana, mudanças nos usos da terra e população, enquanto que a intensidade da ICU está positivamente correlacionada com a população (OKE, 1973; OKE, 1982).

Mudanças no BES podem induzir à formação de circulações atmosféricas locais entre regiões mais quentes e mais frias de uma área urbana. A criação de circulações atmosféricas locais está diretamente relacionada com o armazenamento diferenciado de energia em superfície. Além disto, as circulações locais criadas em uma área urbana

podem interagir diretamente com outros tipos de circulações locais, como, por exemplo, brisas fluviais ou circulações de escala sinótica.

Muitos processos atmosféricos que influenciam no clima da região amazônica têm sido estudados a partir de modelos meteorológicos de mesoescala desenvolvidos e/ou adequados para a região. Estes modelos têm tido significativo sucesso na representação de alguns dos processos atmosféricos que influenciam o clima da região (SILVA DIAS et al., 2002, CORREIA et al., 2007). Observaram-se diferenças significativas na evolução da camada limite planetária devido às diferenças de cobertura vegetal da superfície, o que leva a impactos distintos nos processos de formação de nuvens nas estações seca e chuvosa. As diferenças podem ser vistas nos tipos de nuvens e locais de formação (SILVA DIAS et al, 2002; DURIEUX et al 2003, GANDU et al, 2004; FISCH et al 2004). O uso de modelos regionais mais complexos e sofisticados possibilita que novos aspectos relacionados à questão da interface biosfera atmosfera, nas condições atuais e futuras, possam ser avaliados, já que os efeitos do desmatamento da floresta e da urbanização da região amazônica na atividade convectiva são assuntos ainda controversos.

Uma grande dificuldade dos modelos de mesoescala está na formulação do BES das regiões urbanas, principalmente devido à grande diversidade de formas e tamanhos das construções presentes nestas regiões. De maneira geral, nenhum modelo de balanço de energia urbano considera todos os componentes envolvidos explicitamente. Uma aproximação bastante utilizada para o tratamento de áreas urbanas consiste em considerar uma camada ativa próxima à superfície ou volume, isto é, consideram-se os armazenamentos de calor, assim como fontes internas de calor como, por exemplo, a queima de combustíveis, o que permite fornecer resultados bastantes realísticos.

Os esforços e progressos feitos na última década para resolver o problema do BES nas regiões urbanas levaram ao desenvolvimento de alguns modelos numéricos que melhor representassem o efeito urbano. Em esforço recente da comunidade meteorológica do Brasil, o modelo de uma camada de dossel urbano, desenvolvido por Masson (2000), foi acoplado ao “Brazilian Regional Atmospheric Modeling System” (BRAMS). Desta forma inseriu-se nas simulações numéricas de mesoescala os efeitos do BES, geometria das construções e efeitos térmicos, radiativos e de umidade em áreas urbanas, o que permite estudar os efeitos das ICUs.

Tendo em vista que a intensa urbanização apresenta relação direta com mudanças no microclima urbano, e que ainda existe uma lacuna no estudo destas influências, principalmente em cidades localizadas em regiões equatoriais, os resultados obtidos a partir desta pesquisa proverão informações importantes para o desenvolvimento de projetos relacionados a planejamentos urbanos, além de melhorias na qualidade de vida da população, relacionadas com o microclima local.

Assim sendo, no contexto apresentado, e procurando entender as dimensões dos efeitos que a urbanização poderá causar nos processos atmosféricos, o principal objetivo deste trabalho é estudar a formação das ICUs das cidades de Manaus e Belém e suas influências sobre o microclima local. Neste escopo, procurou-se:

- (1) Avaliar o impacto do crescimento urbano sobre o microclima local das cidades de Manaus e Belém através de dados observacionais.
- (2) Simular a formação das ICUs das duas cidades, com o modelo de mesoescala BRAMS acoplado ao esquema de dossel urbano TEB.
- (3) Entender os impactos atuais e futuros da intensa urbanização na estrutura e formação das ICUs.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Considerando os objetivos propostos no presente trabalho, neste Capítulo apresenta-se uma breve revisão da literatura, a qual apresenta alguns dos principais trabalhos relacionados ao tema. Inicialmente, inclui-se uma revisão sobre o clima das cidades de Manaus e Belém, foco desta pesquisa, e, posteriormente, são apresentados resultados de pesquisas referentes à parte observacional e de modelagem de ICUs para diversas localidades do mundo.

Segundo Rocha e Rolim (1984), a cidade de Manaus apresenta dois períodos bem distintos em relação ao comportamento das variáveis meteorológicas, como temperatura e precipitação. Segundo os autores, a cidade de Manaus possui temperatura média anual de 26,7°C e precipitação acumulada anual de 2201,6 mm. Os meses mais quentes em Manaus compreendem o trimestre setembro-outubro-novembro (SON), com os maiores valores mensais médios (27,8°C) ocorrendo no mês de setembro, e os meses mais frios no quadrimestre janeiro-fevereiro-março-abril (JFMA), sendo o mês de março o que apresenta as menores temperaturas médias (25,9°C). Os maiores índices pluviométricos são observados entre os meses de janeiro a abril, com o mês de março apresentando os maiores valores (330,7 mm/mês), caracterizando assim um período chuvoso, e os meses mais secos compreendem os meses de junho até outubro, sendo agosto o mês mais seco (51,3 mm/mês), caracterizando o período seco. A direção predominante do vento em Manaus é de nordeste-leste, apresentando variações diurnas devido às circulações locais de brisa fluvial (OLIVEIRA E FITZJARRALD, 1993). Kayano (1979), analisando dados de radiossondagens de Manaus entre 1968 e 1976, observou que entre os meses de maio a agosto existe uma componente zonal máxima de leste e a componente meridional positiva, prevalecendo desta forma os ventos de sudeste. Já entre os meses de dezembro a março, a autora encontrou um máximo predominante de ventos de nordeste. Este comportamento observado por Kayano (1979) está relacionado com o deslocamento meridional do cavado equatorial.

Segundo Costa (2001), a cidade de Belém também apresenta dois períodos bem distintos para as variáveis temperatura e precipitação. Assim, apresenta um acumulado de precipitação anual de 2893 mm, sendo o ano dividido em duas estações: uma chuvosa, que compreende os meses de dezembro até maio, sendo o mês de março o que apresenta as maiores taxas pluviométricas (436 mm/mês) e uma outra estação menos

chuvosa, compreendendo os meses de junho a novembro, com o mês de novembro apresentando a característica de menor taxa pluviométrica (112 mm/mês). Costa (2001) destacou que a temperatura média anual em Belém é igual a 26,5° C, com o mês de março sendo o que apresenta menor média mensal (25,7° C) e o mês de outubro o mais quente (27,9° C). Os menores valores de temperatura são observados durante o período chuvoso, principalmente entre os meses de fevereiro-março-abril (FMA), e os maiores valores médios mensais observados durante a estação menos chuvosa. O predomínio do vento na cidade de Belém possui componente de norte-nordeste, principalmente devido a cidade estar localizada na região de confluência dos ventos alísios.

Molion (1993) ressaltou que os principais sistemas de tempo de escala sinótica que afetam a região amazônica são: (1) Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), caracterizada por uma banda de nebulosidade aproximadamente zonal na região equatorial, estendendo-se da África até a América do Sul, que faz parte da célula de Hadley, sendo formada principalmente pela convergência em baixos níveis dos ventos alísios de Nordeste e de Sudeste (HASTENRATH E HELLER, 1977); (2) Linhas de Instabilidade da Amazônia (LIA), que podem ser tanto de origem costeira como continental, sendo caracterizadas pela organização de nuvens de grande desenvolvimento vertical em forma de linha, geralmente formadas devido a convergência em baixos níveis da circulação de brisa marítima e os ventos alísios (COHEN et al, 1995; SILVA DIAS E FERREIRA, 1992); (3) Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), caracterizada por uma banda de nebulosidade e precipitação que se estende desde a Amazônia até o Oceano Atlântico Sul que fica estacionária por mais de 4 dias durante a estação chuvosa (HERDIES et al, 2002); (4) Jatos de Baixos Níveis (JBN), caracterizados por um forte escoamento em baixos níveis, geralmente entre 925 hPa e 700 hPa, paralelo e próximo a cadeia de montanhas dos Andes que possui grande influência no transporte de umidade entre trópicos e extratropicais (MARENGO, 2004; NASCIMENTO, 2008); (5) Alta da Bolívia, caracterizada por um sistema de alta pressão em altos níveis da atmosfera que ocorre durante o verão sobre a América do Sul, influenciando de forma direta a atividade convectiva na região amazônica (CARVALHO, 1989).

Além destes sistemas de escala sinótica, alguns fenômenos de escala menor, como circulações atmosféricas locais, também afetam as condições meteorológicas em escala local na região amazônica. Este tipo de circulação pode ser definida como circulação de

ar induzida termicamente pelos processos de superfície em regiões heterogêneas. Estas circulações podem ser as convencionais, como brisas marítima e terrestre, brisas de vale e montanha, brisas lacustres, ou as não convencionais, como as formadas por diferenças de umidade do solo ou por diferenças de vegetação (ATKINSON, 1981; PIELKE, 2002).

Circulações do tipo brisa marítima e brisa fluvial muitas vezes influenciam na formação e intensificação de sistemas de tempo nesta região do país. Neste contexto, citam-se os trabalhos de Kousky (1980), que verificou grande variabilidade na atividade convectiva relacionada com circulações locais do tipo brisa sobre a costa leste da região norte do Brasil; de Oliveira e Fitzjarrald (1993), que estudaram o regime de ventos na região da cidade de Manaus; de Silva Dias et al (2004) e Lu et al (2005) que estudaram a formação de brisa fluvial dos rios Amazonas e Tapajós e o de Souza (2007), que avaliou a formação de brisa fluvial na região da foz do rio Amazonas.

Além das circulações locais do tipo brisa, circulações criadas por contraste de vegetação e usos da terra também são observadas na região amazônica. Souza et al (2000) mostraram que é possível detectar, nos dados de vento e pressão, o sinal de circulações locais entre a floresta e as regiões desmatadas na parte central do Estado de Rondônia. O efeito deste tipo de circulação possui influência direta sobre a formação de nebulosidade. Cutrim et al (1995) e Negri et al (2004) mostraram que durante a estação seca há uma maior quantidade de nuvens cumulus nas regiões desmatadas da Amazônia do que nas regiões de floresta.

Avissar et al (2002) formularam um modelo conceitual sobre o efeito do desmatamento na precipitação, tendo ressaltado que para desmatamentos regionalizados haveria inicialmente um aumento da precipitação, enquanto que a medida que o desmatamento aumenta esse quadro se reverteria com um decréscimo da precipitação em 30% para o desmatamento total.

Sampaio et al. (2007) também mostraram a direta relação entre desmatamento ou troca de floresta por soja, e mudanças na precipitação sobre a região amazônica. De maneira geral os resultados mostraram um aumento na temperatura e uma diminuição na evapotranspiração e precipitação no leste da Amazônia. Os autores também evidenciaram a diminuição da precipitação com o aumento do desmatamento, sendo

esta redução mais evidente quando o desmatamento excede 40% da cobertura original de floresta.

Do ponto de vista de mudanças no uso e cobertura da terra, além do desmatamento, a intensa troca da vegetação natural por áreas urbanizadas pode levar à formação do fenômeno de Ilha de Calor Urbana (ICU), que da mesma forma que o desmatamento, pode influenciar de forma direta a criação de circulações locais, assim como modificar de forma direta o comportamento de diversas variáveis meteorológicas.

A relação entre as circulações locais e a formação de ICU foi analisada por Freitas et al. (2007), que mostraram que a formação da ICU sobre a região metropolitana de São Paulo tende a acelerar a penetração da brisa marítima sobre a cidade, intensificando a convergência dos ventos em superfície. Martilli et al. (2003) mostraram que a formação da ICU da cidade de Atenas, devido à presença da cidade, levou a um enfraquecimento da brisa terrestre no período noturno, principalmente devido à formação de um pequeno gradiente horizontal de pressão decorrente da presença da ICU, e da brisa marítima durante o dia, devido à rugosidade da superfície urbana e à formação de uma circulação térmica formada pela cidade.

O aumento da temperatura da superfície e do ar sobre uma área urbana, em relação às áreas rurais ou suburbanas vizinhas, é definido como Ilha de Calor Urbana (ICU) (Arya, 2001). Segundo o autor, este nome deve-se a similaridade no comportamento da elevação das isotermas com uma ilha oceânica isolada.

Deste modo, enquanto as cidades ocupam apenas 0,05% da superfície da Terra, mais da metade dos habitantes do planeta moram em regiões urbanas, sendo estes diretamente afetados pelas condições ambientais destas regiões, principalmente devido à formação das ICUs (MASSON, 2006).

Estudos sobre ICU apareceram na bibliografia na década de 50, com o trabalho de Manley (1958). Desde então, muitos têm sido os estudos relacionados com a formação e efeitos da ICU. A presença de áreas urbanas geram mudanças na atmosfera, incluindo efeitos devido à rugosidade (GRIMMOND et al, 1998), como a formação de turbulência (ROTH, 2000), efeitos na intensificação de tempestades (BORNSTEIN E LIN, 2000), alterações na hidrologia (GRIMMOND et al, 1986; GRIMMOND E OKE, 1986) e ainda impactos na dispersão de poluentes (FREITAS, 2003).

Roth (2000) cita como os dois principais fatores relacionados com ICU que causam modificações na atmosfera: (1) efeitos mecânicos produzidos pelo atrito causado pelas construções (agindo assim como sumidouro de momento) e aumento na transferência de energia de grandes para pequenos vórtices (transformação de energia cinética média em energia cinética turbulenta); (2) efeitos térmicos induzidos pela diferença de temperatura das construções, efeito sombra, desvio da radiação incidente nas ruas dos *canyons* urbanos e redução nos fluxos de calor latente, o que leva a alterações nos fluxos de calor sensível para a atmosfera.

O estudo das ICU baseia-se em um melhor detalhamento do Balanço de Energia na Superfície (BES) nas áreas urbanas. Oke (1988) apresenta a formulação abaixo para o BES em áreas urbanas:

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \quad (2.1)$$

em que Q^* é o saldo de radiação, Q_F é o fluxo de calor antropogênico, Q_H é o fluxo de calor sensível, Q_E é o fluxo de calor latente, ΔQ_S é o fluxo de calor armazenado e ΔQ_A é a o fluxo de calor advectivo. Em situações sem a presença de áreas urbanas o termo Q_F é retirado da equação. No caso de áreas urbanas, Q_F é calculado da seguinte forma, conforme mostrado por Coutts et al (2007):

$$Q_F = Q_V + Q_B + Q_M \quad (2.2)$$

sendo Q_V o calor liberado por veículos, Q_B o calor liberado por construções e Q_M o calor liberado pelo metabolismo humano.

Muitos estudos observacionais têm sido realizados com o objetivo de identificar a presença de ICU, assim como para compreender como este fenômeno se desenvolve e afeta a qualidade de vida em regiões urbanas. Segundo Salmond (2005a,b) a maior parte dos estudos sobre ICU no mundo a partir de 2000 estavam relacionados com poluição do ar e aerossóis, com poucos estudos relacionando ICU com mudanças climáticas,

variabilidade climática e clima. Roth (2007) ressaltou que muitos dos estudos observacionais sobre ICUs foram e continuam sendo realizados para cidades localizadas em latitudes médias. Outra grande parte mais recente destes estudos está sendo conduzido para avaliações de cidades localizadas no continente asiático, principalmente devido aos seus grandes crescimentos populacionais.

Kim e Baik (2004) encontraram, para o período de 1 ano, uma intensidade de até 3,4° C da ICU da cidade de Seul. Miao et al (2008) encontraram intensidade de 2,4° C da ICU da cidade de Pequim durante um mês de estudo. Também para a Ásia, Fujibe (2010) mostrou que no Japão há uma variação da intensidade da ICU relativa aos dias da semana, desatacando que em Osaka a variação diurna de temperatura é menor aos domingos e feriados. Para a Europa, Sajani et al (2008) encontraram áreas urbanas 6° C mais quentes que áreas rurais da cidade de Bologna, Itália. Comarazamy et al (2007) encontraram diferenças entre áreas urbana e rural de até 4,5° C de temperatura para a cidade de San Juan, Porto Rico.

As mudanças no clima podem afetar a intensidade e as características da ICU de determinada área urbana, já que estas mudanças irão influenciar diretamente a temperatura e as condições sinóticas. Mas também deve-se considerar que a presença de ICU pode comprometer conjuntos de dados utilizados para estimar as mudanças climáticas, já que estes podem ser submetidos à modificações principalmente devido à mudanças nos usos da terra em suas vizinhanças, relacionado ao processo de urbanização.

Neste escopo, Kalnay e Cai (2003) mostraram, para os Estados Unidos, através de dados observacionais e reanálises atmosféricas, que existe uma relação direta entre o processo de urbanização e tendências de aumento na temperatura mínima e diminuição da temperatura máxima em praticamente todo o país. Os autores atribuem estas tendências à mudanças nos usos da terra, gerando grandes modificações no BES e conseqüentemente no clima regional.

Ezber et al. (2007) investigaram os efeitos da urbanização sobre o clima de Istambul, Turquia, através de testes estatísticos, para análise de tendências, e simulações numéricas. Os autores concluíram que existe uma tendência de aumento da temperatura maior em área urbana do que em área rural, o que eles atribuem ao efeito da

urbanização. No estudo numérico realizado pelos autores eles conseguiram de forma satisfatória representar a ICU da cidade de Istambul e o efeito da urbanização nos últimos 50 anos, mostrando que há uma diferença de aquecimento de 1°C entre a ICU de Istambul no passado (referente a década de 50) e no presente (referente ao ano 2000).

Civerolo et al. (2007) também simularam o impacto do crescimento urbano, relacionado-o com urbanização da região metropolitana de Nova Iorque, Estados Unidos, sobre o clima urbano. Para isto, os autores geraram cenários de crescimento da área urbana através de modelagem de uso e cobertura da terra e utilizaram estes cenários para as simulações numéricas com o modelo MM5. Os autores destacaram que a intensa urbanização produz um aumento de 0,6°C na temperatura ao final da tarde, a camada limite planetária também aumenta aproximadamente 150m e ocorre uma diminuição na razão de mistura de vapor d'água.

Patz et al. (2005), em seu trabalho sobre o impacto das mudanças climáticas regionais sobre a saúde humana, mostraram que o efeito da ICU somado às mudanças climáticas já observadas e tendências futuras, principalmente em países de regiões temperadas do mundo, podem aumentar o número de óbitos e doenças relacionados com o clima.

Alguns estudos observacionais sobre ICUs em regiões de clima quente e úmido foram feitos para Cingapura (GOH E CHANG, 1999; CHOW E ROTH, 2006) e San Juan, Porto Rico (MURPHY et al., 2011). Wienert e Kuttles (2005) mostraram que existe uma estreita relação entre a intensidade da ICU com a latitude, onde em baixas latitudes a intensidade média observada é de aproximadamente 4°C a qual vai aumentando em direção as altas latitudes, com intensidade média de aproximadamente 6,1°C. Os autores explicam estas variações pela maior produção antropogênica de calor em altas latitudes e também à diferenças no balanço de energia em superfície entre estas regiões.

Goh e Chang (1999), analisando a relação entre as taxas de altura e comprimento das construções e a intensidade da ICU de Cingapura, mostraram que para locais quentes e úmidos, como a localidade de estudo, pequenos aumentos na temperatura podem ser traduzidos em desconforto térmico para a população, sugerindo que construções com altura reduzida e mais espaçadas horizontalmente podem auxiliar na diminuição do desconforto térmico para a população e diminuição na intensidade da ICU.

Muitos estudos mostram que a direção e intensidade do vento e nebulosidade controlam a forma e intensidade da ICU, em que a diferença espacial de temperatura em áreas urbanas decresce com a velocidade do vento e com o aumento da nebulosidade (ARNFIELD, 2003).

Chow e Roth (2006), também estudando a ICU de Cingapura, observaram uma sazonalidade na intensidade da ilha de calor, apresentando-se mais intensa no período seco do que na época chuvosa, o que é explicado pelo conteúdo de umidade diferenciado entre áreas rurais e urbanizadas. Os autores também destacaram que a geometria do tipo “canyon” possui pouca influência sobre a ICU, mas outros fatores como fluxos de calor antropogênicos, quantidade de áreas verdes e distância da área urbana para corpos de água podem explicar porque a intensidade é maior no distrito comercial do que em outros locais da área em estudo.

Murphy et al. (2011) mostraram que a ICU da cidade de San Juan, Porto Rico, também apresenta uma sazonalidade, sendo esta mais intensa no período seco, e menos intensa no período chuvoso, principalmente devido a presença de nebulosidade neste período, o que apresenta direta influência na radiação solar incidente e aquecimento da superfície. Os autores também concluíram que a presença de áreas verdes inseridas no contexto urbano não são muito eficazes para amenizar o aquecimento diurno, mas regiões com árvores e a sombra gerada por elas possuem grande influência no aquecimento diurno em áreas urbanas.

A ICU da cidade de Belém foi avaliada por Costa et al (2001), através de dados observacionais coletados durante dois meses (outubro de 2005 e fevereiro de 2006). Os autores encontraram grandes evidências da presença da ICU da cidade de Belém, com diferenças de temperatura entre a área urbana e rural de 4,5° C durante a estação menos chuvosa e de 1,5° C durante a chuvosa, com os maiores contrastes de temperatura entre área urbana e rural ocorrendo no período noturno.

Maitelli e Wright (1996) avaliaram as diferenças de temperatura e umidade relativa entre áreas intensamente urbanizadas e floresta durante 14 meses (fevereiro de 1991 e março de 1992) na cidade de Manaus. Os autores encontraram diferenças de 2,25°C entre a área urbana e floresta, com a região de cidade apresentando de 3% a 6% menos

umidade que a floresta, destacando a clara presença e a magnitude da ICU da cidade de Manaus.

A necessidade de entender os efeitos da influência urbana sobre o comportamento de algumas variáveis meteorológicas é de extremo interesse para a meteorologia, principalmente quando se trata de desenvolvimento de sistemas de tempo e conforto humano. Devido à escassez de dados observacionais que possam dar suporte ao estudo mais aprofundado da formação e influência das ICU, a modelagem atmosférica torna-se uma ferramenta muito útil.

Segundo Masson (2006) existem três tipos de modelos que tratam o balanço de energia em regiões urbanas: (i) os modelos empíricos, os quais se baseiam em observações do BES para a realização de experimentos estatísticos (LIU et al, 2006), (ii) modelos acoplados com esquemas de vegetação adaptados, onde as áreas urbanas são representadas dentro destes esquemas (WALKO et al, 2000), (iii) modelos de dossel urbanos de uma camada, como por exemplo o esquema TEB (MASSON, 2000) ou o UCM single-layer (KUSAKA et al, 2001), que trata diretamente a área urbana de forma a representar os efeitos do BES em áreas urbanas separadamente dentro do modelo atmosférico e (iv) modelos de dossel urbano de múltiplas camadas, como por exemplo o UCM multi-layer (MARTILLI et al, 2002; DUPONT et al, 2004).

O acoplamento em modelos atmosféricos, de modelos ou esquemas de superfícies capazes de representar de melhor forma as áreas urbanas, tem apresentado um grande avanço nos últimos anos. Alguns modelos de mesoescala são capazes de simular não somente a intensidade das ICU, mas também sua estrutura dinâmica e espacial.

Taha (1999) simulou as ICU em Atlanta, Estados Unidos, após incorporar um esquema de ICU no esquema de superfície do modelo atmosférico utilizado nas simulações. Da mesma forma, Vu et al (1999), acoplando um esquema de área urbana a um modelo de mesoescala, validou suas simulações de mesoescala sobre Tóquio, Japão, através de medidas de temperatura.

Lemonsu e Masson (2002), através de modelagem atmosférica com um esquema modificado para resolver o balanço de energia em áreas urbanas, mostraram a formação da ICU da cidade de Paris, França, explicando algumas características presentes em análises observacionais.

Rozoff et al. (2003) utilizaram o modelo RAMS acoplado ao esquema de dossel urbano TEB procurando entender o impacto das mudanças nos usos da terra, neste caso áreas urbanas, sobre a formação e intensificação de tempestades. Sendo este o primeiro trabalho com um esquema de dossel urbano inserido no modelo atmosférico RAMS, os autores concluíram que o modelo apresentou boa performance em simular as características atmosféricas observadas. No contexto da formação e intensificação de tempestades, os autores mostraram que a circulação formada devido à ICU apresenta-se como papel principal na formação de tempestades, principalmente pela convergência em superfície sobre a cidade, gerando movimento vertical suficiente para a formação deste fenômeno.

Freitas et al. (2007), utilizando o modelo atmosférico RAMS acoplado ao esquema de dossel urbano TEB, realizaram simulações para a região metropolitana de São Paulo, Brasil, tendo obtido resultados realísticos dos efeitos da ICU da região sobre o comportamento de circulações atmosféricas locais. Como citado brevemente nos parágrafos anteriores, os autores também destacaram que a presença da região metropolitana de São Paulo apresenta influência na velocidade de propagação da frente de brisa marítima que penetra a cidade onde, com a região de convergência sobre a área urbana, gera uma região de intenso transporte de umidade para níveis mais altos da atmosfera, o que pode gerar ou intensificar tempestades.

Guo et al. (2006) investigaram, através de simulações numéricas com o modelo MM5, a influência da urbanização sobre a microfísica de nuvens e precipitação em Pequim, China, concluindo que as células convectivas se desenvolvem mais cedo e de forma mais dispersa, com aumento de intensidade do escoamento descendente, e também com o enfraquecimento de convecção profunda e aumento da convecção rasa, principalmente devido ao aumento da rugosidade na superfície, diminuindo assim a convergência em baixos níveis.

Mais recentemente, Miao et al (2008) acoplaram um esquema de dossel urbano, o UCM *single-layer*, ao esquema de superfície Noah dentro do modelo *Weather Research Forecast* (WRF), obtendo resultados representativos e satisfatórios das principais características atmosféricas sobre a região urbana de Pequim, China.

3. MATERIAS E MÉTODOS

Para desenvolvimento do presente trabalho, considerou-se três etapas principais. Com o objetivo de estudar a formação das ICUs das cidades de Manaus e Belém e suas influências sobre o microclima local, foram realizadas análises observacionais e simulações numéricas com o modelo de mesoescala BRAMS.

Em uma primeira etapa, foi construído um novo mapa de vegetação e usos da terra para a área de estudo, ou seja, o mapa incluiu as regiões urbanas de Manaus e Belém, antes não consideradas nos mapas de vegetação utilizados em esquemas de superfície acoplados aos modelos atmosféricos. A inclusão das áreas urbanizadas da região amazônica possibilitou considerar simulações numéricas mais realísticas. Além da criação deste novo mapa, foi realizado ao mesmo tempo uma análise do crescimento das áreas urbanas das cidades em estudo.

Com o objetivo de determinar as dimensões das ICUs formadas pelas cidades de Manaus e de Belém e suas influências sobre o comportamento das principais variáveis meteorológicas, fez-se um estudo observacional com base em dados históricos e recentes coletados em algumas estações de superfície, em dois períodos distintos descritos no decorrer da metodologia.

Após as análises observacionais, foram realizadas simulações numéricas com o modelo atmosférico de mesoescala BRAMS, descrito no decorrer deste capítulo, com o objetivo de identificar a formação das ICUs e quantificar seus efeitos sobre os microclimas locais. Estas simulações numéricas foram comparadas e validadas a partir de dados observacionais, visando mostrar a capacidade do modelo numérico em reproduzir as ICUs das cidades de Manaus e Belém. Posteriormente à validação, foram realizados experimentos numéricos, com o mesmo modelo, para entender os impactos da urbanização, como crescimento da área urbana, na formação e intensificação das ICUs e influências sobre os microclimas locais.

Assim sendo, o diagrama apresentado na Figura 3.1 mostra esquematicamente o desenvolvimento do presente estudo.

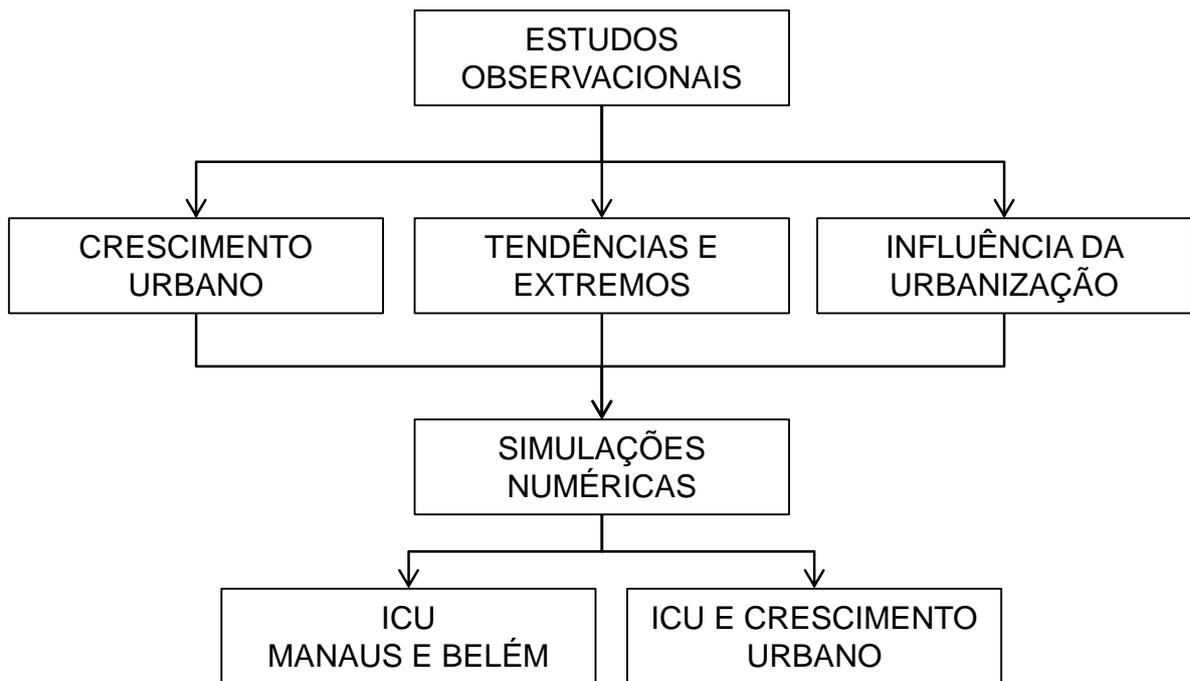


Figura 3.1 – Diagrama esquemático da metodologia empregada para o desenvolvimento do trabalho proposto.

3.1 Conjunto de dados observacionais

Os dados de superfície compreendem séries históricas de médias diárias, para o período de 1961 até 2010, e dados horários, entre 2000 e 2008, para as cidades de Manaus e Belém, das principais variáveis atmosféricas, incluindo temperaturas média, mínima e máxima do ar, umidade relativa, pressão atmosférica, intensidade e direção do vento, precipitação e radiação solar líquida. Os dados referentes a estas séries históricas foram coletados em estações de superfície do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para o 1º Distrito de Meteorologia em Manaus (1º DISME) (Lat: -3.129° Lon: -59.948°) e 2º Distrito de Meteorologia em Belém (2º DISME) (Lat: -1.4103° Lon: 48.4383°).

Para a comparação entre áreas urbanas e áreas não urbanizadas, para a cidade de Manaus, foi utilizado um segundo conjunto de dados coletado em uma estação do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), localizada em área de floresta distante aproximadamente 30 km da área urbana de Manaus (ZF2-K34) (Lat: -2.610° Lon: -60.210°). Este conjunto de dados inclui observações em 6 diferentes níveis entre 5 e 50 m de altura, a cada 30 minutos, de temperatura do ar e da umidade relativa para o período de 2000 a 2008, o qual foi organizado de forma a facilitar a comparação com o conjunto de dados obtidos em área urbana. Considerando que o primeiro nível de

observação de temperatura (5 m) utilizado no decorrer deste trabalho está inserido no dossel, também foram analisados os dados de temperatura coletados no nível de 50 m.

Para o período de simulação numérica com o modelo BRAMS, além dos dados das estações ZF2 e do INMET em Manaus, também foram utilizados dados do Aeroporto de Ponta Pelada (PP) (Lat: -3.146° Lon: -59.995°), estação do INPA (LAT e LON) e dados coletados no Aeroporto Eduardo Campos (LAT e LON), todas localizadas em área urbana. Para Belém foram utilizados dados coletados no Aeroporto Internacional (LAT e LON)

Vale ressaltar que um longo conjunto de dados sempre apresenta falhas. No conjunto de dados de área urbana de Manaus, para o período de 1961 a 2010, foram encontrados 685 dias faltantes para os dados de temperatura média (3,91%), 635 para temperatura máxima (3,62%) e 634 para temperatura mínima (3,62%). Para o conjunto de dados da área urbana de Belém, para o mesmo período, foram encontrados 935 dias faltantes para os dados de temperatura média (5,33%), 859 (4,9%) para temperatura máxima e 973 (5,55%) para os dados de temperatura mínima. Contudo, mesmo com as falhas apresentadas, nenhum método estatístico foi utilizado para o preenchimento das falhas deste conjunto de dados, uma vez que estas falhas não eram muito significativas frente ao tamanho do conjunto. O conjunto de dados da estação ZF2 também apresenta falta de dados, mas que não comprometem as análises.

No contexto do trabalho desenvolvido também foram utilizados dados de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) reconstruída, com resolução espacial de 2° (mais detalhes em Smith et al. (2008)) e dados de reanálises atmosféricas do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP)/*National Center for Atmospheric Research* (NCAR), com resolução espacial de 2,5° (mais detalhes em Kalnay et al. (1996)).

3.2 Metodologia

3.2.1 Análise das tendências e ilha de calor urbana

Com o objetivo de analisar os possíveis impactos do crescimento urbano sobre o microclima das cidades de Manaus e Belém, foram analisadas as anomalias das variáveis temperaturas média, máxima e mínima, e precipitação, as quais foram calculadas com relação à média do período de 1961 a 2010.

Para avaliar a magnitude da tendência das anomalias de temperatura média, máxima e mínima, assim como analisar o comportamento das anomalias de precipitação, foi calculada a tendência linear dos conjuntos de dados das anomalias anuais destas variáveis. Portanto, utilizou-se a seguinte equação:

$$Y = a + bX \quad (3.1)$$

em que Y é a variável a ser prevista, a é a interseção, X é o ano correspondente e b é a inclinação da reta.

Para o cálculo da inclinação b foi utilizado o método não-paramétrico da Curvatura Sen (SEN, 1968), em que o teste consiste no cálculo das $N' = n(n-1)/2$ inclinações estimadas através da equação 3.2:

$$Q = \frac{x_j - x_i}{j - i} \quad (3.2)$$

sendo x_j e x_i os valores dos dados no tempo j e i, respectivamente, em que $j > i$, N' é o número de pares de dados nos quais $j > i$, sendo que a mediana destes N' valores de Q é o valor estimado da inclinação de Sen. Vale ressaltar que a inclinação b pode ser estimada através do cálculo dos mínimos quadrados, utilizando o método da regressão linear, mas b calculado desta maneira pode desviar-se muito do verdadeiro valor da inclinação se existem “outliers” nos dados (GILBERT, 1983).

A significância das tendências das anomalias anuais de temperaturas média, máxima e mínima, e de precipitação foi estudada através do teste seqüencial de Mann-Kendall (GOOSSENS, 1983). Este teste baseia-se, assumindo a hipótese de um clima estável, que a sucessão de valores climatológicos deve ser independente e a distribuição de probabilidade deve permanecer sempre a mesma. Segundo Gossens e Berger (1986), este teste permite uma melhor análise de mudanças climáticas abruptas. Desta forma, inicialmente analisa-se a estacionariedade da séria temporal mediante a estatística seqüencial de Mann-Kendall. Considerando, x_1, x_2, \dots, x_n os dados pontuais, para cada elemento x_i , calcula-se o número n_i de elementos x_j precedentes ($j < i$), tal que $x_j < x_i$. Na hipótese nula (onde não existe mudança) mostra-se que o teste estatístico t_k dado por:

$$t_k = \sum_{i=1}^{i=k} n_i \quad (3.3)$$

é normalmente distribuído, com média e a variância dadas respectivamente por:

$$\bar{t}_k = E(t_k) = k(k-1)/4 \quad (3.4)$$

e

$$\overline{\delta t_k^2} = \text{Var}(t_k) = k(k-1)(2k+5)/72 \quad (3.5)$$

em que,

$$u_k = (t_k - \bar{t}_k) / \left(\overline{\delta t_k^2} \right)^{1/2} \quad (3.6)$$

é uma variável normalizada. A probabilidade $\alpha = \text{prob}(|u| > |u_k|)$ associada com os valores padronizados do teste, sendo maior que ao nível de significância, a hipótese nula é aceita, e em caso contrário a hipótese é rejeitada. Desta forma, quando existe alguma mudança brusca na série temporal, a hipótese nula é rejeitada, em que adicionalmente o sinal de u_k permitirá concluir se esta mudança tende a um incremento na variável ou tende a uma diminuição (Gossens e Berger, 1986).

A metodologia apresentada acima para análise de tendências em dados meteorológicos observacionais foi utilizada por Montávez et al. (2000), para analisar dados de temperatura em superfície, na cidade de Granada na Espanha, e por Obregón e Nobre (2003) para análise das tendências de precipitação entre os anos de 1951 e 1990 na região sul do Brasil e região amazônica.

Além da análise das tendências, foi também realizada uma análise de extremos, como proposto em Vicent et al. (2005). Os autores consideram diversos índices de extremos utilizando dados históricos de temperatura mínima e máxima diária, como apresentado na Tabela 3.1. Após a análise destes extremos, foram calculadas as tendências e

significância estatística da tendência observada nos índices calculados, utilizando a mesma metodologia apresentada anteriormente.

Tabela 3.1 - Definição dos índices de temperatura utilizados no estudo: Tmax e Tmin são as temperaturas máxima e mínima diária, respectivamente.

Variável	Índice	Definição	Unidade
TMAX	Dia mais quente	máxima temperatura diária	°C
	Dias quentes	dias com TMAX > 90º percentil	%
	Dias frios	dias com TMAX < 10º percentil	%
TMIN	Noite mais fria	mínima temperatura diária	°C
	Noites frias	dias com TMIN < 10º percentil	%
	Noites quentes	dias com TMIN > 90º percentil	%
TMAX	Variação diurna de temperatura (DTR)	média da diferença entre TMAX e TMIN	°C
TMIN	Variação extrema de DTR	diferença entre a maior TMAX e menor TMIN	°C

Todos os índices apresentados foram calculados para o período de 1961 a 2010. Os índices foram calculados para períodos anuais e para as estações seca e chuvosa, tendo sido excluídos os meses que tiveram 3 ou mais dias ausentes. Os índices baseados nos dados de temperatura foram calculados como a porcentagem de dias com valor superior ou inferior ao 90º ou 10º percentis. Os demais índices representam a temperatura máxima diária, a noite mais fria, a diferença diurna entre temperatura máxima e temperatura mínima e os extremos desta diferença.

Para uma estimativa das influências do crescimento urbano das cidades de Manaus e Belém sobre os climas locais, no decorrer dos 50 anos de observações analisadas neste trabalho, foi utilizada a metodologia proposta por Kalnay e Cai (2003). Os autores propõem que a diferença entre os dados de reanálises do NCEP/NCAR (NNR), conjunto 1, descrito anteriormente, e dados observacionais apresentam uma estimativa das tendências causadas pelas mudanças nos usos da terra em escala local, indicando assim, por exemplo, os efeitos da urbanização sobre os dados observados. Esta estimativa torna-se eficaz e possui uma vantagem, pois o conjunto de dados NNR não são sensíveis às observações de superfície, isto porque estas observações, exceto pressão à superfície, não são usadas no processo de assimilação.

Considerando a estimativa da ICU e para uma análise mais detalhada desta para a cidade de Manaus, foi calculado o valor da sua intensidade (IICU), para o período de

2000 a 2008, considerando-se a definição também usada por Maitelli e Wright (1996), em que a intensidade é dada por:

$$HCU = \frac{1}{D} \left[\sum_{d=1}^{d=D} (T_{u,d} - T_{r,d}) \right] \quad (3.7)$$

sendo d o número do dia, D o número de dias, T_u a temperatura na área urbana e T_r a temperatura na área rural.

3.2.2 Análise do crescimento urbano e elaboração do mapa de vegetação e usos da terra

O mapeamento da evolução de crescimento das áreas urbanas das cidades de Manaus e Belém foi feito através da interpretação de imagens do sensor TM do satélite Landsat 5, com resolução de 30 metros, e escala 1:250.000. As bandas utilizadas para o mapeamento foram 2, 3 e 4, na composição colorida B (*blue*), R (*red*) e G (*green*). Primeiramente foram selecionadas imagens das áreas de estudo, considerando-se mínima cobertura de nuvens. Portanto, as imagens selecionadas referem-se às seguintes datas: 07/07/1973, 04/08/1978, 03/12/1979, 15/08/1988, 17/07/1992, 28/09/1998, 02/07/2001, 30/08/2002, 09/08/2003, 14/10/2004, 30/06/2006 e 06/08/2008. Após a seleção, as imagens foram registradas e, em seguida, fez-se o recorte dos limites dos municípios de Manaus e Belém, com o objetivo de agilizar o processamento das imagens. O processo de mapeamento das áreas urbanas foi realizado através de classificação visual, sendo mapeado primeiramente o ano de 1973 e, posteriormente, os anos seguintes, sempre utilizando como base o mapeamento da data anterior. Foi utilizado também o classificador MAXVER, disponível no software SPRING, para auxiliar no mapeamento dos corpos d'água próximos às áreas urbanas das cidades de Manaus e Belém. Esse classificador considera o método estatístico de Máxima Verossimilhança, o qual permitiu classificação automática "pixel a pixel".

Para aplicação em modelagem faz-se necessária uma classificação simplificada da superfície, de tal forma que estejam representados os principais tipos de vegetação e usos da terra na região. O mapa de vegetação atual utilizado pelo modelo BRAMS, representativo da região amazônica, é o derivado do projeto PROVEG (SESTINI et al, 2002), enquanto a cobertura da terra das demais regiões do Brasil foi obtida dos mapas

de usos do solo do USGS, que incluem dados do Geosphere-Biosphere International Program - Land Cover (IGBP-LC), além das classes de vegetação natural da UNESCO (1973).

O mapa de vegetação atualmente utilizado pelo modelo BRAMS possui resolução espacial de 1km, contendo 21 classes de vegetação. Na região amazônica são observadas apenas 3 classes, segundo a classificação considerada no âmbito do projeto PROVEG, ou seja, floresta, cerrado, pastagem (áreas desmatadas) e água (SESTINI et al., 2002).

De modo geral, os mapas de vegetação têm sido produzidos a partir de compilações de várias fontes de dados da superfície, tais como Atlas, mapas locais e outros registros (DEFRIES E TOWNSHEND, 1994), a fim de prover condições de contorno para os modelos climáticos (MATTHEWS, 1983; WILSON E HENDERSON-SELLERS, 1985) e, também, para os modelos de previsão numérica de tempo.

Para a elaboração do novo mapa de vegetação e usos da terra, além dos dados obtidos através das análises das áreas urbanas das cidades em estudo, foram utilizados dados sobre classes de vegetação presentes no Brasil, que incluem aqueles gerados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), classes do Projeto de Biodiversidade (PROBIO) (biomas Cerrado, Pantanal e Pampa), ano base 2002, do Ministério do Meio Ambiente, informações do Projeto SOS Mata Atlântica, ano base 2005, e do Projeto Canasat do INPE, ano base 2005, referente ao Estado de São Paulo, além dos dados anteriormente presentes do projeto PROVEG. Sendo assim, para a criação do mapa final, primeiramente foi realizada a compatibilização das classes de vegetação e usos da terra de cada um destes conjuntos com aquelas consideradas pelo modelo de Superfície (SSiB) utilizado pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Logo, as classes de uso e cobertura da terra contidas no mapa final são: Floresta Perene, Floresta Decídua, Caatinga, Cerrado, Campos Tropicais/Extratropicais, Vegetação Secundária, Floresta Mista, Área Urbana, Agropecuária, Solo nu, Água. Após a compatibilização da legenda, seguindo procedimentos adotados por diversos autores como Câmara (1995) e Burrough e McDonnell (1998), foram criados bancos de dados para cada um dos estados brasileiros. Desta forma obteve-se um mapa com a representação mais realista e atual da

vegetação e usos da terra, de maneira que as principais áreas urbanas da região amazônica foram incluídas (ALVALÁ E VIEIRA, 2008).

O novo mapa de vegetação e usos da terra mencionado acima foi derivado para ser compatível com as classes de vegetação consideradas no esquema de superfície LEAF, esquema este que será melhor detalhado no item 3.3.2. Inclui para a região amazônica a classe 3, que representa as áreas de influência urbana, e a classe 19, representativa de regiões urbanas, além das classes já existentes no mapa original.

Finalmente, após a elaboração do mosaico final, foi gerada uma grade numérica para todo o território brasileiro representando as características de vegetação e usos da terra com resolução espacial de 1km, o qual foi disponibilizado por Vieira et al (2010). Este novo mapa foi então compatibilizado para as classes do OGE, uma vez que o modelo BRAMS utiliza o banco de dados de vegetação e usos da terra no formato OGE.

3.2.3 Simulações numéricas

3.2.3.1 O modelo BRAMS

Para as simulações realizadas no escopo deste estudo foi utilizado o modelo de mesoescala BRAMS, em sua versão 4.2, versão esta baseada na versão 6.0 do modelo RAMS, a qual foi desenvolvida por instituições brasileiras e internacionais com o objetivo de criar e aprimorar parametrizações e atualizações voltadas para a meteorologia do Brasil. O modelo RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*) é um modelo atmosférico prognóstico, desenvolvido por pesquisadores da Universidade do Colorado a partir de um modelo de mesoescala e um modelo de nuvens. Nesta nova versão do modelo BRAMS foram adicionados o esquema físico de balanço de energia em áreas urbanas (*Town Energy Budget - TEB*), modelo simples de transporte fotoquímico (*Simple Photochemical Module - SPM*), modelo de transporte de aerossóis *Coupled Aerosol and Tracer Transport model* (CATT-BRAMS), além de outros aprimoramentos. Também foram adicionados novos aperfeiçoamentos meteorológicos, como a parametrização de cúmulos rasos; novo esquema de fechamento para a convecção profunda; assimilação de dados de umidade do solo heterogênea; novo arquivo de vegetação, com resolução espacial de 1 km, integrado ao modelo de vegetação LEAF-3 (*Land Ecosystem Atmosphere Feedback model - 3*); e a integração de um novo esquema de superfície (SIB 2.5).

O BRAMS permite várias utilizações, desde a micro até a grande escala, sendo ele mais freqüentemente usado para a simulação de fenômenos atmosféricos de mesoescala. O modelo BRAMS pode ser rodado considerando duas ou três dimensões, não existindo uma resolução horizontal mínima para as simulações, podendo ser considerada resolução horizontal de até 2 m (PIELKE, 2002). Também não há limite para a resolução vertical. O modelo pode ser rodado para vários domínios, desde um domínio global até simulações com domínio de pequena escala.

O BRAMS é um modelo baseado em diferenças finitas, que usa grade do tipo C de Arakawa, em que as variáveis termodinâmicas e de umidade são definidas no centro dos pontos de grade e as componentes u , v e w são resolvidas nos pontos $dx/2$, $dy/2$ e $dz/2$, respectivamente. O conjunto de equações utilizadas pelo BRAMS são não hidrostáticas e quase-Boussinesq, consistindo de equações prognósticas para todas as variáveis de estado incluindo u , v , w , temperatura potencial e razão de mistura e função de Exner. O modelo utiliza a formulação de diferenças finitas de segunda ordem no espaço e no tempo resolvidos de forma explícita para a resolução das equações diferenciais do modelo. Neste esquema os termos de advecção são colocados na forma de fluxo, de maneira que massa, momento e energia sejam conservados. Para solucionar o problema gerado por ondas sonoras, o modelo utiliza o esquema de divisão dos passos de tempo (*time-split*), em que são calculados os termos responsáveis pelas ondas sonoras em passos de tempo menores que os passos de tempo utilizados para os termos de advecção.

O RAMS permite a utilização de dois tipos de coordenada vertical. Uma é do tipo sigma- z , a qual acompanha o terreno na parte inferior e possui o seu topo plano. Uma desvantagem deste tipo de coordenada é que ela possui dificuldade no tratamento de topografia muito íngreme, culminando em problemas nos gradientes horizontais nestas regiões. Uma segunda coordenada vertical é a do tipo *shaved* ETA, em que as aberturas das faces das células de grade são adaptadas à topografia, com a estrutura de grade como uma verdadeira grade cartesiana. Esta nova coordenada vertical permite o tratamento dos gradientes verticais em terrenos muito complexos, e com terrenos que apresentem construções e vegetação.

Uma vantagem do modelo BRAMS é que ele permite o aninhamento múltiplo de grades, o que possibilita que as equações sejam resolvidas de forma simultânea nas

grades de diferentes resoluções espaciais. O aninhamento de grades permite que se use alta resolução espacial para uma região selecionada, ocupando certa parte da grade de menor resolução espacial. Com isso podem-se resolver as equações e obter resultados para uma grade de resolução mais grosseira e, ao mesmo tempo, realizar a simulação para uma grade com resolução espacial mais fina. Portanto, as variáveis prognósticas calculadas para a grade de menor resolução servirão como condição de fronteira para a grade aninhada, sendo este tipo de interação chamada de *two-way*.

O BRAMS possui dois tipos de inicialização: uma horizontalmente homogênea e outra horizontalmente variada. Na opção de inicialização horizontalmente homogênea, parte-se de dados de uma radiossondagem disponível e esta é extrapolada para todo o domínio da grade no primeiro instante de simulação. Já na opção de inicialização horizontalmente variada, o BRAMS utiliza o pacote RAMS – ISAN. Este pacote de inicialização utiliza um método de análise objetiva dos dados, o qual permite utilizar dados de análises ou previsões de outros modelos atmosféricos (SOUZA, 2007).

3.2.3.1.1 Parametrizações

Alguns fenômenos atmosféricos importantes e que influenciam determinadas variáveis meteorológicas algumas vezes ocorrem em escalas espaciais menores que a resolução espacial utilizada para a solução das equações. Para que sejam levados em consideração os efeitos destes fenômenos sobre as variáveis meteorológicas é necessário que de alguma forma estes fenômenos possam ser resolvidos. Assim, procura-se um equilíbrio estatístico entre os fenômenos e variáveis; logo, o que irá interessar será o efeito estatístico sobre o fluxo dos fenômenos de pequena escala. Este processo descrito chama-se parametrizar. No modelo BRAMS alguns dos fenômenos parametrizados são: radiação, convecção, turbulência, microfísica e interação solo-vegetação-atmosfera, entre outros.

3.2.3.1.1.1 Radiação

A radiação é o processo mais importante da atmosfera, responsável por todo balanço de energia que alimenta os demais processos atmosféricos. O esquema de parametrização de radiação reproduz os efeitos da radiação de ondas curta e longa na atmosfera e no solo e sua interação com alguns componentes da atmosfera.

Os esquemas de parametrização de radiação adotados no modelo BRAMS são baseados em modelos de transferência radiativa, os quais levam em consideração grupos de linhas de absorção. Nos esquemas de onda curta leva-se em consideração o aquecimento devido à absorção pelo ozônio e espalhamento e absorção por nuvens. Nos esquemas de onda longa são parametrizados alguns efeitos, como o aquecimento devido à absorção de radiação por vapor d'água, CO₂, nuvens, etc.

No modelo BRAMS existem quatro esquemas de parametrização para a radiação: o esquema de Mahrer e Pielke (1977) (MP), o esquema *two-stream* de Chen e Cotton (1983) (CC), o esquema *new two-stream* denominado Harrington (HR) e proposto por Meyers et al 1997 e o esquema CARMA (TOON et al, 1989).

A parametrização proposta por MP é um esquema simples, no qual se levam em consideração o espalhamento por oxigênio, ozônio e CO₂ e trata a absorção por vapor d'água. No esquema de MP para onda longa é levado em consideração a emissão e a absorção infravermelha do CO₂ e vapor d'água, embora este esquema possui a deficiência de não tratar nuvens ou qualquer material condensado.

O esquema de parametrização proposto por CC para a radiação de onda curta apresenta uma solução completa para a equação de transferência radiativa. Para a radiação de onda longa, o esquema de CC considera 3 bandas de absorção parametrizando o efeito de nuvens.

O esquema HR, assim como o esquema CC, utiliza uma solução completa para a equação de transferência radiativa no tratamento da radiação de onda curta, levando em consideração os efeitos de absorção por vapor d'água, CO₂ e ozônio. Este esquema considera 3 bandas de onda curta e 5 bandas do infravermelho, computando todas as interações relacionadas com o espalhamento e a absorção por todos hidrometeoros constituintes das nuvens.

O esquema CARMA possui as mesmas características do esquema CC para onda longa e onda curta, mas possui, além da interação entre nuvens e radiação, a interação entre aerossóis atmosféricos.

3.2.3.1.1.2 Convecção

Os processos relacionados com movimentos ascendentes ocasionados por diferenças de densidade ou por forçantes topográficas, por exemplo, muitas vezes ocorrem em escalas espaciais menores do que o espaçamento utilizado na resolução das equações do modelo. Como exemplo, tem-se a formação de uma nuvem Cumulonimbus, a qual possui dimensões espaciais horizontais menores do que a maioria das resoluções horizontais utilizadas nos modelos. Desta maneira, estes processos convectivos necessitam ser parametrizados.

Muitas vezes estes processos convectivos estão associados à formação de nuvens e conseqüente precipitação, além da transferência de momento e propriedades térmicas entre as camadas mais baixas e mais altas da atmosfera. Esta distribuição de propriedades na coluna atmosférica poderá produzir instabilidade e, assim, a formação de nuvens.

As parametrizações adotadas no modelo BRAMS dividem-se em três partes: (1) o controle dinâmico, em que o ambiente de grande escala é que irá modular a intensidade e a localização da convecção; (2) retroalimentação, em que a convecção modifica o ambiente de grande escala através da troca de propriedades como momento e calor; (3) controle estático, no qual são representadas as características termodinâmicas da convecção. Dentro destas formulações representam-se os principais processos relacionados com a convecção, como o cisalhamento em baixos níveis, interação entre jatos de altos níveis e jatos de baixos níveis, estratificação do vapor d'água e convergência em baixos níveis.

No modelo BRAMS estão disponíveis dois esquemas de parametrização da convecção, o proposto por Kuo e Anthes (KUO, 1965, 1974; ANTHES, 1977) (KUO) e o esquema proposto por Grell e Devenyi (2002) (GRELL).

O esquema KUO possui a desvantagem de não incluir as correntes descendentes em escala convectiva. Já as vantagens deste esquema são: (a) convergência de umidade é bem desenvolvida nos trópicos, (b) o esquema tende a ser robusto para uma variedade de aplicações em grades com menor resolução espacial e (c) este esquema representa bem a fase de convecção e as características conceituais de sistemas convectivos de

mesoescala. Neste esquema há uma forte correlação entre a precipitação convectiva observada e o total de convergência de vapor d'água em grande escala em uma coluna.

O esquema GRELL tem como desvantagens não trabalhar com subconjuntos de nuvens, trabalhando assim com nuvens separadamente, e o esquema de fechamento está associado com a hipótese de quase-equilíbrio, hipótese que não é bem aplicada à convecção do tipo explosiva em médias latitudes. Este esquema tem como vantagem incluir os efeitos de correntes descendentes em escala convectiva e está bem adequado a grades com alta resolução espacial, como grades com 10 a 12 km.

Um esquema importante de parametrização incorporado no modelo BRAMS é a parametrização relacionada com a formação de cúmulos rasos. Este tipo de nuvem apresenta um importante papel no balanço de energia e de umidade na Camada Limite Convectiva (CLC), onde a presença de cúmulos rasos modifica o perfil termodinâmico da baixa troposfera, o que cria um ambiente favorável ao desenvolvimento de convecção profunda. Este esquema de cúmulos rasos foi proposto por Souza (1999) e é capaz de representar o ciclo diurno da convecção não precipitante sobre o continente e assim sua interação com a superfície, configurando, portanto, de melhor forma o perfil termodinâmico da atmosfera.

3.2.3.1.1.3 Microfísica de nuvens

Muitos modelos e esquemas de nuvens tratam de processos específicos para representar a precipitação. O esquema de microfísica de nuvens trata de forma explícita a formação dos hidrometeoros constituintes de uma nuvem.

Essencialmente, a parametrização de microfísica descreve a evolução das características de hidrometeoros no tempo, os mecanismos de interação entre as mesmas e a permanente troca de vapor e calor com a fase gasosa. As categorias inicialmente envolvidas nos processos microfísicos são as gotículas de nuvens e cristais de gelo. Este tipo de parametrização garante certa versatilidade ao usuário, ao permitir que o experimento numérico seja conduzido dentro de certas restrições por ele estabelecidas, como, por exemplo, a escolha do conjunto de hidrometeoros a serem introduzidos na simulação. Também é possível que o usuário determine o diâmetro médio para cada categoria de gelo e água nos processos de microfísica. Em alguns modelos de

microfísica mais recentes é possível considerar que a concentração de hidrometeoros seja uma variável prognosticada a partir da razão de mistura.

A parametrização de microfísica de nuvens incluída no modelo BRAMS calcula fontes e sumidouros para diferentes categorias de hidrometeoros, como vapor d'água, gota de nuvem, *pristine ice*, neve, agregados, *graupel* e granizo. O início dos processos microfísicos na atmosfera ocorre a partir de núcleos de condensação. Nestes modelos de microfísica podem ser especificados a quantidade e tipo de núcleos de condensação, além de ser levados em consideração a presença de aerossóis na atmosfera. Portanto, uma vez nucleado o vapor d'água o crescimento das gotícula é governado pela difusão de vapor e calor. Após isto, as gotículas maiores irão crescer por colisão e coalescência, em que uma categoria de água cresce pela coleção de outra categoria.

3.2.3.1.1.4 Camada Limite Planetária (CLP)

Na camada limite atmosférica, fenômenos de escala temporal muito rápida ocorrem na atmosfera em escalas espaciais muito menores que o espaçamento de grade dos modelos de circulação geral da atmosfera e modelos de área limitada. Estes processos são determinados pelos fluxos de calor, momento e umidade entre a superfície e a atmosfera adjacente. Estes fenômenos incluem turbulência, ondas de gravidade, turbilhões ou outras estruturas que não podem ser resolvidas através das equações governantes dentro dos modelos e, por isso, precisam ser parametrizadas. Então, a representação da Camada Limite Planetária (CLP) em modelos globais ou de área limitada ocorre essencialmente na correlação de termos de sub-grade, desde que a resolução do modelo não seja capaz de explicar de forma satisfatória os fluxos de pequena escala encontrados nesta camada (HARTMANN, 1994; PIELKE, 2002).

Como ressaltado por Anthes et al. (1980), uma resolução detalhada da CLP é essencial para melhores soluções quando o aquecimento diferenciado ao longo de um terreno complexo, ou através de limites entre terra e água, está presente, gerando significantes gradientes verticais de variáveis meteorológicas dentro desta camada (PIELKE, 2002).

Os esquemas que parametrizam os processos de CLP estão relacionados com o cálculo dos coeficientes de difusão turbulenta na horizontal e na vertical. O modelo BRAMS possui quatro diferentes opções de esquemas de parametrização da CLP.

Os dois primeiros esquemas, descritos a seguir, são adequados para grades cujos espaçamentos horizontais são muito maiores que o espaçamento vertical utilizado na solução das equações, levando a não solução de movimentos convectivos dominantes nesta escala de CLP.

O primeiro esquema é a formulação de Smagorinsky (1963) para o cálculo dos coeficientes de difusão horizontal e vertical. Nesta formulação os coeficientes de difusão são calculados como o produto da taxa de deformação horizontal (gradientes horizontais da velocidade do vento) e do quadrado da escala do comprimento. Neste esquema o coeficiente de difusão vertical é parametrizado pelo esquema de Mellor e Yamada (1982), através da Energia Cinética Turbulenta (ECT).

Uma segunda opção utiliza a formulação de Smagorinsky (1963) para os coeficientes horizontais e um análogo unidimensional a este esquema para os coeficientes verticais. A deformação vertical é obtida através dos gradientes de cisalhamento do vento.

Uma terceira opção calcula os coeficientes de difusão horizontal e vertical através de um produto entre o tensor cisalhamento do vento em três dimensões e o quadrado da escala de comprimento (KOSOVIC, 1997).

O esquema de Deardorff (1978) é a quarta opção disponível no modelo BRAMS, sendo destinado apenas para finalidades de Simulações de Grandes Turbilhões (LES), em que os movimentos turbulentos realizam a maior parte do transporte na vertical. Neste esquema são utilizados os cálculos da ECT para a estimativa dos coeficientes de difusão na horizontal e na vertical.

3.2.3.1.2 Modelo de interação Solo-Vegetação-Atmosfera (SVAT)

Muitos estudos têm mostrado que mudanças no uso e cobertura da terra possuem ligação direta com mudanças no tempo, no clima e no ecossistema. Devido à importância destas interações, parametrizações de processos no solo e na vegetação foram criados e têm sido sofisticados nos últimos anos. Neste contexto, foram elaborados esquemas de Interação solo-vegetação-atmosfera, chamados SVATs (*Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer Schemes*), para serem acoplados a modelos atmosféricos.

O modelo BRAMS possui como esquema SVAT o modelo LEAF-3 (*Land Ecosystem-Atmosphere Feedback Model* – versão 3), o qual foi desenvolvido na Universidade do Colorado, EUA (WALKO et al., 2000). A versão acoplada no modelo BRAMS é uma representação das características de superfície que incluem vegetação, solo, lagos e oceanos, áreas cobertas por neve, e sua interação umas com as outras e com a atmosfera. O modelo LEAF-3 possui equações prognósticas para temperatura e umidade do solo em múltiplas camadas, temperatura da vegetação, água na superfície, como deposição e precipitação, massa de cobertura por neve, armazenamento de energia em múltiplas camadas, e temperatura e razão de mistura do vapor d'água no ar do dossel. Os termos de trocas nas equações prognósticas incluem trocas turbulentas, condução de calor, difusão e percolação da água sobre gelo e sobre o solo, transferência radiativa de onda longa e onda curta, evapotranspiração e precipitação.

A implementação do modelo LEAF-3 no BRAMS permite que múltiplos tipos de usos e ocupação do solo coexistam dentro de uma mesma coluna atmosférica, definida como *patch*. Cada *patch* possui uma única combinação de vegetação, dossel, solo, corpos de água ou neve. Logo, o modelo trata, por exemplo, precipitação, em cada *patch* da grade computacional utilizada.

Portanto, o modelo LEAF-3 é uma representação dos balanços de energia e umidade para o solo, vegetação, ar no dossel, superfícies temporárias de água e corpos permanentes de água, e trocas de energia e umidade com a atmosfera. Desta forma, o LEAF-3 foi formulado considerando processos nas seguintes componentes físicas: (1) solo, (2) vegetação, (3) dossel e (4) atmosfera. No esquema LEAF-3 são resolvidas as equações de conservação de energia e umidade explicitamente para todos os componentes citados acima. A Figura 3.2 mostra os componentes do esquema LEAF-3 mostrando a interação entre cada componente física citada anteriormente.

No LEAF-3 o solo é subdividido em vários níveis verticais, em que cada camada possui entre 3 cm e 30 cm, podendo-se utilizar até 10 camadas, sendo a energia interna e o conteúdo de umidade estimados para cada camada. O fluxo de umidade entre as camadas é parametrizado com base no modelo de multicamada descrito por Tremback e Kessler (1985). Já o fluxo de calor no solo é dependente da umidade através do parâmetro de umidade potencial (WALKO et al, 2000).

A água interceptada pela superfície que chegou até o solo através da precipitação e não infiltrou ou escoou até um corpo de água permanente, também é tratado dentro do esquema LEAF-3. Neste contexto, as coberturas de neve, derretimento de neve, água da chuva e cursos de água temporários são tratados.

A área vegetada não é dividida em camadas computacionais, sendo representada por uma única temperatura e umidade superficial. Nestas áreas vegetadas o dossel é definido como o ar na proximidade da vegetação e que é influenciado por ela. Neste ambiente as trocas de calor e de umidade entre o dossel e a vegetação e a resistência estomática da vegetação são tratados conforme mostrado em Lee (1992). Os fluxos turbulentos entre o dossel e a atmosfera livre são representados pela diferença de temperatura ou vapor entre eles, dividido por um coeficiente de resistência de transferência aerodinâmica (Louis, 1979). No LEAF-3 existe ainda um módulo capaz de representar a formação de orvalho ou gelo sobre a vegetação e também um módulo de balanço de energia para a precipitação interceptada pela vegetação.

Para os corpos de água permanentes, o LEAF-3 não irá estimar sua temperatura, mas esta é especificada como uma constante sazonal. A estimativa da rugosidade para os corpos de água permanentes é baseada na altura da onda a partir da velocidade do vento local.

Os fluxos superficiais de calor e umidade produzidos pelos esquemas convectivos e de microfísica do BRAMS são divididos entre os que afetam diretamente a vegetação e os que geram escoamento superficial, através da precipitação e de acordo com a porcentagem de vegetação.

No esquema LEAF-3 a radiação de onda longa é emitida, absorvida e refletida pela atmosfera, vegetação, neve, solo e corpos de água permanentes. No LEAF-3 não são aceitas múltiplas reflexões de onda longa; então, assume-se que uma vez que a radiação é refletida esta é absorvida completamente antes de alcançar a próxima superfície.

No exemplo da Figura 3.2 mostram-se dois *patches* abaixo de uma coluna atmosférica (A), em que os dois *patches* contém cobertura parcial de vegetação (V), o dossel está representado em um único nível (C), duas camadas de solo (G) e ainda duas camadas de neve (S).

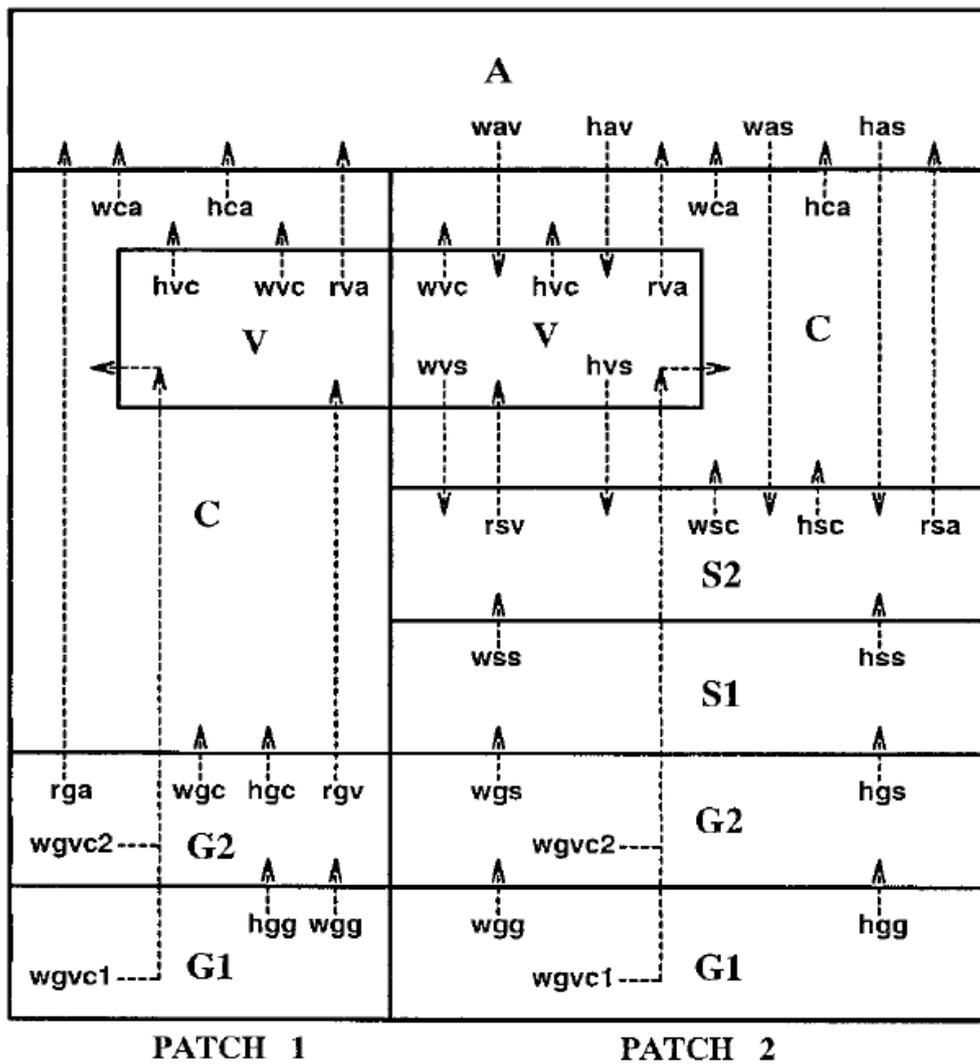


Figura 3.2 – Esquema da transferência de calor e umidade entre as componentes do esquema LEAF-3.

Fonte: Walko et al. (2000)

Os fluxos são indicados na forma F_{123} , em que o primeiro subscrito indica se o fluxo é de água (w), calor (h) ou radiação de onda longa (b). O segundo e o terceiro subscritos indicam a fonte e o receptor do fluxo que pode ser a atmosfera (a), o dossel (c), a vegetação (v), o solo (g) e a neve (s). Existe uma exceção na notação de F_{wgv} , que é o fluxo de água da terra para o dossel via respiração, diferentemente do F_{wvc} que denota o fluxo de água devido à água interceptada pela vegetação. O fluxo devido à radiação de onda curta, não mostrado na Figura 3.2, é definido como o valor líquido S recebido por cada componente do sistema.

O esquema LEAF-3 usa atualmente as classes de vegetação do esquema BATS (*Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme*) (DICKINSON et al, 1986) para definir alguns dos parâmetros utilizados, embora os processos físicos representados pelo BATS não são usados. Os parâmetros adotados do BATS incluem: índice de área foliar, fração de área vegetada, altura da vegetação, rugosidade, albedo, emissividade, resistência estomática e profundidade da raiz. Nesta nova versão do LEAF-3 o índice de área foliar e a fração de área vegetada, antes dependentes de variações sazonais pré-definidas, agora podem ser estimados a partir de dados de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). O dado padrão utilizado para a inicialização das classes de vegetação e de usos do solo é obtido no formato OGE (*Olson Global Ecosystem* - Olson, 1994a,b).

Uma desvantagem do esquema LEAF-3 no tratamento de áreas urbanas é que ele adapta, para o tipo de cobertura encontrada nestas áreas, parâmetros biofísicos, citados anteriormente, como índice de área foliar, fração de cobertura, altura do dossel do tipo de vegetação, comprimento de rugosidade, albedo e emissividade. Desta forma, a área urbana é tratada como um tipo de vegetação, não sendo considerados algumas principais características destas regiões.

3.2.3.1.3 O esquema TEB

Em muitos modelos atmosféricos, os esquemas de SVATs tratam regiões urbanas com parâmetros modificados, geralmente considerando estas regiões como áreas de solo nu. Na versão 4.2 do modelo BRAMS encontra-se acoplado o esquema de superfície *Town Energy Budget* (TEB). O esquema TEB foi primeiramente proposto por Masson (2000) com o objetivo de adicionar nas simulações o efeito urbano. Este esquema é um modelo de dossel urbano, de apenas uma camada, em que se usa uma geometria de canyon (OKE, 1988), diferentemente da utilizada no esquema LEAF-3, o que permite o refinamento dos balanços radiativos, bem como dos fluxos de momento, calor turbulento e fluxos de superfície através de um tratamento fisicamente mais detalhado.

Desta maneira, a usual forma de tratamento de áreas urbanas é trocada por um modelo de uma camada, que permite a simulação de fluxos turbulentos na superfície de um modelo atmosférico de mesoescala coberto por construções, ruas ou qualquer tipo de material artificial. Assim sendo, modelos de dossel urbano irão representar de forma mais realística o Balanço de Energia em Superfície (BES) de áreas urbanas.

Portanto, as regiões urbanas serão tratadas pelo esquema TEB da seguinte forma: (1) as construções e prédios têm todos a mesma largura e altura; (2) as construções estão localizadas ao longo de ruas idênticas, na qual o comprimento é considerado bem maior que a largura; (3) qualquer orientação das ruas é possível e todas existem com a mesma probabilidade.

Como o esquema TEB é um modelo de apenas uma camada, as trocas entre a superfície e a atmosfera ocorrem somente no topo dos *canyons* e telhados (Figura 3.3). Este tratamento permite que quando acoplado com um modelo atmosférico, a base do modelo esteja localizada no nível dos telhados.

Outra característica do esquema TEB é que ele não utiliza uma única temperatura da superfície urbana, e sim três temperaturas de superfície (Figura 3.4a), representativas dos telhados, ruas e paredes (MASSON, 2000). Com isso, o esquema possui balanços de energia separados para cada tipo de superfície e interações radiativas entre cada tipo. No TEB, entre o topo da camada e o topo do *canyon*, o vento é tratado de forma logarítmica, e de forma exponencial entre o topo do *canyon* e a superfície (Figura 3.4b).

Com o esquema TEB existe também um tratamento especial para a evolução dos reservatórios de água, em que a precipitação é interceptada por telhados e ruas e escoada para o sistema de bueiros. O balanço de radiação de onda longa para o sistema de *canyon* é calculado como uma re-emissão. A radiação solar direta é afetada pelo efeito sombra, portanto são necessários cálculos especiais para estimar o fluxo solar recebido por ruas e paredes, dependendo do ângulo de incidência. Com isso, a radiação solar, dentro do esquema TEB, pode ser espalhada e recebida pelas paredes, assumindo que as reflexões são isotrópicas (Figura 3.4c).

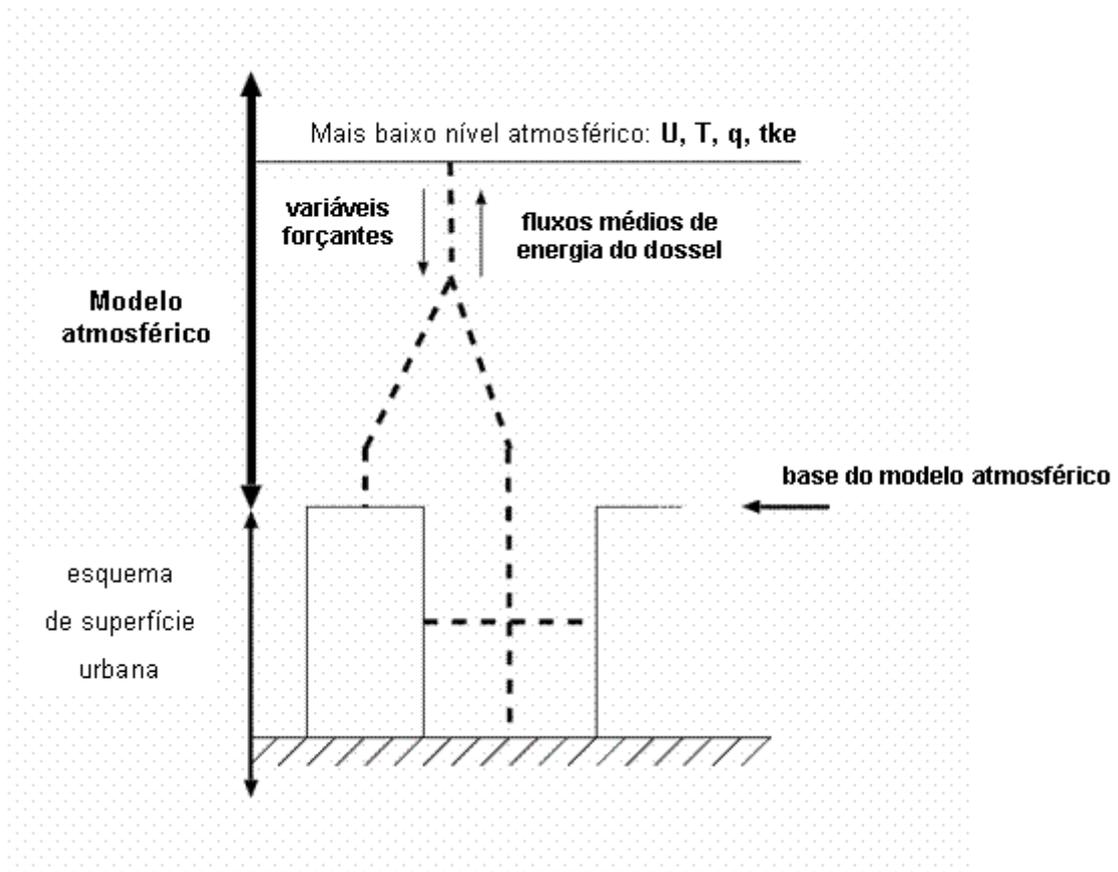
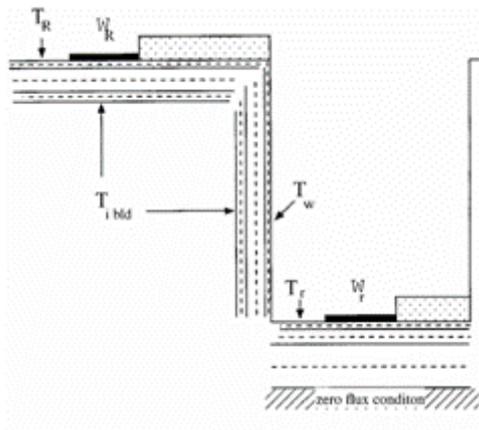


Figura 3.3 – Vista esquemática de um esquema de superfície urbana de uma camada.

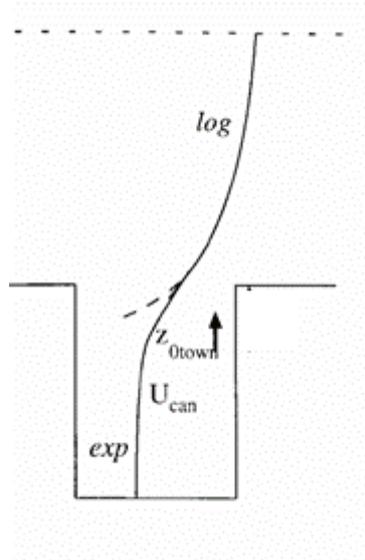
Fonte: Adaptado de Masson (2006)

No esquema TEB também são consideradas as fontes de calor antropogênicas, como o aquecimento doméstico e combustão. O aquecimento doméstico é resolvido explicitamente, pela consideração de uma temperatura interna constante, independente da temperatura externa. Já as fontes de calor por combustão incluem as contribuições veicular e industrial, com os fluxos de calor emitidos por estas fontes especificadas pelo usuário no momento da simulação.

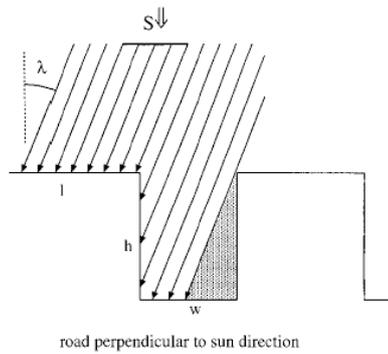
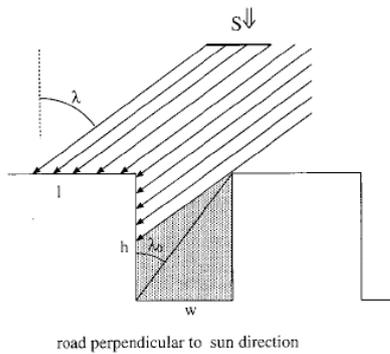
Para os fluxos turbulentos, a resolução do modelo deve ser capaz de representar os movimentos da subcamada de rugosidade urbana. Logo, a aproximação utilizada no esquema TEB supõe que existem duas fontes principais de calor da cobertura artificial para a atmosfera, levando a dois fluxos turbulentos de calor: os telhados e o sistema de *canyon*.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.4 – (a) Discretização das temperaturas das superfícies dos telhados, ruas e paredes, (b) perfil do vento dentro e fora do canyon e (c) esquema da radiação solar recebida no canyon.

Fonte: Adaptado de Masson (2000)

O esquema TEB utiliza parâmetros geométricos, radiativos e térmicos para descrever as características urbanas. Como parâmetros geométricos o TEB utiliza a fração ocupada por construções e altura média das construções; como parâmetros radiativos têm-se albedo e emissividade de telhados, ruas e paredes; e como parâmetros térmicos têm-se a condutividade e a capacidade térmica de ruas, paredes e telhados. A partir destas informações, o esquema TEB retorna para o modelo atmosférico os fluxos de energia

sobre as regiões urbanas, além de outras variáveis referentes às características urbanas. Mais informações do esquema TEB podem ser obtidas em Masson (2000).

3.2.3.2 Descrição das simulações

Com o objetivo de identificar a formação das ICUs das cidades de Manaus e Belém e o impacto da urbanização sobre os microclimas locais, foram realizadas simulações numéricas com o modelo BRAMS. A seguir é feita uma descrição mais detalhada dos experimentos numéricos realizados.

Um aprimoramento necessário para o desenvolvimento do trabalho proposto, que permitiu o tratamento de áreas urbanas mais realisticamente através das simulações numéricas, foi a inclusão das áreas urbanas da região amazônica no mapa de vegetação a ser utilizado nas simulações. Mais detalhes do novo mapa de vegetação foram descritos anteriormente. O esquema de dossel urbano TEB é apenas ativado, e com isso permite simular o efeito urbano, apenas para regiões que apresentem as classes de usos do solo 19 e 21, referentes a áreas urbanas do esquema de vegetação LEAF.

No escopo do trabalho foram realizados 3 simulações para Manaus e 2 simulações para Belém, com o objetivo de avaliar a sensibilidade do modelo aos parâmetros referentes ao dossel urbano inseridos no esquema TEB. Estas simulações foram posteriormente avaliadas conforme metodologia descrita na próxima seção deste Capítulo. Após a análise dos resultados foi então escolhida a melhor configuração para assim realizar três experimentos independentes entre si, considerando-se simulações numéricas distintas para cada cidade, Manaus e Belém. Os experimentos estão divididos em três etapas: controle (EXCTRL), um experimento de tempo passado (EXPAS) e um experimento de tempo futuro (EXFUT), os quais são diferenciados pelo mapa de vegetação e usos da terra considerados.

Para todos os experimentos foram geradas três grades, sendo duas grades aninhadas, com espaçamento horizontal de 20 km para a grade mais grosseira (Grade 1 – G1), representando 72 pontos na direção x e 72 pontos na direção y; 5 km para a primeira grade aninhada (Grade 2 – G2) e 1 km para a segunda grade aninhada (Grade 3 – G3), estas duas grades representando 102 pontos nas direções x e y respectivamente. Como espaçamentos verticais, para as três grades foram utilizados 42 níveis na vertical, com o primeiro nível a 20 m do solo, aumentado a uma taxa de 1,1 até o nível de 1500 m, em

que a altura aumenta em uma taxa constante de 800 m até o topo vertical a 22704 m de altura. Este maior detalhamento nos primeiros níveis da atmosfera permite uma melhor visualização dos processos que ocorrem na Camada Limite Planetária (CLP). O domínio compreendido por cada grade na simulação é ilustrado na Figura 3.5.

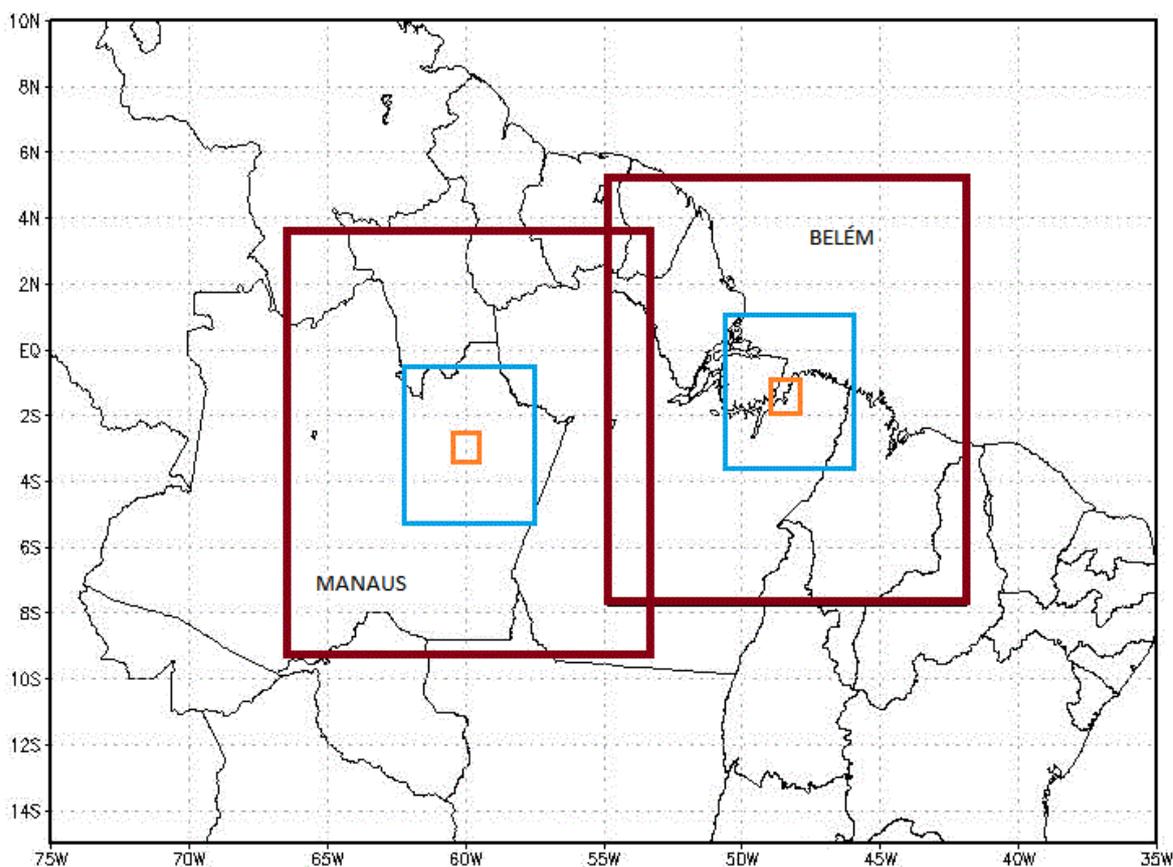


Figura 3.5 – Domínio das simulações descritas na metodologia. Retângulo em vermelho representa a grade 1, em azul a grade 2 e laranja a grade 3.

Nas simulações realizadas com o modelo BRAMS, o solo possui 7 camadas com profundidades em 0,02 m, 0,06 m, 0,14 m, 0,30 m, 0,62 m, 1,26 m, 2,54 m e 5,10 m. Para todas as simulações foi utilizada a parametrização de convecção profunda de Grell e Devenyi (2002) com fechamento GRELL. A inicialização da umidade do solo é de Gevaerd e Freitas (2006), e para isso utiliza-se a umidade do solo estimada para o dia da simulação com resolução espacial de 0,25°. A fração de área verde relativa à cobertura da vegetação é baseada em *Normalized Difference Vegetative Index* (NDVI). Como parametrização de radiação de ondas longas e ondas curtas foi utilizado o modelo de Carma, assim como os coeficientes verticais de difusão turbulenta na CLA são baseados

na parametrização de Mellor e Yamada (1974). Para uma simulação mais realística dos processos microfísicos de nuvens na atmosfera, a parametrização de microfísica de nuvens foi utilizada ao nível de complexidade 3. Vale salientar também que em todas as simulações utilizou-se a TSM semanal com resolução espacial de 0,5°, compreendendo a semana do dia de início do experimento. Como condição inicial e de contorno de grande escala para as simulações numéricas utilizou-se análises do *National Center for Environmental Prediction* (NCEP), com espaçamento de grade de 1° x 1°, referente ao dia de simulação escolhido.

O EXCTR considerou o mapa de vegetação e usos da terra atual, referente às condições observadas em 2008. No contexto do EXCTR foi feito o estudo da formação da ICU das cidades de Manaus e Belém, provendo assim um resultado a ser validado pela análise observacional descrita anteriormente e também como cenário de comparação para as demais simulações descritas.

No EXPAS foi utilizado um mapa de vegetação e usos da terra que representam as dimensões passadas das cidades de Manaus e Belém, com o intuito de analisar a formação da ICU no passado e o impacto do crescimento urbano dos últimos 30 anos. Este mapa foi criado a partir da compilação de imagens do satélite LANDSAT para o ano de 1973, tendo sido estimada a área física das cidades e, assim, inserido no mapa de vegetação e usos da terra já existente.

Já no EXFUT, foi analisado o papel da urbanização, observado através de análises do crescimento das áreas urbanas de Manaus e Belém; portanto, foram inseridas estas novas dimensões no mapa de vegetação e usos da terra. Para a estimativa dos crescimentos das áreas físicas das cidades de Manaus e Belém foi feita uma comparação entre as imagens do satélite LANDSAT obtidas em 1973 e 2008, descritas anteriormente. Para tanto, procurou-se definir uma característica de crescimento (novas dimensões, setores de maior expansão física, etc), inserindo no mapa atual de vegetação e usos da terra as áreas urbanas de novas dimensões que represente assim as tendências de urbanização. Desta forma, o EXPAS e o EXFUT provêm informações sobre a formação e intensificação das ICUs das cidades de Manaus e Belém em tempos passados e futuro, respectivamente, devido a grande influência da urbanização.

O dia inicial de simulação foi escolhido como sendo o dia inicial da campanha mini-BARCA (01/06/2008), realizada em 06/2008 e 11/2008 para compreender o Balanço de Carbono sobre a Amazônia. Com isso, foi realizada uma integração no tempo de 720 horas (1 mês). A assimilação das condições de contorno (*nudging*) foi realizada a cada 3600s em 9 pontos nas laterais da grade e 10800 no topo (15000m). Vale salientar que as condições atmosféricas utilizadas (NCEP) estão disponíveis a cada 6 horas. Outra característica da simulação é que foi utilizado um passo de tempo de 20s e saídas horárias para diversos campos atmosféricos, estes analisados posteriormente e apresentados na seção de resultados.

O esquema TEB necessita de parâmetros geométricos, radiativos e térmicos e algumas características adicionais, como horário de maior tráfego, referentes às regiões urbanas presentes na área de estudo. Como parâmetros geométricos, o esquema TEB necessita da rugosidade da área urbana, fração coberta por construções e altura média das construções. Já os parâmetros radiativos são o albedo e a emissividade de cada componente do esquema, ruas, telhados e paredes. Os parâmetros térmicos utilizados pelo TEB são a capacidade e a condutividade térmica de cada componente citada anteriormente. Estes parâmetros foram estimados a partir de observações em campo e obtidos também a partir de referências bibliográficas.

Além destes parâmetros, o esquema TEB necessita de dados sobre a liberação de calor sensível e calor latente de fontes veiculares, industriais e domésticas. A metodologia para a estimativa de emissão de calor destas duas fontes segue a proposta por Khan e Simpson (2001) e por Coutts et al. (2007). As estimativas dos fluxos de calor liberados por veículos são obtidas a partir de dados de consumo de combustíveis, para as quais se aplicam a metodologia proposta por Small (1991), utilizando-se a relação de 45 kilojoules/grama de combustível. Para a estimativa dos fluxos de calor liberados por fontes industriais e domésticas na área urbana usa-se dados de consumo de energia, dada em MW. Os dados referentes a estas estimativas foram obtidos através de revisão bibliográfica e são apresentados na seção de resultados. O conjunto de dados de consumo de combustíveis foi obtido através da Agencia Nacional de Petróleo (ANP) e os dados relacionados com o consumo de energia foram obtidos através do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

O método proposto acima, e que foi utilizado no desenvolver da pesquisa, também foi utilizado com sucesso em simulações e estudos sobre ICU para a área urbana da região metropolitana de São Paulo e em duas grandes cidades da Austrália, Melbourne e Brisbane. Assim sendo, com o método apresentado obteve-se as principais componentes relacionadas com o fluxo de calor antropogênico em uma região urbana, tornando desta forma as simulações com o esquema TEB mais realísticas do ponto de vista de áreas urbanizadas, bem como tratando de forma mais realista o balanço de energia nas áreas consideradas.

3.2.3.3 Validação das simulações

Para a validação das simulações numéricas realizadas no escopo do estudo o, uma comparação entre as simulações do modelo BRAMS com a análise observacional, descrita anteriormente, para o período de dados e simulações referentes ao experimento BARCA foi realizada.

Alguns testes estatísticos permitem a avaliação da performance do modelo BRAMS sobre as áreas urbanas de Manaus e Belém. Um método muito utilizado envolve o cálculo dos coeficientes de correlação entre as simulações e os dados observacionais. Desta forma, analisa-se a relação linear entre os dados simulados e observados. Para o cálculo dos coeficientes de correlação entre as simulações e os dados observados foi utilizado o método de correlação linear de Pearson, que é dado pela razão entre a covariância e o produto dos desvios padrão das duas variáveis, como segue:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.8)$$

O método do erro médio quadrático (EMQ) também foi utilizado para aferir a precisão da simulação, em que altos valores de EMQ indicam altos níveis de discrepância entre as simulações e os dados observados. A fórmula do EMQ é dado por:

$$EMQ = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_k - o_k)^2 \quad (3.9)$$

Para estimar a magnitude do erro da simulação, utilizou-se o método da raiz do erro médio quadrático imparcial ($REM_{Q_{IM}}$), proposto por Pielke (2002). A fórmula do método REMQ é escrita como:

$$REM_{Q_{IM}} = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [(y_k - \bar{y}) - (o_k - \bar{o})]^2 \right\}^{1/2} \quad (3.10)$$

A partir da análise dos valores obtidos por cada método foi obtida informação sobre a performance do modelo BRAMS em simular as características atmosféricas sobre as regiões urbanas de Manaus e Belém.

4. RESULTADOS

4.1 Avaliação do crescimento urbano das cidades de Manaus e Belém

Procurando entender a relação entre o crescimento da área urbana e da população de Manaus e Belém e as tendências positivas de aumento nos valores de temperatura e precipitação, analisou-se a evolução do crescimento das áreas urbanas a partir do ano de 1973 até o ano de 2008. A metodologia e conjunto de dados utilizados para o mapeamento da evolução de crescimento das áreas urbanas das cidades foram descritos com maiores detalhes na metodologia.

As análises feitas a partir das imagens de satélite (Figura 4.1) mostram que a cidade de Manaus cresceu predominantemente na direção norte e nordeste, sendo o ano de 1998 o que apresentou um grande crescimento da área urbana. Os resultados permitem observar que entre os anos de 1973 e 2008 a cidade de Manaus aumentou sua área em 153 km².

O aumento da área urbana da cidade de Manaus está diretamente ligado ao crescimento populacional observado nos últimos anos, visto que, segundo o IBGE (Censo IBGE, 2000), a população cresceu mais de 500% nos últimos 30 anos, entre 1970 e 2000. A expansão da área urbana observada em Manaus no sentido norte também apresenta relação com as áreas de expansão agrícola da cidade, que após alguns anos tornam-se loteamentos e zona urbanizada, modificando assim a paisagem e a cobertura vegetal natural. A presença da reserva Adolpho Ducke apresentou grande influência na tendência de crescimento para norte, limitando o crescimento para leste sobre a área de proteção.

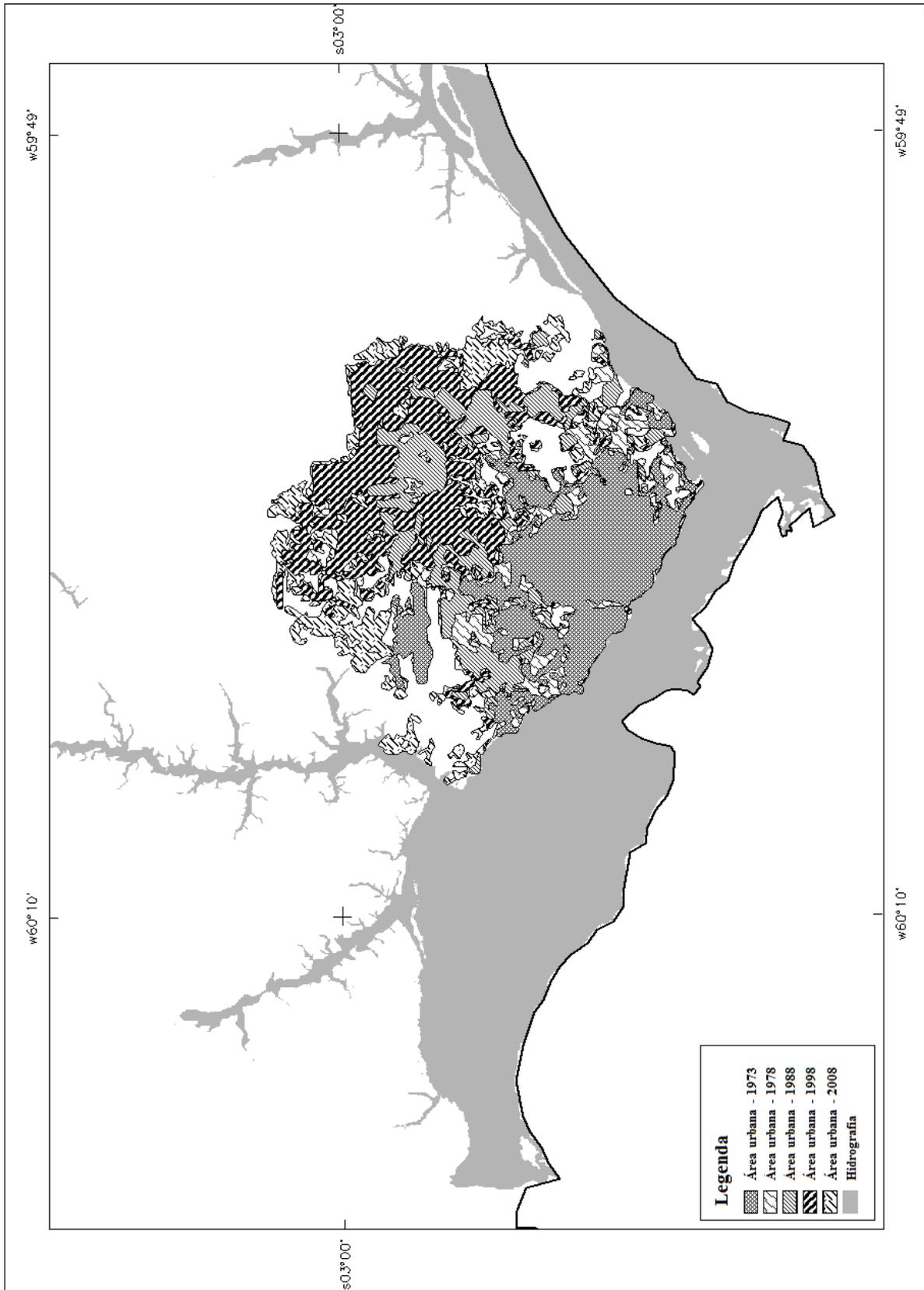


Figura 4.1 – Mapeamento do crescimento da área urbana da cidade de Manaus, AM, entre os anos de 1973 e 2008.

Os dados apresentados mostram estar de acordo com informações da secretaria de Terras e Habitação do Amazonas (SETHAB, 2004), que destacam que entre 2002 e 2003 foram contabilizadas mais de 100 novas ocupações no perímetro urbano, sendo que em 2004 foi observada uma média mensal de ocupação de 3,5. O processo de crescimento desordenado, com ocupação de áreas irregulares e de risco pode trazer perigo para a população urbana. Segundo dados da Defesa Civil de Manaus, mais de 800 moradias localizadas em igarapés e nas regiões norte e oeste do município correm risco de desabar devido às fortes chuvas.

Tabela 4.1 – Valores das áreas urbanas das cidades de Manaus e Belém observadas através das imagens LANDSAT.

MANAUS		BELÉM	
Ano	Área (km²)	Ano	Área (km²)
1973	91.62	1973	76.16
1978	94.97	1984	155.03
1979	96.95	1989	187.12
1988	125.72	1994	191.75
1992	156.19	1998	242.33
1998	194.78	2001	243.77
2001	201.48	2003	256.33
2002	207.32	2004	256.46
2003	218.48	2006	268.52
2004	225.67	2008	270.16
2006	239.37		
2008	242.19		

As análises feitas a partir das imagens de satélite (Figura 4.2) mostram que a cidade de Belém cresceu predominantemente na direção leste, sendo 1984 o ano que apresentou um grande crescimento da área urbana. Os resultados permitem observar que, assim como o que se observou para Manaus, entre os anos de 1973 e 2008 a cidade de Belém aumentou sua área em 190 km².

Nota-se que grande parte do crescimento da área urbana observada ocorreu nas cidades vizinhas à Belém. Diferentemente de Manaus, a cidade de Belém possui uma região metropolitana mais desenvolvida. Por outro lado, a falta de dados sobre o crescimento e história da urbanização da cidade de Belém torna a análise sobre o crescimento observado subjetiva. Observações feitas em campo permitiram observar que o

crescimento da cidade de Belém ocorreu de forma mais vertical, com a construção de um número elevado de prédios com altura significativa. Também se observou que a urbanização de áreas mais ao norte do centro da cidade de Belém ocorreu mais lentamente, com áreas já observadas no ano de início da análise. Grande parte do crescimento observado nos municípios vizinhos à Belém ocorreu principalmente na década de 80. Nota-se também que existe uma direta relação entre os censos do IBGE e o crescimento da área urbana de Belém. Enquanto na década de 90 observou-se praticamente o mesmo número de habitantes nas duas cidades, Manaus e Belém, no decorrer do período pode-se observar que o crescimento populacional foi mais evidente em Manaus, enquanto Belém apresentou um crescimento menor quando se faz a comparação. Mas, quando se analisa o crescimento das cidades vizinhas à Belém, nota-se que grande parte da população se estabeleceu nestas regiões, indicando assim não só o crescimento da área urbana de Belém, mas sim o crescimento de uma região metropolitana desta região, com uma população de mais de 2 milhões de habitantes (IBGE, 2010).

Os resultados obtidos através das análises do crescimento das áreas urbanas das cidades de Manaus e Belém foram utilizados para justificar alguns resultados obtidos através de análises observacionais, através da relação entre urbanização e tendências de aquecimento. Estes também serviram de ferramenta para a elaboração dos cenários para as simulações numéricas realizadas no contexto deste trabalho.

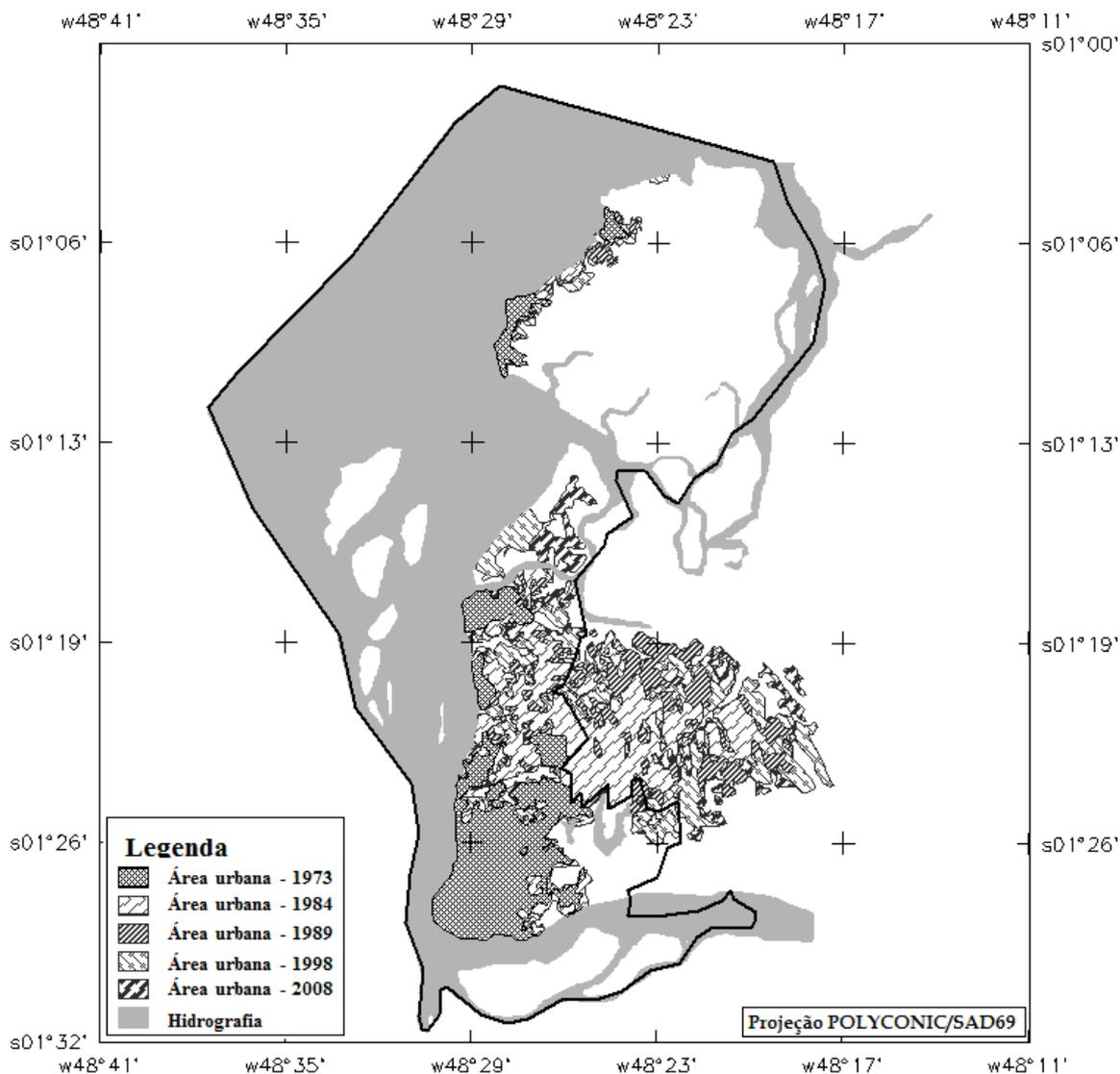


Figura 4.2 – Mapeamento do crescimento da área urbana da cidade de Belém, PA, entre os anos de 1973 e 2008.

4.2 Evolução das características do microclima das cidades de Manaus e Belém

O primeiro conjunto de dados observacionais permitiu que algumas características do clima da cidade de Manaus fossem investigadas (Tabela 4.2). Com relação à temperatura média do ar, para o período de 1961 a 2010 o valor observado é de 26,82°C ($\pm 0,92^\circ\text{C}$), que concorda com aquele obtido por Oliveira et al. (2006; 2008). Os valores de temperatura média também mostraram que o mês de outubro (março) é o mais quente (frio), com média de 27,90°C $\pm 0,41^\circ\text{C}$ (26,15°C $\pm 0,60^\circ\text{C}$). Já as máximas (mínimas) temperaturas do ar são observadas durante o mês de setembro (julho) com valor de 33,44°C $\pm 0,78^\circ\text{C}$ (22,95°C $\pm 0,61^\circ\text{C}$). Outra característica associada com a temperatura

do ar em Manaus indica que durante os meses de fevereiro e março (outubro) foram registrados os menores (maiores) valores de temperatura máxima (mínima), iguais a $30,65^{\circ}\text{C} \pm 0,68^{\circ}\text{C}$ ($23,77^{\circ}\text{C} \pm 0,53^{\circ}\text{C}$).

Quanto aos dados de precipitação, o valor acumulado anual é de $2265,29 \pm 126,25 \text{ mm ano}^{-1}$, com o mês de abril (agosto) apresentando os maiores (menores) índices pluviométricos, cujos valores são de $319,58 \pm 76 \text{ mm mês}^{-1}$ ($54,46 \pm 33 \text{ mm mês}^{-1}$). Conforme definição dos períodos secos e chuvosos, a precipitação média (acumulada) durante o período chuvoso foi de $278,48 \pm 103,57 \text{ mm mês}^{-1}$ (1648,61 mm), enquanto que no período seco a média (acumulada) foi de $99,26 \pm 71,56 \text{ mm mês}^{-1}$ (593,59 mm). Nota-se uma evidente relação entre a temperatura média mínima e o período chuvoso da cidade, que ocorre durante o mês de março, dentro do quadrimestre chuvoso (JFMA). Esta relação deve-se à presença de nebulosidade neste período, que de certa forma influencia de forma direta o balanço de radiação em superfície (resfriamento radiativo), o que leva a uma redução dos fluxos de calor sensível em superfície e, conseqüentemente, a um resfriamento da atmosfera, conforme também ressaltado, entre outros, por Betts (2001).

Kayano e Moura (1986), Molion (1987) e Rao e Hada (1987) mostraram que as variações anuais na temperatura do ar em superfície são influenciadas pela variabilidade de mecanismos dinâmicos que geram convecção, formação de nuvens e chuva. Muitos destes mecanismos dinâmicos estão associados às fontes tropicais de calor latente. Fenômenos como El Niño/Oscilação Sul (ENOS) influenciam de forma direta a célula de Walker, suprimindo a atividade convectiva sobre a região amazônica e, assim, a formação de nuvens e convecção. Durante o período de estudo (1961 – 2008) foram evidenciados 12 episódios de El Niño, com destaque para os eventos 1982-1983 e 1997-1998, que apresentaram forte intensidade, e 8 episódios de La Niña, destacando os de maior intensidade aqueles dos anos de 1972-1976 e de 1983-1986.

Seguindo a metodologia proposta foram calculadas as anomalias e tendências dos dados observacionais das cidades de Manaus e Belém. Os dados de anomalias anuais da temperatura média do ar observados em Manaus (Figura 4.3a) mostram uma tendência de aquecimento de $0,74^{\circ}\text{C} \pm 0,22^{\circ}\text{C}$ para o período de 1961 a 2010, significativa ao nível de 0,1%. Nota-se que o comportamento das anomalias apresenta certa variabilidade interanual, possivelmente associada a padrões atmosféricos observados sobre os

oceanos Atlântico e Pacífico Tropical. Marengo (2006) mostrou que a precipitação na região amazônica possui uma variabilidade associada à mecanismos de intensificação de sistemas de pressão sobre o oceano Atlântico tropical, que tendem a modificar o comportamento dos vento alísios e conseqüentemente o transporte de umidade para sobre a bacia amazônica.

Analisando as tendências por décadas (Figura 4.5a), nota-se que a década entre 2001 até 2010 é a que apresenta a maior tendência de aquecimento, não significativa estatisticamente, de $0,63^{\circ}\text{C} \pm 0,21^{\circ}\text{C}$, mas que possivelmente está relacionado com o intenso crescimento urbano nesta década. Kalnay e Cai (2003) ressaltaram que alterações no microclima de determinada região podem ser afetadas tanto por influências antropogênicas, como urbanização e outros tipos de mudanças no uso da terra, como também por efeito de gases estufa. Como mencionado anteriormente, entre os anos de 1973 e 2008 a área urbana da cidade de Manaus cresceu aproximadamente 153 km^2 , o que influenciou de forma significativa o comportamento da temperatura média do ar, apresentando uma tendência de aquecimento positiva entre 1991 e 2010.

Analisando os resultados obtidos pelo teste seqüencial de Mann-Kendall para as tendências de temperatura média (Figura 4.4a) em Manaus, não se observa mudanças significativas no comportamento desta variável, uma vez que as curvas se cruzam apenas em 1968, mas não indicam alguma mudança climática abrupta no conjunto de dados. Nota-se que a curva direta (u_k) é praticamente negativa desde 1968, mostrando uma elevação a partir de 1987, mas seguida de uma queda a partir de 1997. Este padrão de queda a partir de 1968 e 1997 mostra-se associado com a ocorrência de eventos de El Niño de escala moderada (1968) e forte (1997). As mudanças no padrão de circulação atmosférica associado a estes eventos possui relação direta com mudanças significativas nos valores de temperatura média em Manaus.

Tabela 4.2 – Valores climatológicos de temperatura média, máxima e mínima e de precipitação observados em Manaus e em Belém entre os anos de 1961 e 2010.

Manaus			Belém		
T. média (°C)			T. média (°C)		
<u>Anual</u>	26,82	± 0,92	<u>Anual</u>	26,23	± 0,76
<u>Seco</u>	27,33	± 0,55	<u>Seco</u>	26,47	± 0,70
<u>Chuvoso</u>	26,31	± 0,64	<u>Chuvoso</u>	25,96	± 0,74
T. máxima (°C)			T. máxima (°C)		
<u>Anual</u>	31,73	± 1,34	<u>Anual</u>	31,73	± 1,02
<u>Seco</u>	32,55	± 1,24	<u>Seco</u>	32,29	± 0,68
<u>Chuvoso</u>	30,9	± 0,83	<u>Chuvoso</u>	31,15	± 0,98
T. mínima (°C)			T. mínima (°C)		
<u>Anual</u>	23,27	± 0,74	<u>Anual</u>	22,47	± 0,76
<u>Seco</u>	23,35	± 0,80	<u>Seco</u>	22,24	± 0,76
<u>Chuvoso</u>	23,19	± 0,66	<u>Chuvoso</u>	22,66	± 0,70
Precipitação (mm)			Precipitação (mm)		
<u>Anual</u>	2265,29	± 126,25	<u>Anual</u>	2809,28	± 146,43
<u>Seco</u>			<u>Seco</u>		
média	99,26	± 71,56	média	139,08	± 60,40
acum.	593,59		acum.	789,97	
<u>Chuvoso</u>			<u>Chuvoso</u>		
média	278,48	± 103,57	média	360,59	± 121,71
acum.	1648,61		acum.	2019,31	

Conforme salientaram Nobre et al. (2009), a ocorrência de fenômenos El Niño tende a diminuir a atividade convectiva e, conseqüente, a precipitação sobre a Amazônia, o que pode influenciar de forma direta o comportamento da temperatura em superfície. Ainda neste contexto, segundo Molion (1991) e Mantua et al. (1997), as variações sazonais de temperatura na região amazônica estão diretamente relacionadas com as variabilidades de precipitação e são moduladas principalmente pelos fenômenos El Niño/ Oscilação Sul (ENOS), que por sua vez estão associadas às fases quente e fria da Oscilação Decadal do Pacífico (ODP). Conforme ressaltado por Oliveira et al. (2006 e 2008), as tendências de aquecimento para o período de 1921-2000 para a cidade de Manaus foram causadas por persistentes eventos de ENOS e presença da ODP. Para tanto, analisaram as tendências das anomalias de temperatura média do ar para períodos interdecadais, atribuindo que grande parte do incremento positivo na tendência de aquecimento deve-se às fases positivas da ODP e seguidos eventos de ENOS. Desta forma, procuraram

demonstrar que esta tendência não pode ser considerada apenas como mudança climática e fatores de urbanização, e sim a uma variabilidade climática.

Assim como observado para Manaus, o primeiro conjunto de dados observacionais permitiu que algumas características do clima da cidade de Belém fossem investigadas (Tabela 4.2). Com relação à temperatura média do ar, para o período de 1961 a 2010 o valor observado é de $26,23^{\circ}\text{C} (\pm 0,76^{\circ}\text{C})$. Os valores de temperatura média também mostraram que o mês de novembro (fevereiro) é o mais quente (frio), com média de $26,84^{\circ}\text{C} \pm 0,59^{\circ}\text{C}$ ($25,63^{\circ}\text{C} \pm 0,64^{\circ}\text{C}$). Já as máximas (mínimas) temperaturas do ar são observadas durante o mês de novembro (outubro) com valor de $32,55^{\circ}\text{C} \pm 0,67^{\circ}\text{C}$ ($22,10^{\circ}\text{C} \pm 0,67^{\circ}\text{C}$). Quanto aos dados de precipitação, o valor acumulado anual é de $2809,28 \pm 146,43 \text{ mm ano}^{-1}$, com o mês de março (novembro) apresentando os maiores (menores) índices pluviométricos, cujos valores são de $447,35 \pm 101,83 \text{ mm mês}^{-1}$ ($123,80 \pm 65,45 \text{ mm mês}^{-1}$). Conforme definição dos períodos secos e chuvosos, a precipitação média (acumulada) durante o período chuvoso foi de $360,59 \pm 121,71 \text{ mm mês}^{-1}$ ($2019,31 \text{ mm}$), enquanto que no período seco a média (acumulada) foi de $139,08 \pm 60,40 \text{ mm mês}^{-1}$ ($789,97 \text{ mm}$). Os maiores valores pluviométricos observados para os dados de Belém estão relacionados com a maior quantidade de sistemas precipitantes atuantes sobre a região, como a formação de Linhas de Instabilidade e sistemas convectivos formados pela influência de brisa marítima. Desta forma, como foi observado para Manaus, existe uma forte relação entre a temperatura média mínima e o período chuvoso da cidade, diretamente influenciado pela presença de nebulosidade.

Os dados de anomalias anuais da temperatura média do ar observados em Belém para o período de 1961 a 2010 (Figura 4.3b) mostram uma tendência de aquecimento ainda maior do que a observada para Manaus, com intensidade de $1,51^{\circ}\text{C} \pm 0,45^{\circ}\text{C}$ e alta significância estatística de 99,9%. Nota-se que nos dados de Belém também existe uma variabilidade interanual, possivelmente associada ao mesmo mecanismo discutido anteriormente para Manaus. Analisando as tendências por décadas (Figura 4.5b), nota-se que a década entre 1991 até 2000 é a que apresenta a maior tendência de aquecimento, com intensidade de $0,65^{\circ}\text{C} \pm 0,22^{\circ}\text{C}$, enquanto a década entre 2001 e 2010 também apresenta intensidade elevada de aquecimento, com valor de $0,46^{\circ}\text{C} \pm 0,15^{\circ}\text{C}$, ambos estatisticamente significantes ao nível de 95%. Assim como citado para Manaus,

esta tendência de aquecimento observada possivelmente está relacionada com o intenso crescimento urbano nesta década.

Analisando a significância das tendências (teste seqüencial de Mann-Kendall) de temperatura média (Figura 4.4b), não se observa mudanças significativas no comportamento desta variável nos dados observados em Belém, visto que as curvas não se cruzam, indicando assim que as tendências observadas não estão relacionadas com alguma mudança climática abrupta nos dados observados. Mesmo assim, nota-se que a curva direta (u_k) apresenta oscilações entre 1961 e 1978, isto é, a partir deste ano a curva começa a apresentar uma elevação positiva até o ano de 1997, quando inicia uma tendência negativa no seu comportamento. Novamente, salienta-se que principalmente esta tendência negativa observada a partir de 1997 está relacionada com o evento de El Niño em 1997-1998.

Analisando ainda as tendências de temperatura para Manaus e Belém, nota-se que em Manaus também existe uma tendência de aumento das temperaturas máxima e mínima durante o período de 50 anos de observações. As análises de tendência em Manaus mostram que existe uma tendência de aquecimento de $0,84 \pm 0,25^\circ\text{C}$ e de $0,61 \pm 0,18^\circ\text{C}$ para as temperaturas máxima e mínima respectivamente, com uma significância estatística estimada pelo teste de Mann-Kendall de 99% para as duas variáveis (Figura 4.6a e 4.6b). Nota-se que para a temperatura mínima existe uma anomalia extremamente negativa entre os anos de 1999 e 2001, possivelmente relacionada com a ocorrência do fenômeno La Niña de escala moderada ocorrido entre 1998-2001. Liebmann e Marengo (2001) salientaram que anomalias negativas de TSM no pacífico, associadas com o fenômeno La Niña, estão positivamente correlacionados com tendência de aumento na precipitação sobre a região amazônica, o que de certa forma está diretamente associado com a temperatura em superfície.

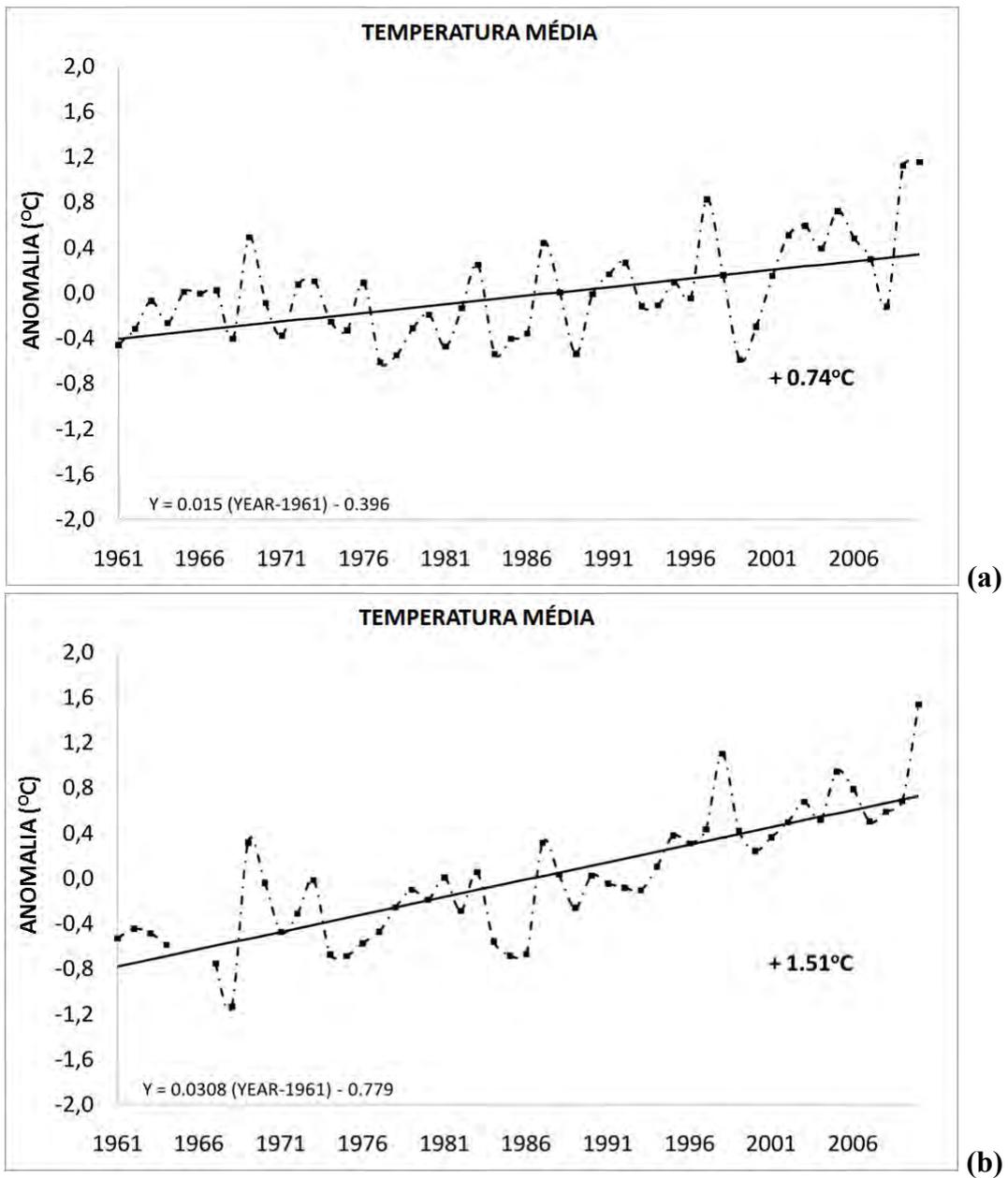


Figura 4.3 – Anomalias e tendências observadas para a variável temperatura média em (a) Manaus e (b) Belém entre os anos de 1961 e 2010.

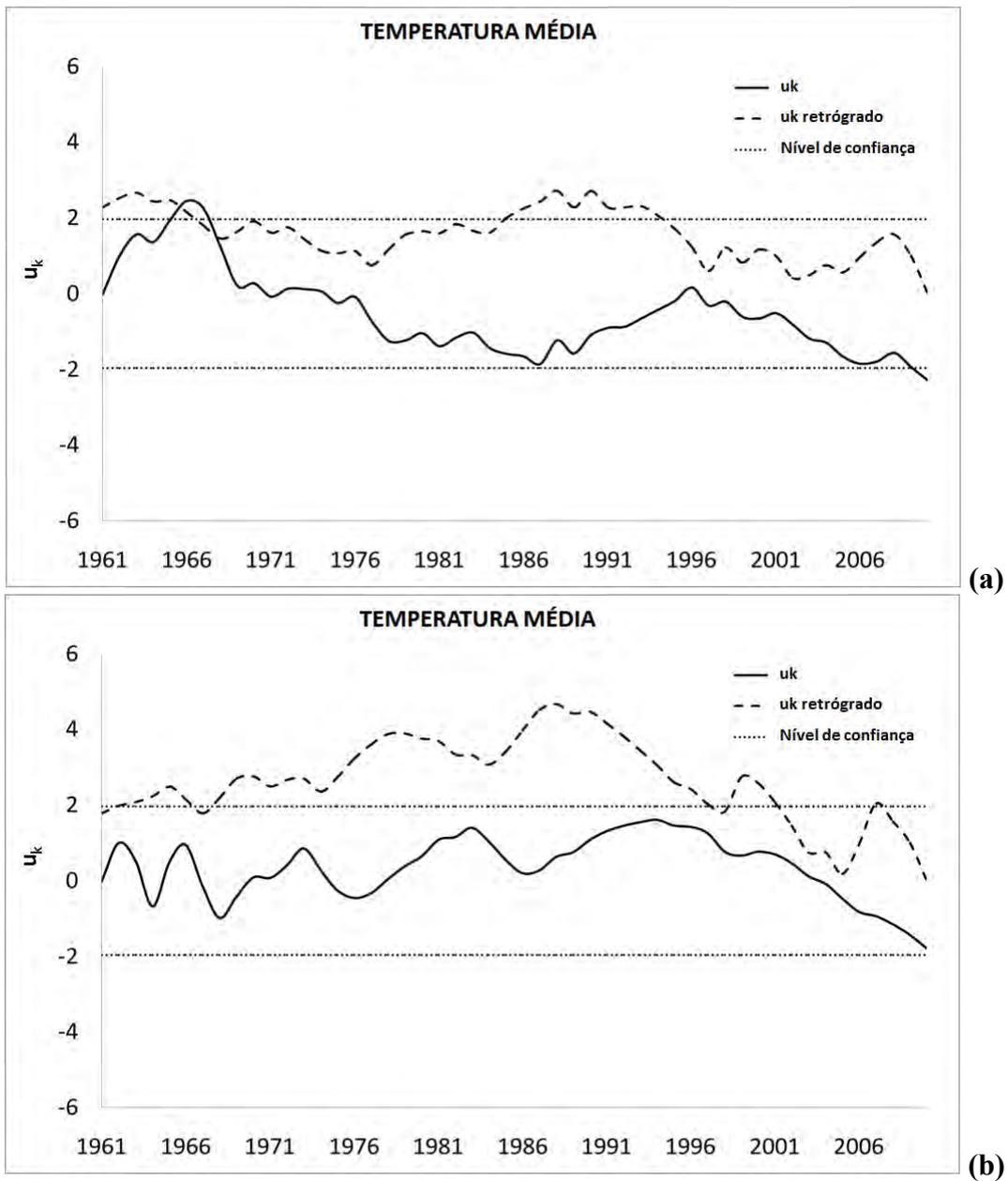


Figura 4.4 – Valores baseados no teste seqüencial de Mann-Kendall para a variável temperatura média em (a) Manaus e (b) Belém entre os anos de 1961 e 2010.

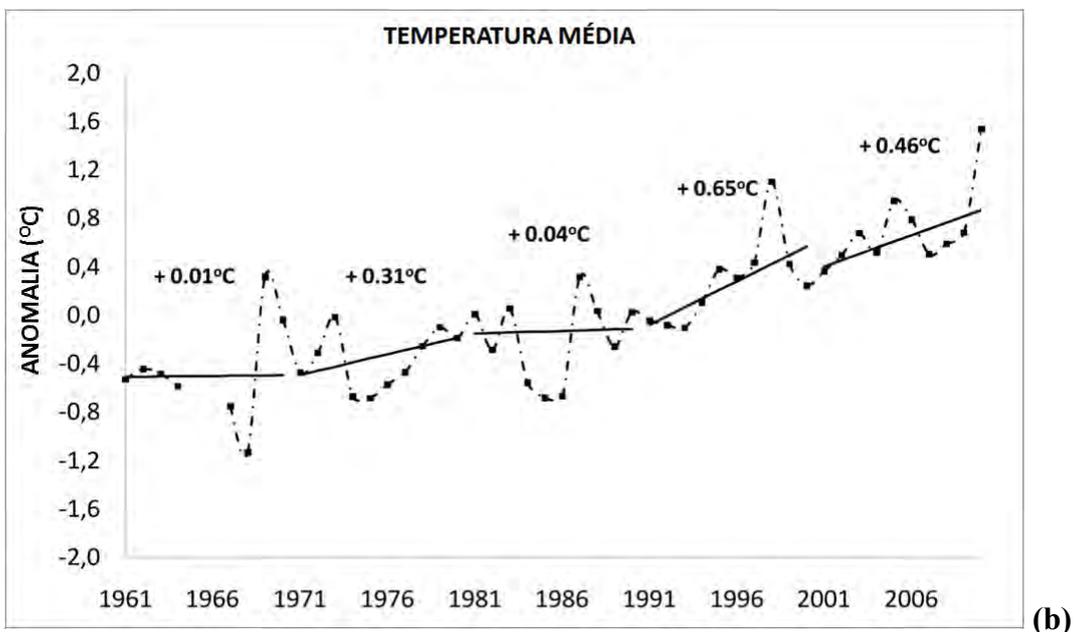
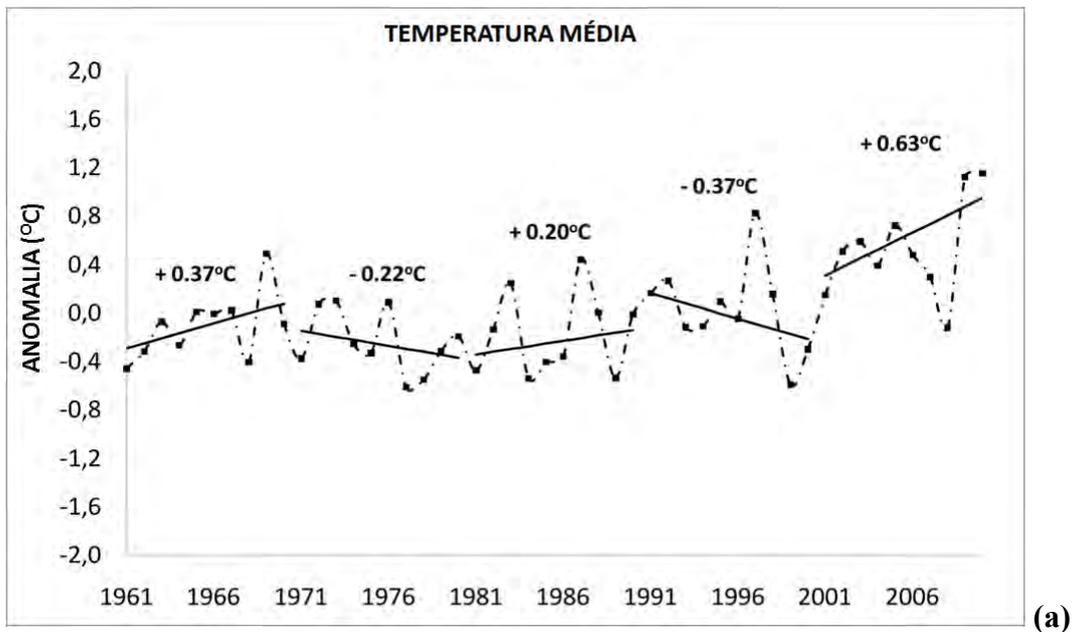


Figura 4.5 – Anomalias e tendências de temperatura média observadas para cada década em (a) Manaus e (b) Belém entre os anos de 1961 e 2010.

As análises de temperatura também evidenciam que existe uma tendência de mudança do microclima da cidade de Manaus nos últimos 50 anos. O resultado do teste seqüencial de Mann-Kendall para a temperatura mínima (Figura 4.7a) mostra um período em que a curva direta (u_k) apresenta uma ascensão entre 1961 até 1967, onde a partir deste ano observa-se uma queda até o ponto de inversão em 1984 (La Niña). Observa-se que as curvas se cruzam em 1992, ano em que foi observado um evento de

El Niño forte, e a partir de 1997 (El Niño) a curva direta (u_k) apresenta uma tendência de queda e estas voltam a se cruzar em 2000, ano em que se observou um evento de La Niña moderado. As mudanças no microlima de Manaus, evidenciado a partir da análise das variáveis de temperatura, podem estar relacionadas com o crescimento urbano, pois um dos fatores está relacionado ao resultado obtido no teste seqüencial de Mann-Kendall para estas duas variáveis (Figura 4.7), não indicando nenhuma mudança abrupta de comportamento que justifique as tendências observadas.

Analisando-se o comportamento das temperaturas máxima e mínima para as cinco décadas consideradas, nota-se que para a temperatura máxima (Figura 4.8a) as duas últimas décadas foram as que apresentaram as maiores tendências de aquecimento, mas sem significância estatística comprovada pelo teste de Mann-Kendall. Já o comportamento das anomalias de temperatura mínima nas diferentes décadas (Figura 4.8b) apresenta um comportamento distinto do observado para a temperatura máxima, com tendência positiva estatisticamente significativa ao nível de 95% na década de 1961-1970, com valores de $0,92 \pm 0,31^\circ\text{C}$.

Os dados de temperatura máxima em Belém mostram uma tendência de aquecimento de $0,93 \pm 0,28^\circ\text{C}$ (Figura 4.9a) entre os anos de 1961 e 2010. Para o mesmo período, uma tendência de aquecimento, de $1,57 \pm 0,47^\circ\text{C}$ nos últimos 50 anos, também é observada para os dados de temperatura mínima (Figura 4.9b). Os valores observados mostram uma forte tendência de aquecimento em Belém, com significância estatística de 99% para as duas variáveis citadas, o que possivelmente está diretamente relacionado com o fenômeno de urbanização e seus efeitos sobre o microclima. Neste caso, os efeitos da urbanização podem ser relevantes, pois o teste seqüencial de Mann-Kendall aplicado para as temperaturas máxima e mínima (Figura 4.10a e 4.10b) não mostrou comportamento que evidencie uma característica de mudança abrupta no comportamento das curvas que suporte as tendências observadas e que possam estar relacionadas a uma mudança no clima em escala regional ou global.

Os resultados do teste seqüencial de Mann-Kendall para temperatura máxima mostra alguns pontos em que as duas curvas se cruzam. Em todos os anos em que as duas curvas se cruzaram (1965, 1969, 1982, 1998 e 2004), foram anos de eventos de El Niño de intensidade moderada e forte. Estes resultados evidenciam a grande influência dos eventos relacionados à TSM do Pacífico sobre o clima da região amazônica, cujos

mecanismos foram descritos anteriormente.

Da análise do comportamento das tendências para períodos decadais considerando-se os 50 anos de observações, nota-se que tanto para a temperatura máxima quanto para a mínima em Belém (Figura 4.11a e 4.11b) existe uma forte tendência de aquecimento nas duas últimas décadas, sendo que para a temperatura mínima as tendências de aquecimento de $0,53 \pm 0,18^{\circ}\text{C}$ na década de 1991-2000 e de $0,66 \pm 0,22^{\circ}\text{C}$ na década de 2001-2010 apresentam significância estatística de 99%.

Oliveira et al. (2006) destacaram que no estudo de Molion (2004) salientou-se que nos próximos 20 ou 30 anos existiria uma tendência negativa nas temperaturas, visto que desde 1999 estava-se em uma fase fria da ODP. Os resultados do presente estudo mostram que entre 2001 e 2010 em Manaus e Belém houve uma tendência positiva para as temperaturas média e mínima, indicando que, possivelmente, o processo de urbanização, diretamente relacionado com o fenômeno ICU e seus efeitos, apresenta grande influência sobre estas variáveis.

Outra informação relevante está relacionada com as tendências observadas de temperatura máxima nas duas cidades. Uma intensa anomalia positiva fica evidente no ano de 2005, ano no qual foi observado uma das maiores secas da história na região amazônica. Segundo Marengo et al (2008), esta seca foi a maior nos últimos 100 anos e esteve relacionada diretamente com anomalias positivas de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) na região norte equatorial, enfraquecimento dos ventos alísios de nordeste e enfraquecimento dos movimentos ascendentes sobre a porção sul da região amazônica, resultando em baixa atividade convectiva. Desta forma, com condições atmosféricas alteradas, tanto na porção nordeste, devido ao enfraquecimento dos alísios, quanto na porção central, devido aos fatores somados, afetaram a atividade convectiva alterando de forma significativa o balanço de energia em superfície.

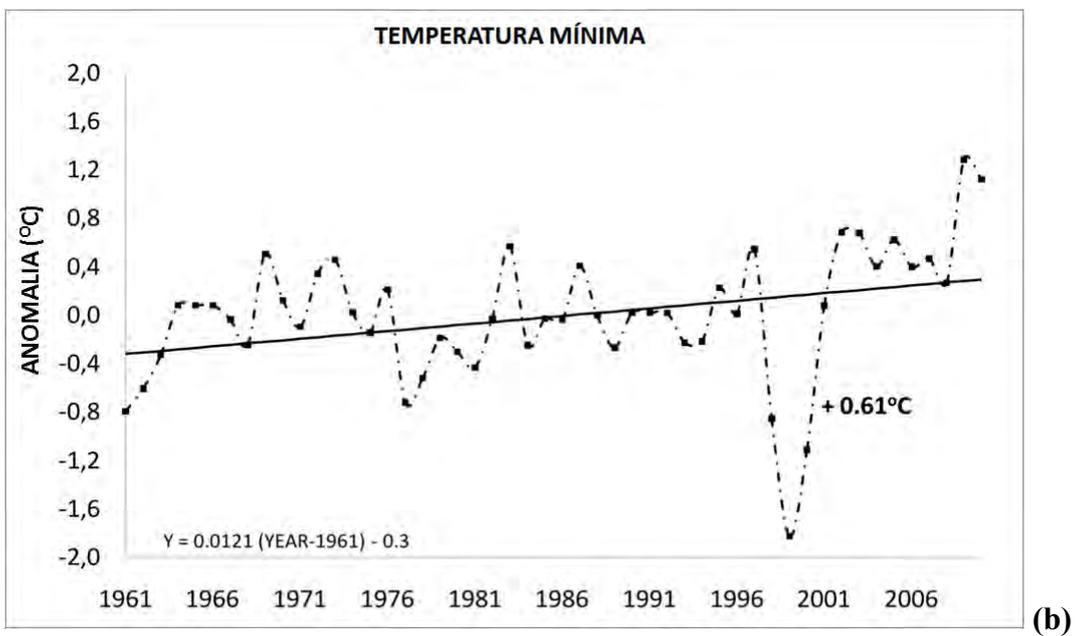
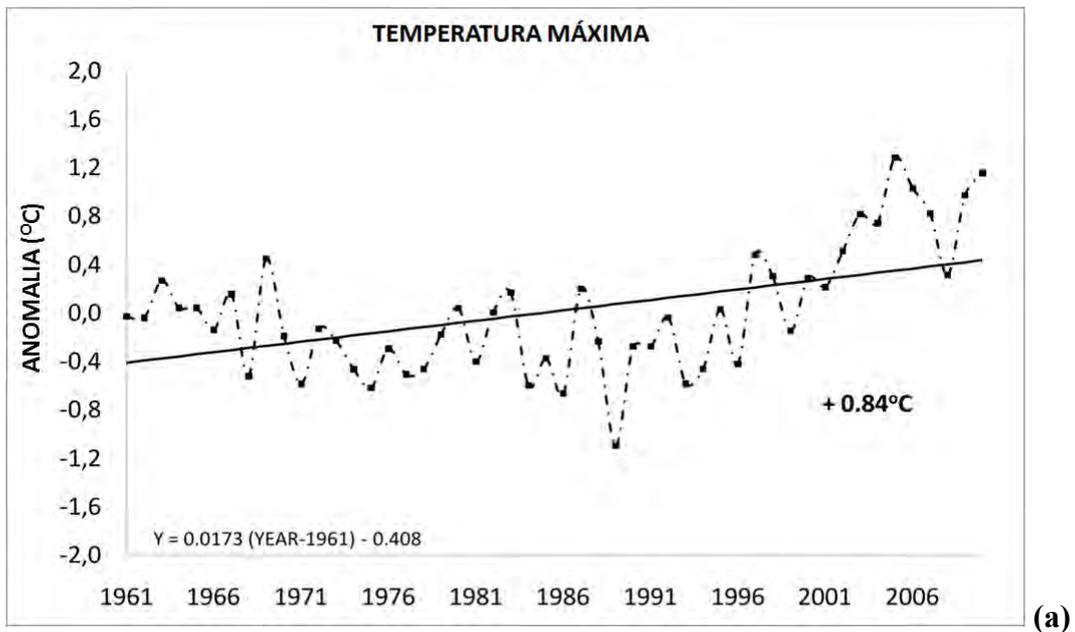


Figura 4.6 – Anomalias e tendências observadas em Manaus para a variável temperatura (a) máxima e (b) mínima entre os anos de 1961 e 2008.

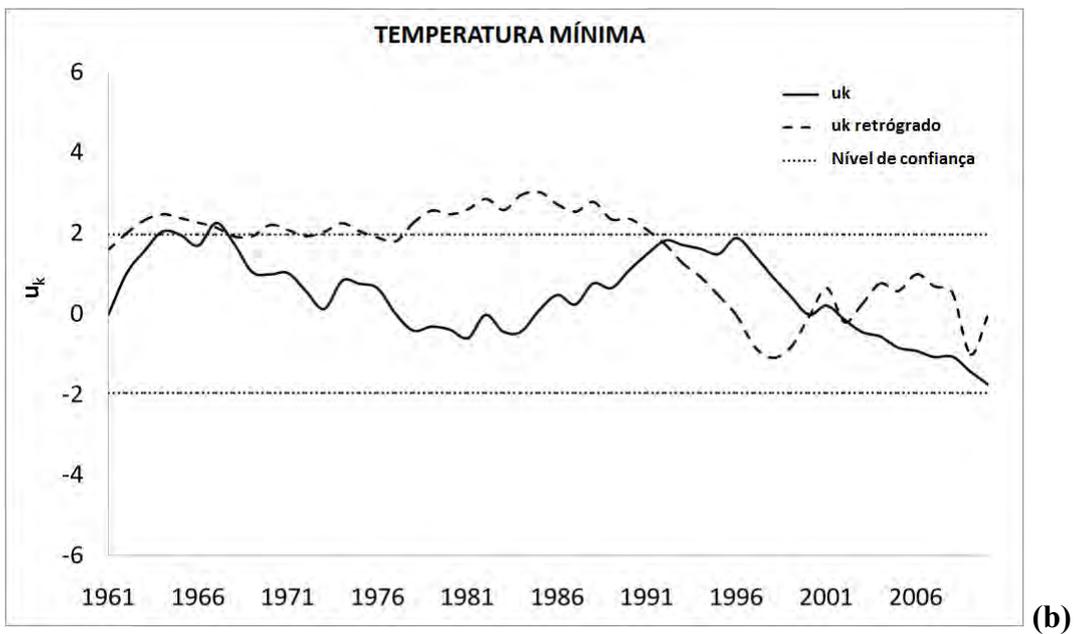
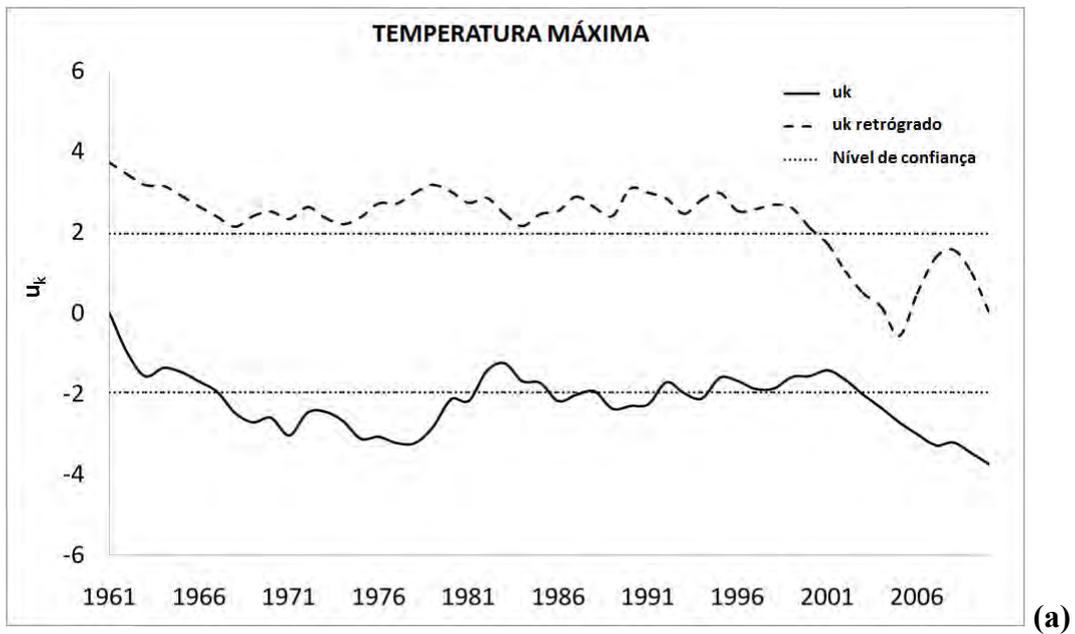


Figura 4.7 – Valores baseados no teste seqüencial de Mann-Kendall para a variável temperatura (a) máxima e (b) mínima em Manaus entre os anos de 1961 e 2008.

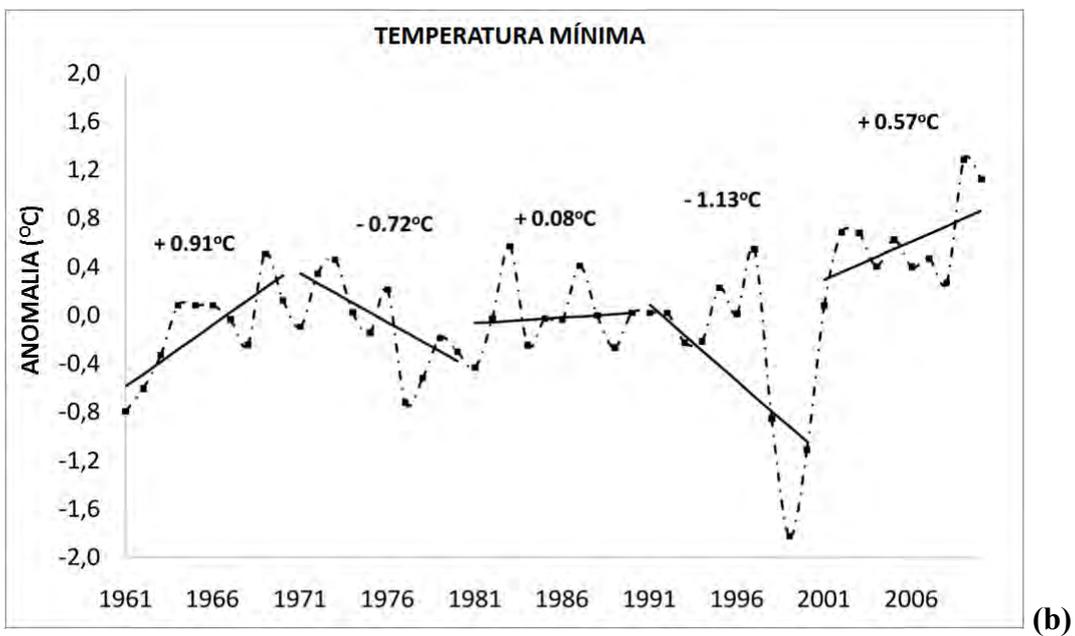
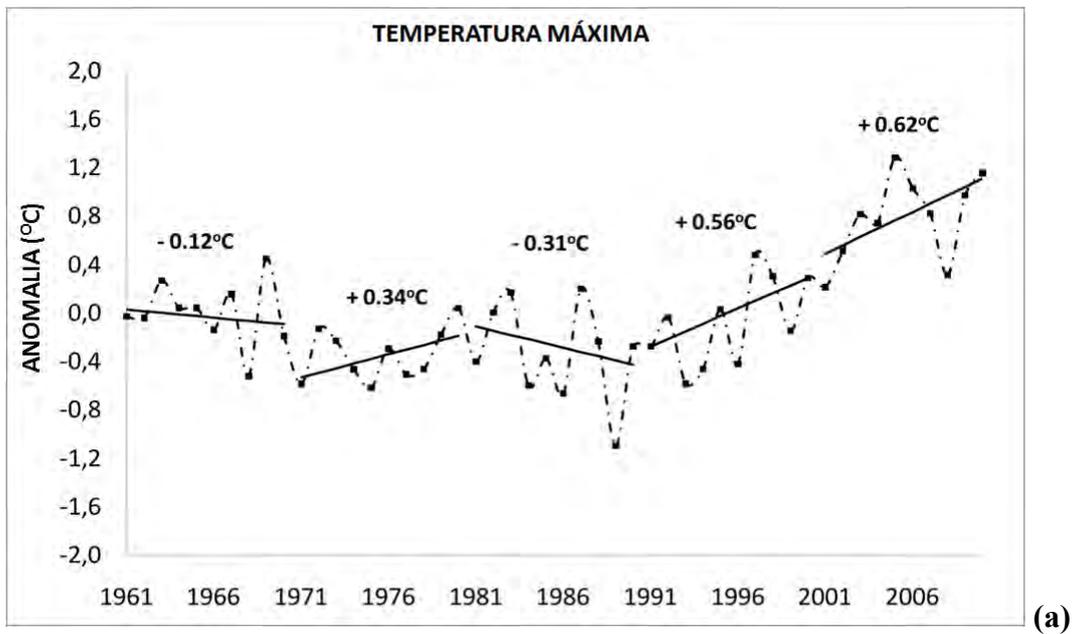


Figura 4.8 – Anomalias e tendências de temperaturas médias observadas para cada década para as variáveis (a) Temperatura máxima e (b) mínima em Manaus entre os anos de 1961 e 2010.

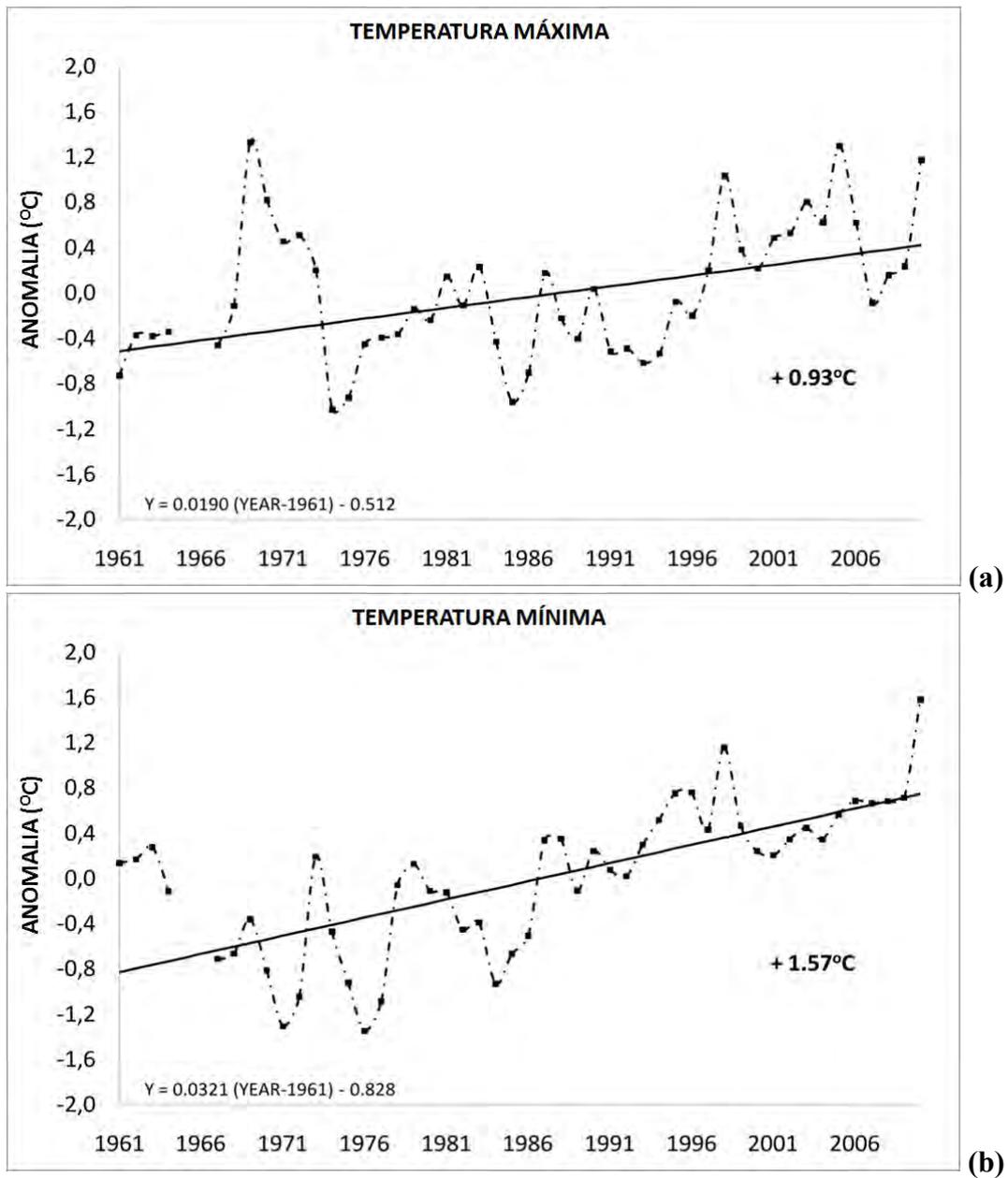


Figura 4.9 – Anomalias e tendências observadas em Belém para a variável temperatura (a) máxima e (b) mínima entre os anos de 1961 e 2010.

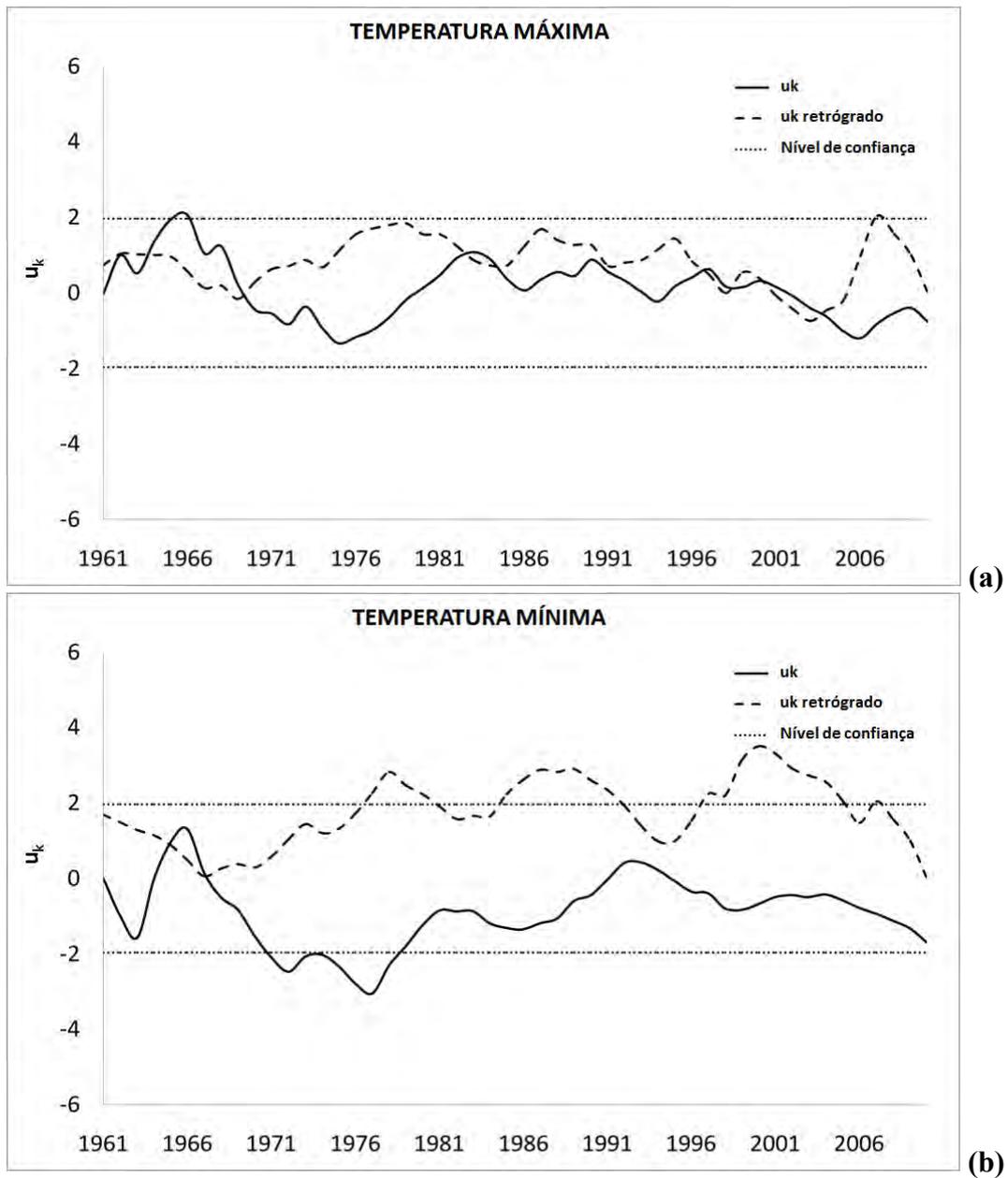


Figura 4.10 – Valores baseados no teste seqüencial de Mann-Kendall para a variável temperatura (a) máxima e (b) mínima em Belém entre os anos de 1961 e 2008.

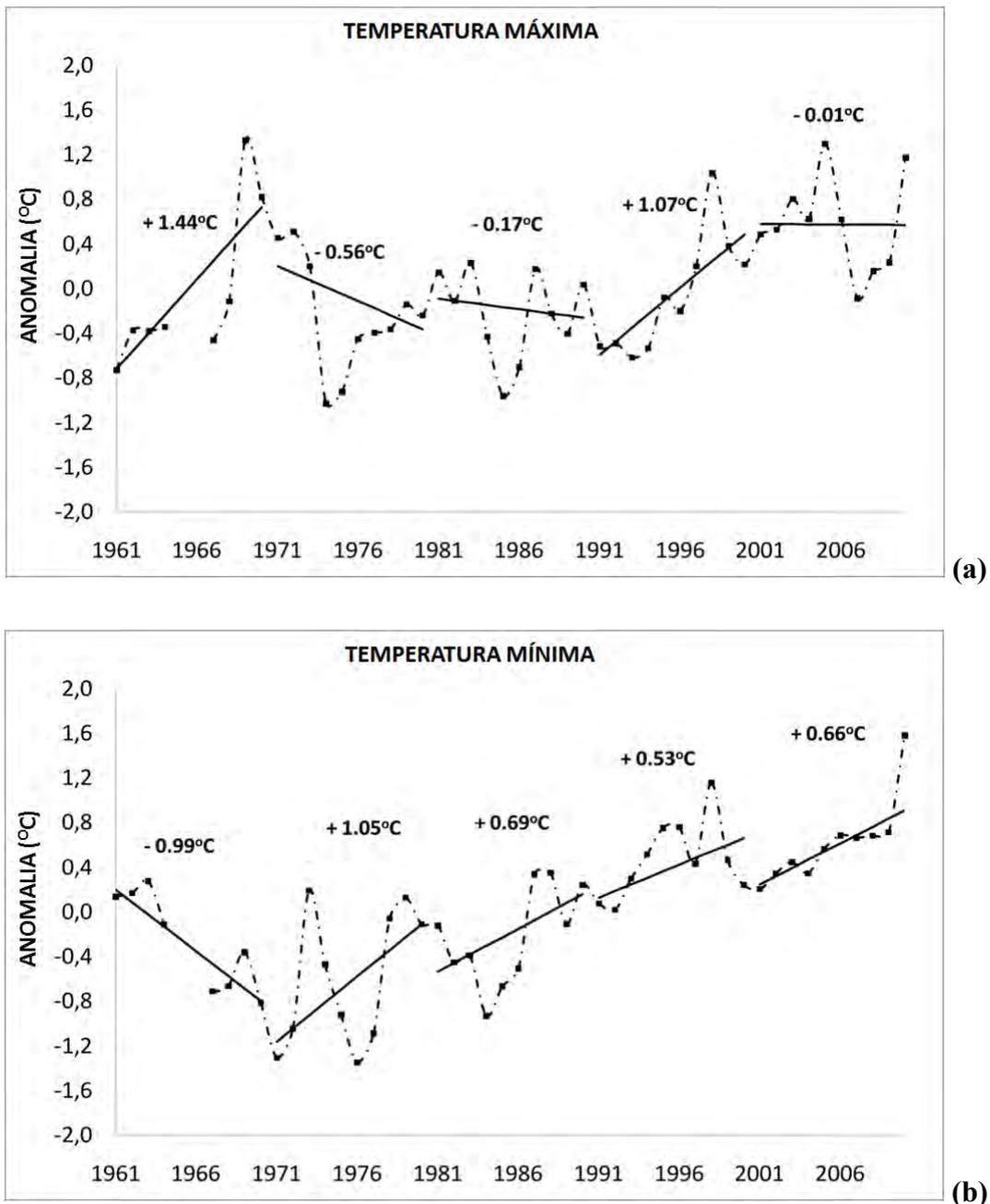


Figura 4.11 – Anomalias e tendências de temperaturas média observadas para cada década para as variáveis (a) Temperatura máxima e (b) mínima em Belém entre os anos de 1961 e 2010.

Para completar parte da análise das influências da urbanização sobre o microclima de Manaus e Belém, também foram analisadas as anomalias de precipitação acumulada anual para todo o período (1961-2010), assim como para os períodos decadais, similar ao realizado para as variáveis de temperatura. Para os dados de Manaus, diferente do que encontrado para as demais variáveis, a precipitação apresenta uma tendência de diminuição, sem significância estatística comprovada pelo teste de Mann-Kendall, de -

42,86 ± 12,75 mm para todo o período (Figura 4.12a); entretanto, para as duas últimas décadas, 1991-2000 e 2001-2010, observou-se uma tendência de aumento na precipitação de 359,91 ± 121,07 mm e de 671,45 mm ± 225,88 mm, respectivamente, salientando que a tendência observada para a década de 1991-2000 apresenta significância estatística de 90%.

Os dados observados em Belém apresentam uma tendência de aumento na precipitação acumulada média anual, com um valor positivo de 426,69 ± 126,94 mm e significância estatística de 95% entre o período de 1961 e 2010 (Figura 4.12b). Diferente do observado para Manaus, quando analisada a variabilidade decadal, a precipitação na década de 1991-2000 apresentou tendência positiva, de 301,66 ± 101,5 mm, enquanto na década de 2001-2010 houve tendência de queda, com valor de -58,77 ± 19,80 mm, mas sem nenhuma significância estatística.

Quando analisados os resultados do teste seqüencial de Mann-Kendall para a precipitação observada nas cidades de Manaus e Belém (Figuras 4.13a e 4.13b), nota-se que, como observado para a temperatura, nenhum comportamento relacionado com alguma mudança abrupta justifica as tendências observadas. Desta forma, pode-se especular, com base nos valores apresentados, que possivelmente há um efeito da urbanização sobre o comportamento da precipitação nas duas cidades estudadas. Neste contexto, os trabalhos de Rozoff et al. (2003) e de Han e Baik (2008) mostraram que a presença de áreas urbanas apresenta grande influência sobre o início e a intensidade de atividade convectiva e conseqüente precipitação. Os autores atribuem que o aumento da atividade convectiva sobre áreas urbanas deve-se primordialmente à intensificação da convergência sobre a cidade, o que intensifica o movimento vertical, principalmente devido à formação de uma circulação da ICU.

Assim sendo, pode-se concluir que possivelmente o comportamento das variáveis analisadas neste trabalho esteja mais associado com a variabilidade climática como, por exemplo, eventos de El Niño, do que com mudanças climáticas globais e regionais. Mesmo assim, as tendências de aquecimento e de aumento nas taxas de precipitação observadas podem estar diretamente relacionadas com o crescimento urbano, evidenciando assim o efeito das ICUs das cidades de Manaus e Belém sobre seus microclimas.

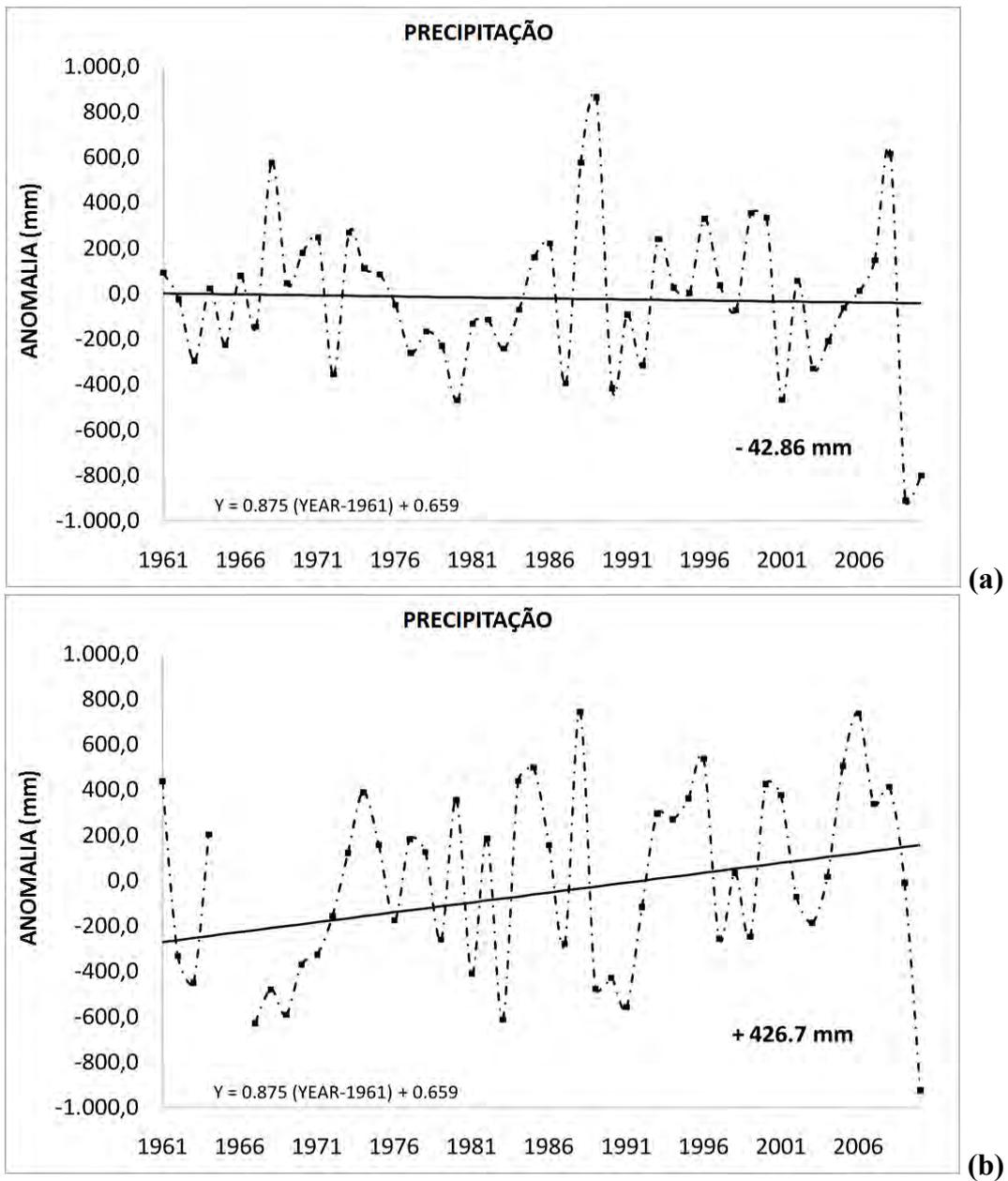


Figura 4.12 – Anomalias e tendências observadas para a variável precipitação acumulada média anual em (a) Manaus e (b) Belém entre os anos de 1961 e 2008.

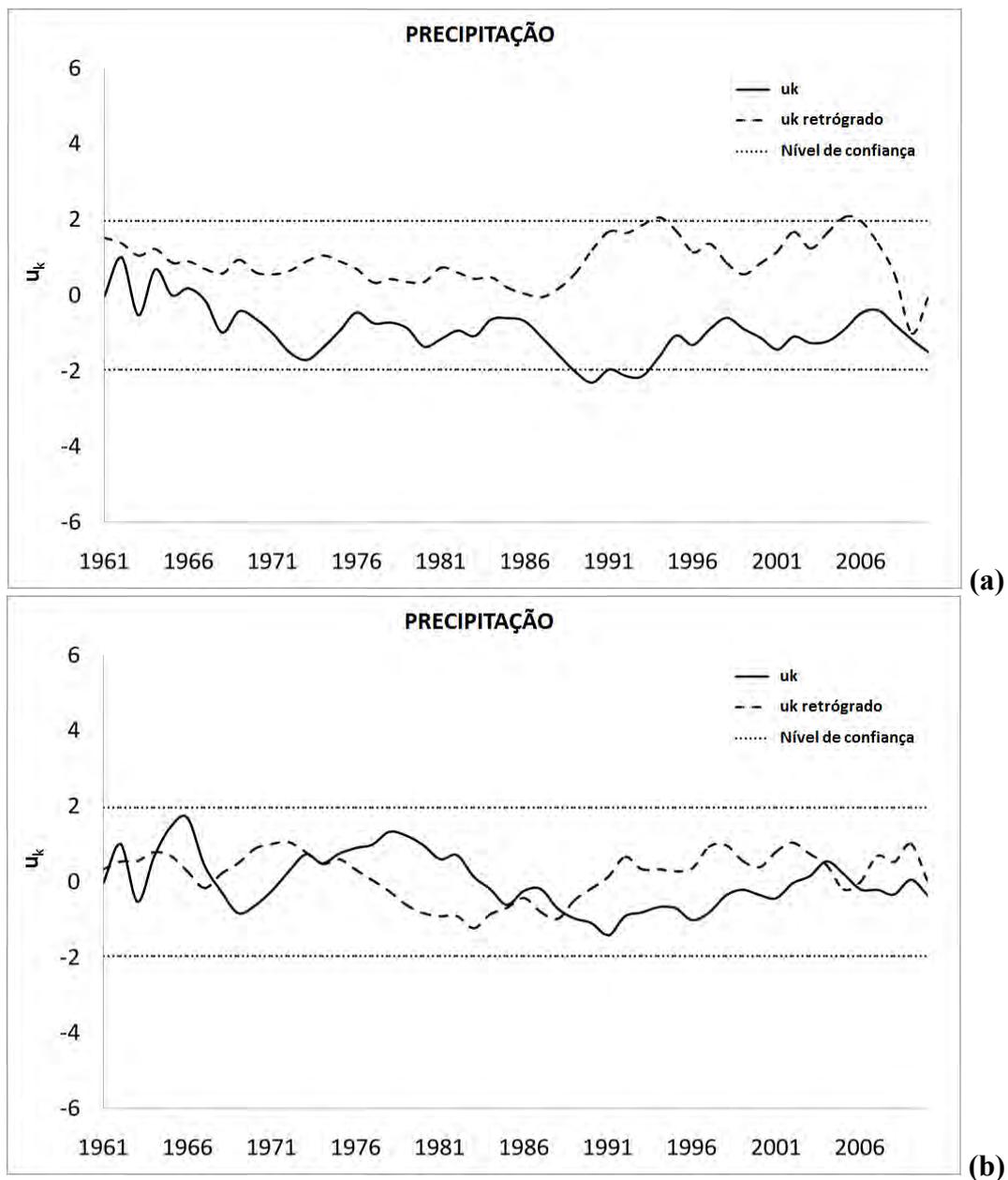


Figura 4.13 – Valores baseados no teste seqüencial de Mann-Kendall para a variável precipitação acumulada média anual em (a) Manaus e (b) Belém entre os anos de 1961 e 2008.

Ainda no escopo da análise da evolução do microclima das cidades de Manaus e Belém e com o objetivo de identificar possíveis influências de grande escala que justifiquem as tendências positivas de aquecimento e de precipitação, principalmente nas duas últimas décadas (Figura 4.14a e 4.14b), foram analisadas as anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) para todas as décadas analisadas (Figura 4.15), com base na média observada para todo o período (1961-2010).

Marengo (1992) e Uvo et al. (1998) mostraram que a variabilidade das anomalias de TSM no Pacífico tropical é responsável por menos de 40% da variabilidade de precipitação na Bacia Amazônica. Sugeriram que outras fontes de variabilidade, como gradientes meridionais do Atlântico Intertropical (os quais afetam de forma significativa as partes norte e central da Amazônia) ou processos de superfície também podem influenciar a variabilidade da precipitação nesta região. Estes efeitos na variabilidade estão diretamente associados com mudanças no padrão de circulação sobre a América do Sul, influenciando de forma significativa na atividade convectiva sobre a região amazônica.

Observando as anomalias de TSM e relacionando-as com os valores de tendências encontrados para as variáveis analisadas, nota-se que, principalmente nas duas últimas décadas, existe um padrão oposto no comportamento das anomalias de TSM e tendências. Para a década de 1991-2000 nota-se um padrão anômalo negativo com significância estatística de 95%, indicando assim que as águas do Pacífico tropical estão mais quentes que o normal. Desta forma, poderíamos esperar que a atividade convectiva sobre a região amazônica estivesse abaixo do normal, mas os dados observados para as cidades de Manaus e Belém mostram uma anomalia positiva que indica o aumento de precipitação nesta década (Figura 4.32). Para a década de 2001-2010 observa-se um padrão de aquecimento do Atlântico Norte, com alta significância estatística, o que de certa forma, como observado por Marengo et al. (2008), influencia de forma significativa a precipitação sobre a região amazônica de forma negativa, levando a uma diminuição nas taxas observadas, principalmente sobre a porção sul e central da região. De modo geral, observou-se padrão de diminuição da precipitação em Manaus e um aumento nas taxas observadas em Belém. Possivelmente o padrão divergente gerado sobre a parte central e sul da região intensifique a convergência em superfície sobre a porção leste, possibilitando assim uma maior atividade convectiva e consequente aumento na precipitação.

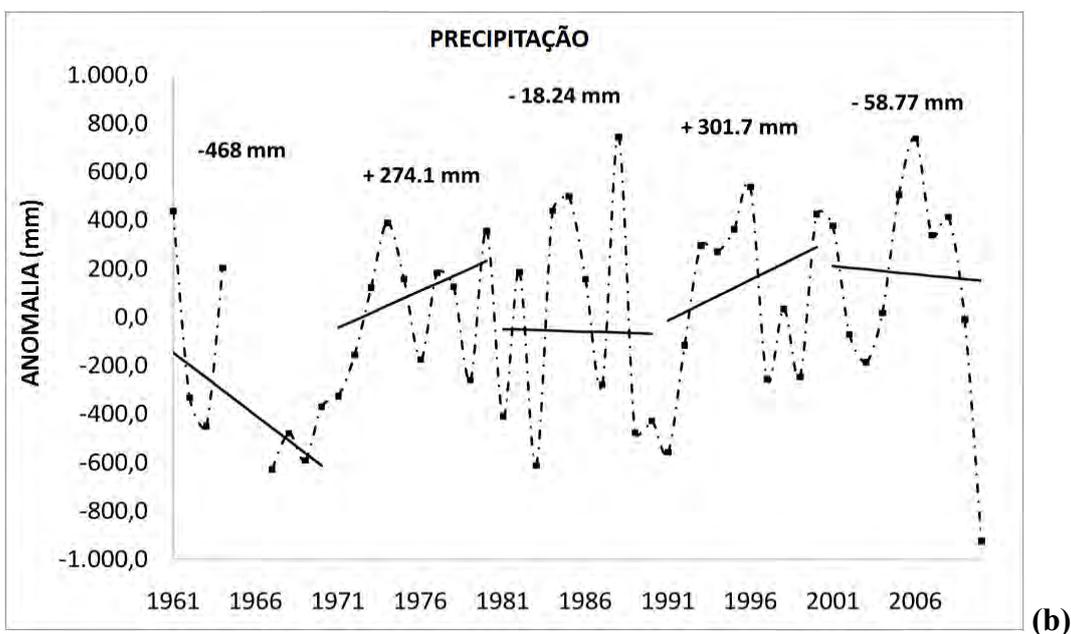
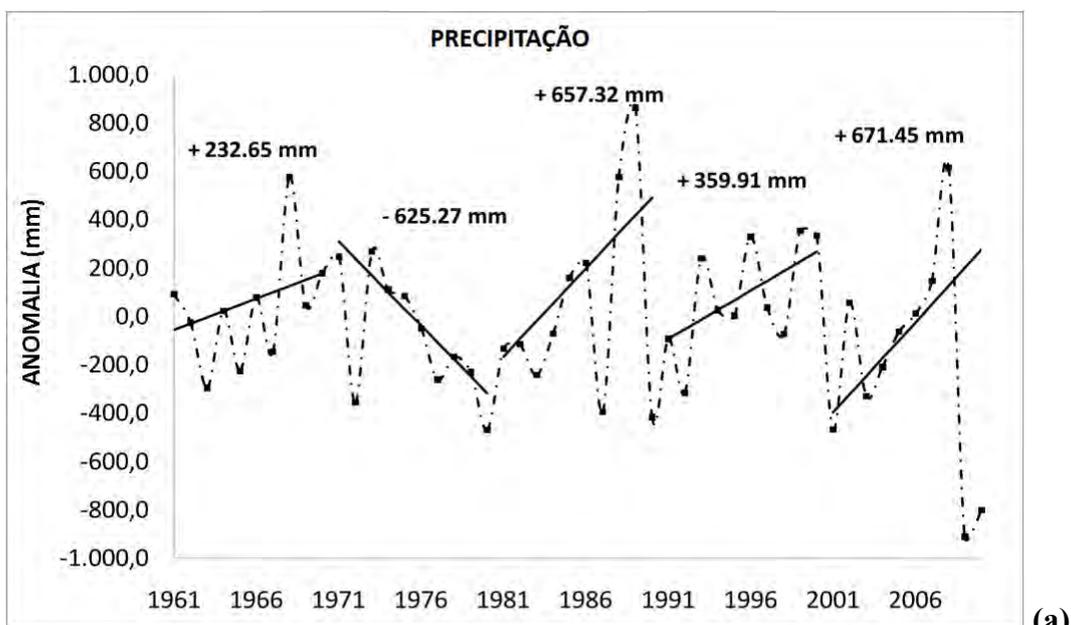
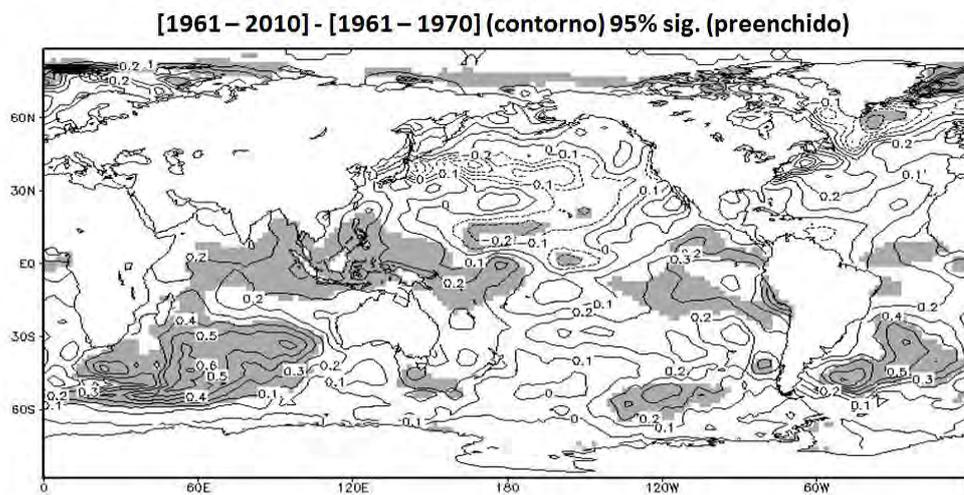
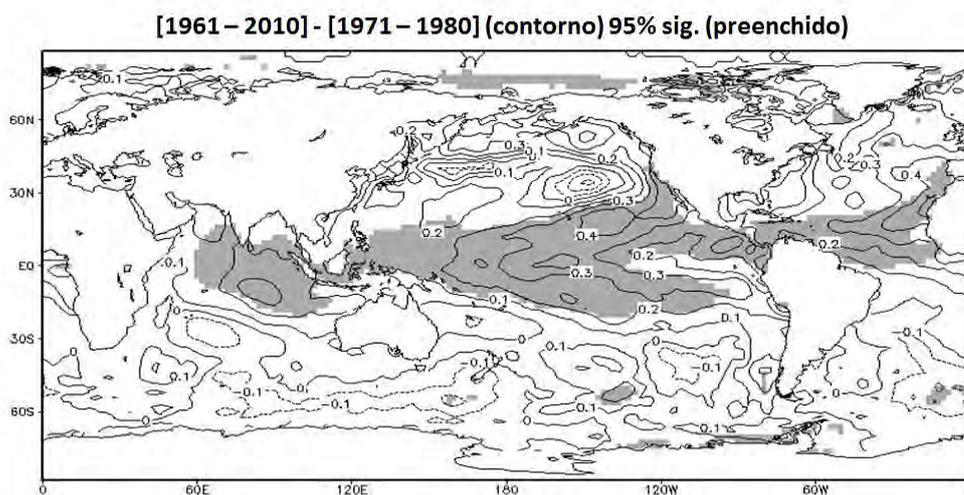


Figura 4.14 – Anomalias e tendências de precipitação observada para cada década para as cidades de (a) Manaus e (b) Belém entre os anos de 1961 e 2010.



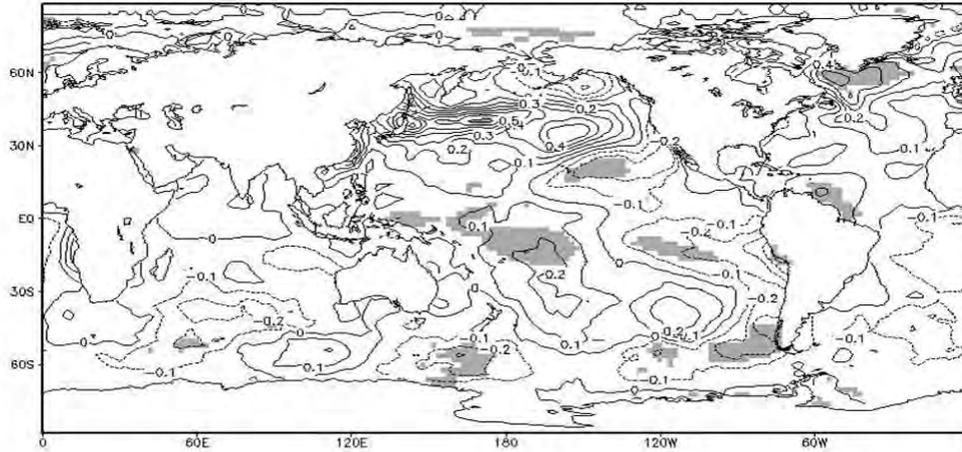
(a)



(b)

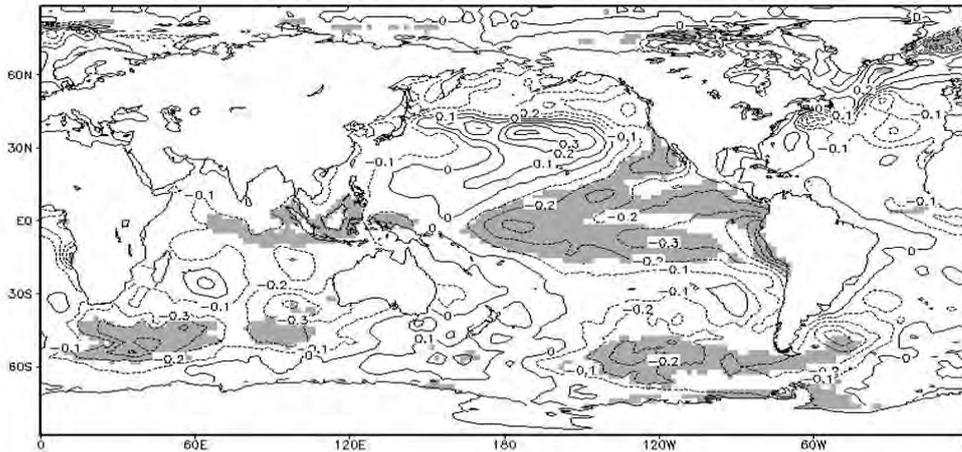
Figura 4.15 – Anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) (contorno) e sua significância estatística (sombreado) para o período de (a) 1961-1970, (b) 1971-1980. (continua)

[1961 – 2010] - [1981 – 1990] (contorno) 95% sig. (preenchido)



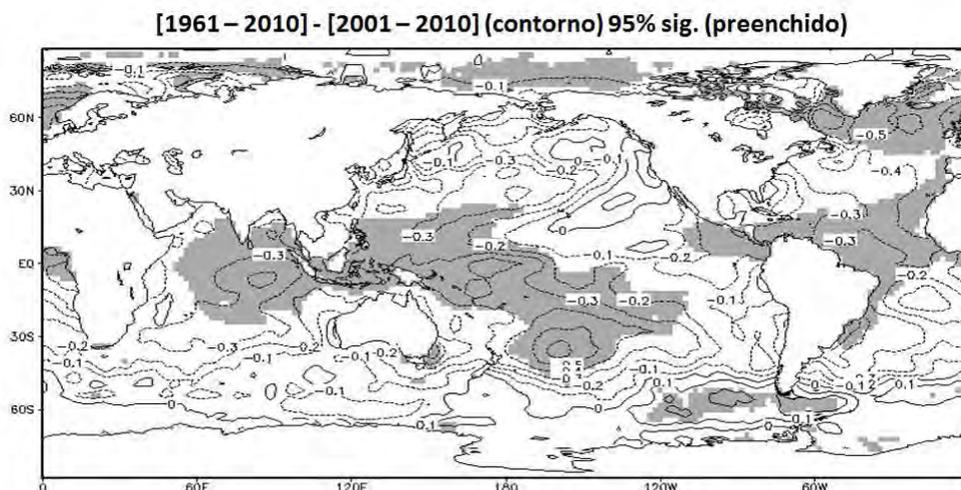
(c)

[1961 – 2010] - [1991 – 2000] (contorno) 95% sig. (preenchido)



(d)

Figura 4.15 – Continuação. (c) 1981-1990, (d) 1991-2000. (continua)



(e)

Figura 4.15 – Continuação. (e) 2001-2010.

Considerando que o aumento (diminuição) das taxas de precipitação está diretamente relacionado com a maior (menor) cobertura de nuvens e conseqüente diminuição (aumento) da radiação solar incidente e mudanças no BES, espera-se que, além de outros fatores, com o aumento da precipitação tenha-se uma diminuição da temperatura observada em superfície. Isto é correto para os valores observados para Manaus, mas discordante do observado para Belém, pois nota-se que as anomalias positivas de precipitação em Belém estão ocorrendo juntamente com anomalias positivas de temperatura. Este comportamento observado para Belém mostra que o aumento da temperatura em superfície apresenta uma relação direta com o aumento nas taxas de precipitação, pois se considerarmos o mesmo conteúdo de água em superfície, o aumento na temperatura irá gerar um aumento no fluxo de calor latente, disponibilizando assim maior quantidade de água para atmosfera, o que pode então influenciar na formação de sistemas precipitantes na região.

Os resultados apresentados mostram que as anomalias de temperatura e de precipitação observadas em Manaus e em Belém não são apenas influências das anomalias de TSM observadas tanto no Oceano Pacífico tropical quanto no Atlântico tropical, mas também podem estar associadas com processos de mudanças nos usos da terra como desflorestamento e crescimento de áreas urbanas. Marengo e Camargo (2008) analisando tendências de temperatura para a região sul do Brasil concluem que não

apenas influências remotas como anomalias de TSM influenciam as tendências observadas, mas também mudanças nos usos da terra como, por exemplo, urbanização.

Complementando a análise das tendências de temperatura e precipitação observadas nas cidades de Manaus e Belém, foi realizada uma análise dos extremos relacionados com os valores de temperatura diária observada para as duas cidades, seguindo a metodologia utilizada em Vicent et al. (2005), descrito mais detalhadamente no capítulo de metodologia. Para uma melhor avaliação dos resultados, considerando que foram analisados os dados diários de temperatura máxima e mínima para o período de 1961 a 2010, foram desconsiderados os meses que apresentaram mais de 3 dias de falhas.

Os resultados obtidos para Manaus e Belém são apresentados nas Tabelas 4.3 e 4.4 respectivamente. Para os resultados obtidos com relação aos extremos, também foram calculadas as tendências através do método da curvatura Sen e sua significância através do teste de Mann-Kendall para todo o período de observação, assim como para os períodos seco e chuvoso. Na discussão destes resultados, apresentados nas Tabelas acima mencionadas, são apenas citados os índices que apresentaram significância estatística maior que 90%.

Com relação à análise anual, Manaus apresenta um aumento na temperatura dos dias mais quentes do ano (+0,95°C), concordando com os resultados das anomalias anuais apresentados anteriormente. Em contraste, Manaus apresenta uma diminuição na quantidade de dias quentes (-0,85%), dias frios (-0,32%) e de noites quentes (-0,67%), concordando com os resultados obtidos por Vicent et al. (2005) apenas com o aumento no número de dias quentes. Vale salientar que o conjunto de dados utilizado pelos autores é referente ao período de 1960-2000, enquanto que o utilizado no presente trabalho refere-se ao período de 1961-2010.

Quando analisado sazonalmente, os índices de extremos mostram que durante o período chuvoso há um aumento na temperatura dos dias mais quentes (+0,70°C), assim como um aumento na diferença entre as temperaturas máxima e mínima observadas anualmente (+1,21°C). Para a estação seca, ocorre uma diminuição tanto no número de dias quentes (-1,28%) como no número de noites quentes (-1%) e um aumento no número de noites frias (+0,87%).

Os resultados referentes ao aumento da temperatura dos dias mais quentes podem ter direta relação com o aumento da área urbana, e mudanças no BES, influenciando de forma direta o microclima local. Outro índice que possivelmente também é afetado pelo processo de urbanização é a diminuição de dias frios observados, possivelmente associado ao aquecimento urbano diurno, associado à formação da ICU de Manaus, e a diminuição de noites frias, que pode estar relacionada com a liberação de calor por fontes antropogênicas e também à capacidade térmica da superfície urbana, ambos os fatores também influenciando o BES.

Os índices observados para Belém também mostram a possível influência do crescimento urbano sobre o microclima local. Nesta discussão, assim como para Manaus, também só são apresentados os resultados com significância estatística maior que 90%.

Para o período anual, alguns índices mostraram-se consistentes com a suposição de uma mudança no microclima de Belém devido ao processo de urbanização, como o aumento na temperatura máxima diária anual (+1,23°C), um aumento na quantidade de dias quentes (+1,39%), aumento na temperatura das noites mais frias (+1,45°C) e um aumento na quantidade de noites frias (+2,81%) e noites quentes (+1,68%). Todos estes índices podem ser afetados pelos processos de urbanização através dos efeitos provocados pela presença e intensificação da ICU, como discutido anteriormente.

Assim como para Manaus, os resultados de quase todos os índices observados para Belém não estão de acordo com o trabalho de Vicent et al (2005), com apenas o aumento na temperatura dos dias mais quentes do ano e o aumento das noites quentes concordantes com os dos referidos autores. A discordância entre os valores obtidos no presente trabalho e aqueles observados por Vicent et al (2005) pode estar relacionada com: (i) o fato de que os autores encontraram que o aumento (diminuição) de noites quentes (frias) esteve mais presente nas estações localizadas junto a costa leste e oeste da América do Sul; (ii) o fato de que os autores encontraram pouca tendência significativa para os índices baseados nas observações de temperatura máxima.

Quando analisados o comportamento destes índices para as estações seca e chuvosa, nota-se que há uma tendência significativa maior que 90% para os mesmos índices do período anual, mostrando que os mesmos também apresentam efeitos da urbanização

em escala sazonal. Vale salientar também que a intensidade das tendências observadas para Belém são mais intensas e mais persistentes (persistência sazonal) do que observado para Manaus, o que de certa forma mostra que possivelmente há uma modificação mais expressiva no microclima de Belém, que pode apresentar-se como consequência do crescimento urbano, além de outros fatores.

Tabela 4.3 – Valores dos índices encontrados para a cidade de Manaus entre 1961 e 2010.

	ANUAL	1961-2010	CHUVOSO	1961-2010	SECO	1961-2010
Dia mais quente (°C)	38,30	+ 0,95	37,20	+ 0,70	38,30	+ 0,93
Dias quentes	8,55	- 0,85	8,80	- 0,14	8,30	- 1,28
Dias frios	9,43	- 0,32	9,46	0	9,40	0
Noite mais fria (°C)	12,10	0	14,30	0	12,10	+ 0,25
Noites frias	8,53	- 0,84	8,44	- 0,13	8,62	+ 0,87
Noites quentes	8,38	- 0,67	8,31	0	8,45	- 1,00
Varição diurna de temperatura (DTR) (°C)	8,46	+ 0,62	7,69	+ 0,41	9,22	+ 0,08
Varição extrema de DTR (°C)	21,20	+ 0,78	18,90	+ 1,21	21,20	+ 0,58

Tabela 4.4 – Valores dos índices encontrados para a cidade de Belém entre 1961 e 2010.

	ANUAL	1961-2010	CHUVOSO	1961-2010	SECO	1961-2010
Dia mais quente (°C)	37,30	+ 1,23	37,30	+ 0,63	36,70	+ 1,22
Dias quentes	7,80	+ 1,39	7,97	+ 1,31	7,63	+ 1,34
Dias frios	8,62	+ 1,23	9,16	+ 0,59	8,08	+ 1,71
Noite mais fria (°C)	18,50	+ 1,45	18,80	+ 1,83	18,50	+ 1,34
Noites frias	7,52	+ 2,81	7,54	+ 3,04	7,51	+ 3,43
Noites quentes	7,64	+ 1,68	7,50	+ 2,52	7,78	+ 1,00
Varição diurna de temperatura (DTR) (°C)	9,27	- 0,39	8,50	- 0,33	10,04	- 0,63
Varição extrema de DTR (°C)	17,50	- 0,47	17,50	- 1,34	15,80	- 0,32

As possíveis conseqüências da intensa urbanização das cidades de Manaus e Belém sobre seus microclimas foram avaliadas considerando-se também a metodologia proposta por Kalnay e Cai (2003), descrita no capítulo de metodologia. De uma forma geral, foram comparados os dados observacionais de superfície com dados do conjunto de reanálises NCEP-NCAR (NNR) de 50 anos. No conjunto de dados, as observações coletadas em superfície de temperatura, umidade e vento não são utilizadas. Desta forma, os dados de sondagens atmosféricas (radiossondagens e sondagens de satélite) utilizados no processo de criação deste conjunto influenciam de maneira significativa as reanálises e, assim, os valores estimados de temperatura na superfície são derivados de valores atmosféricos. Como resultado, os dados do conjunto NNR deveriam não ser

sensíveis à urbanização ou efeitos das mudanças nos usos da terra; entretanto, mostram as influências das mudanças climáticas observadas na atmosfera.

Assim sendo, foram utilizados os dados de temperaturas média, máxima e mínima diárias a 2 m obtidos do conjunto NNR e estes então comparados com os dados diários das mesmas variáveis coletadas nas cidades de Manaus e Belém, ambos os conjuntos para o período de 1961 a 2010. Considerando que o espaçamento horizontal dos dados NNR é de 2,5°, a estimativa da temperatura nos pontos centrais referentes às cidades de Manaus e Belém foi feita escolhendo-se 6 pontos de grade ao redor dos pontos referentes às cidades e, assim, feita uma média ponderada pela distância dos valores estimados no ponto de grade. Similar ao considerado para os conjuntos de observações de Manaus e Belém, foram calculadas as anomalias destas variáveis do conjunto NNR com relação à média de todo período. Em seguida, estas anomalias foram comparadas com as anomalias dos dados observados de Manaus e Belém, e estimadas as possíveis influências da urbanização sobre os microclimas locais. O cálculo das tendências foi realizado através do método da curvatura de Sen e sua significância através do teste de Mann-Kendall, com ambos os métodos aplicados ao conjunto NNR.

Como podem ser observados na Figura 4.16, os dados NNR conseguem de certa forma representar o comportamento anual dos dados de temperatura observados em Manaus. A correlação observada para o conjunto de dados de temperatura média diária entre os dados observacionais e o conjunto NNR foi de 0,54 para todo o período (1961-2010). Vale salientar que, a partir de 1979 dados obtidos de satélite foram incluídos nos conjuntos de reanálises, o que sensivelmente melhorou a representação da atmosfera nestes conjuntos. Desta forma, calculou-se a correlação para o período de 1981-2010, objetivando avaliar se houve melhoria na representação da temperatura média no conjunto NNR, a qual foi igual a 0,62. A correlação para as variáveis representantes dos extremos diários não é satisfatória, visto que esta, para o conjunto de dados de temperatura máxima do período de 1961-2010 (1981-2010) foi igual a 0,04 (0,06); enquanto que para os dados de temperatura mínima a correlação apresentou melhores resultados, embora ainda com valores baixos, iguais a 0,41 e 0,53 para o todo o período e entre 1981-2010, respectivamente.

Os dados de temperatura estimados para Belém através do conjunto de dados NNR (Figura 4.17) mostram melhor correlação com os dados observados se comparado aos

de Manaus. Para a temperatura média, a correlação para o período de 1961-2010 (1981-2010) é de 0,64 (0,79), mostrando que estes representam mais satisfatoriamente a variabilidade dos dados observados. Ressalta-se que os valores de correlação para os dados NNR de temperaturas máxima, igual a 0,38 para os períodos de 1961-2010 e 1981-2010, e mínima, igual a 0,41 para o período de 1961-2010 e de 0,50 para 1981-2010, ainda que tenham apresentado valores mais altos, não são considerados satisfatórios.

Na Figura 4.16 também se pode observar que existe uma tendência de elevação das temperaturas média, máxima e mínima estimadas pelo conjunto NNR para Manaus, assim como observado para os conjuntos de dados observados de superfície. Possivelmente esta tendência de aumento está relacionada com o processo de mudança climática global, pois se considera que este conjunto de dados não é sensível às mudanças dos usos da terra. Considerando que a tendência da diferença média diária para o período de 1961-2010 entre os dados NNR e a observação foi de 2,09°C (99% de significância estatística), pode-se atribuir que esta diferença está relacionada, além de outros fatores, com a urbanização e outros processos de mudanças nos usos da terra em Manaus. Logo, de modo geral foi possível quantificar e demonstrar que os processos de urbanização apresentam grande influência nas tendências de aumento da temperatura em Manaus e que contribuem para a mudança de seu microclima. Vale salientar que as diferenças observadas nas duas últimas décadas estiveram acima dos 2°C, evidenciando que a intensa urbanização e o crescimento da população neste período influenciaram de forma direta as tendências de aumento de temperatura em Manaus.

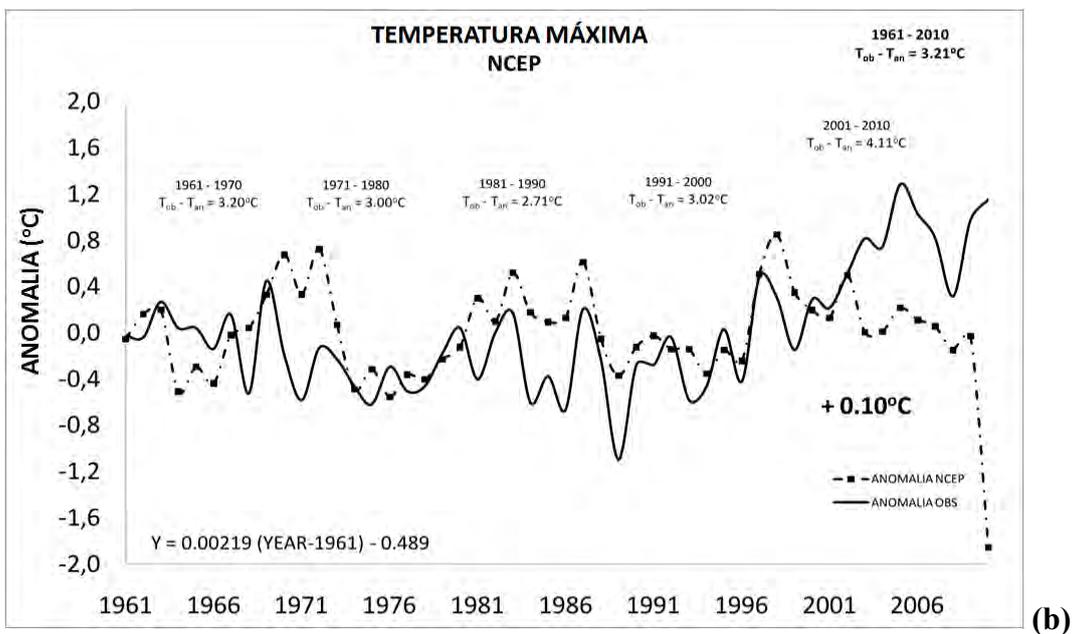
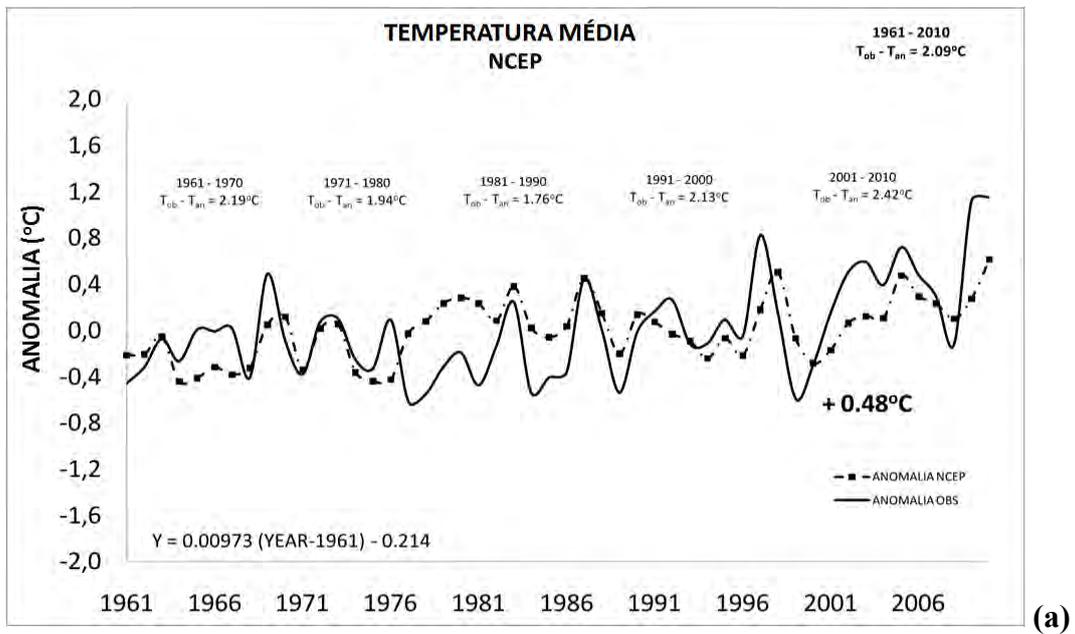


Figura 4.16 – Comparação entre os dados NNR e as observações de superfície em Manaus para a variável temperatura (a) média, (b) máxima. (continua)

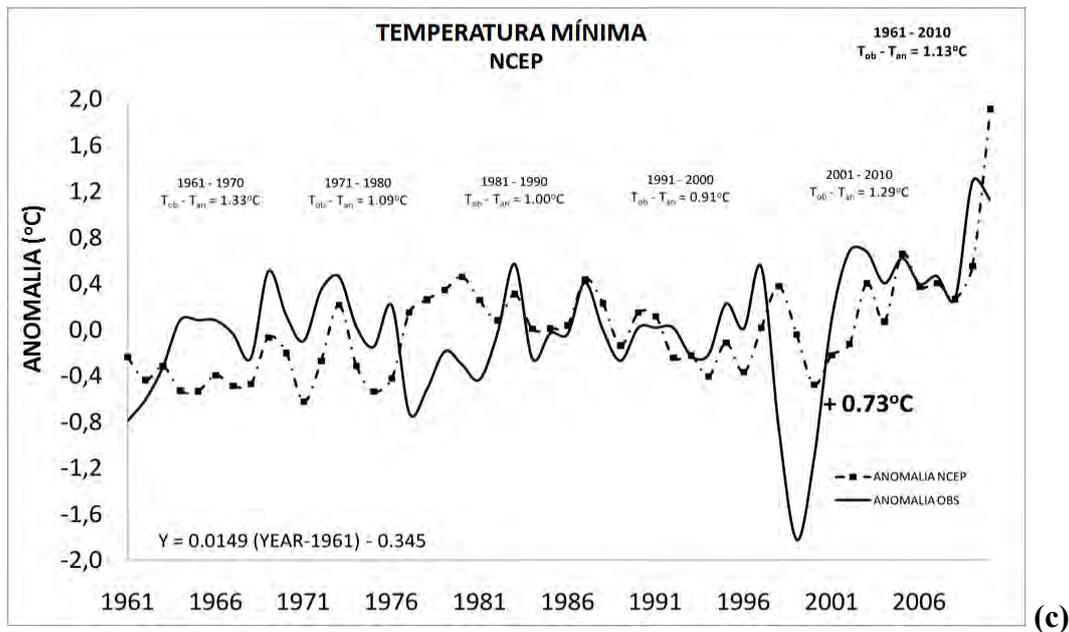


Figura 4.16 – Continuação. (c) mínima.

As análises realizadas para o conjunto de dados de temperatura mínima mostram uma tendência de elevação nos valores, indicando que existe uma tendência de aquecimento em Manaus também observado no conjunto de dados NNR. A diferença observada entre o conjunto de dados observacionais e NNR mostra uma pequena diferença ($1,13^{\circ}\text{C}$), indicando assim que esta variável não é muito sensível à mudanças nos usos da terra, como observado para temperatura média. Vale ressaltar que não são observadas grandes diferenças entre as décadas analisadas, corroborando para a hipótese de que a temperatura mínima não é a variável que possui maior influência dos processos de urbanização, além de outros fatores. Já os resultados obtidos para os dados de temperatura máxima mostram uma diferença de $3,21^{\circ}\text{C}$ entre os dados observados e o conjunto de reanálises, mostrando ser esta variável sensível às mudanças nos usos da terra.

Os resultados obtidos para a temperatura máxima indicam que possivelmente o fenômeno ICU de Manaus possui relação direta com o padrão observado. O aquecimento diurno, associado com as propriedades da superfície urbana e a liberação de calor por fontes antropogênicas, podem ser fatores os quais influenciam no aumento da temperatura máxima em área urbana. Nota-se também que a última década analisada (2001-2010) foi a que apresentou maior diferença, o que pode estar associado às mudanças nos usos da terra e processos intensos de urbanização observados também

para este período. Considerando que a temperatura mínima é observada geralmente no período noturno, esta não se mostra tão sensível às mudanças no BES, assim não apresentando grande influência do crescimento da área urbana de Manaus sobre o comportamento desta variável.

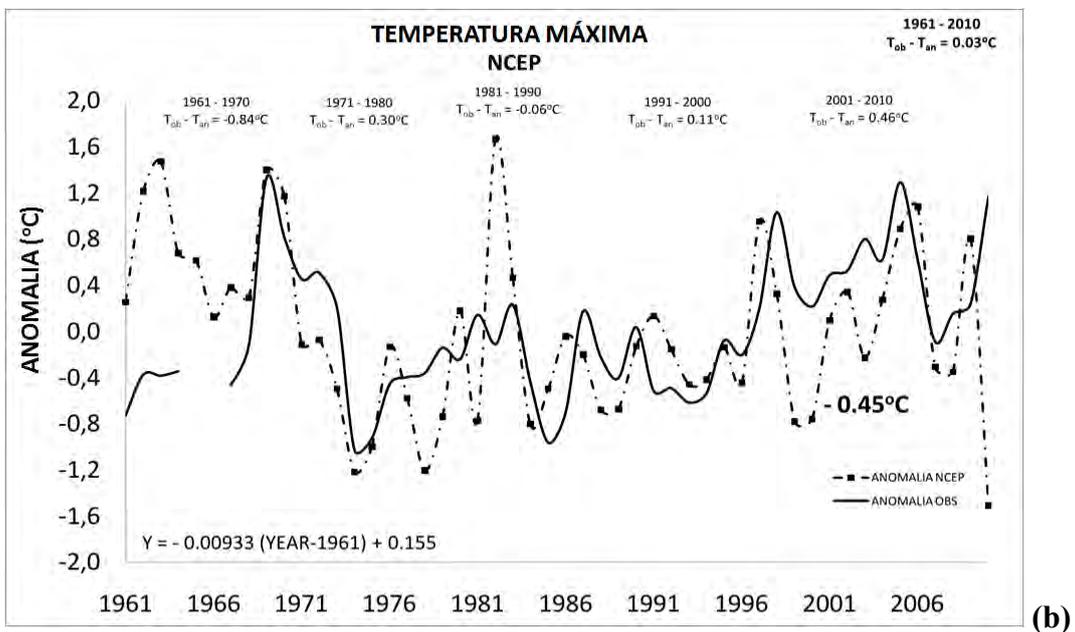
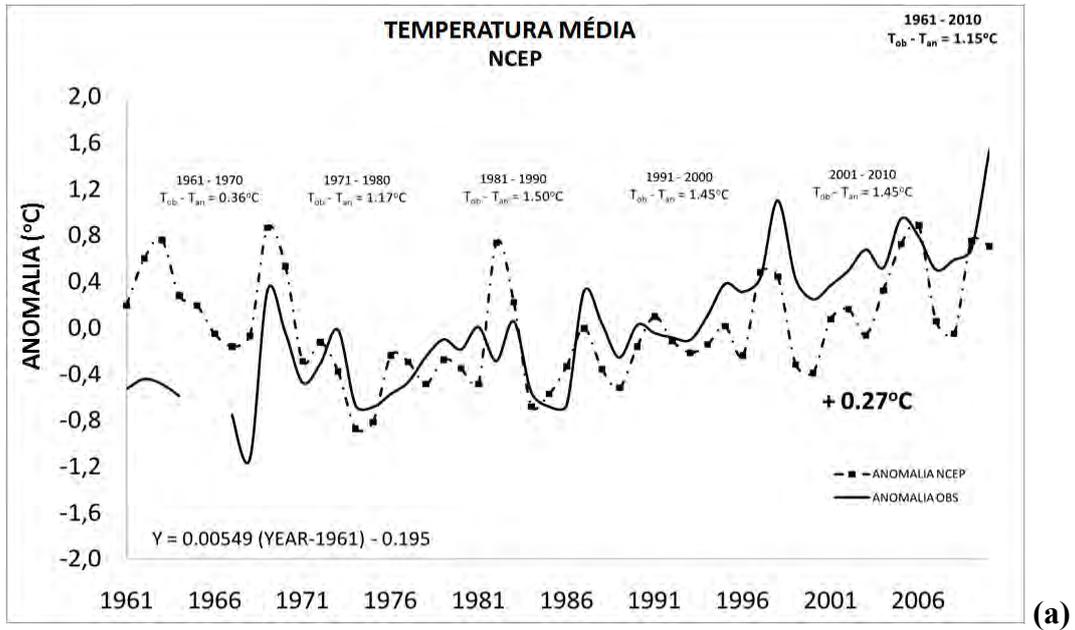


Figura 4.17 – Comparação entre os dados NNR e as observações de superfície em Belém para a variável temperatura (a) média, (b) máxima. (continua)

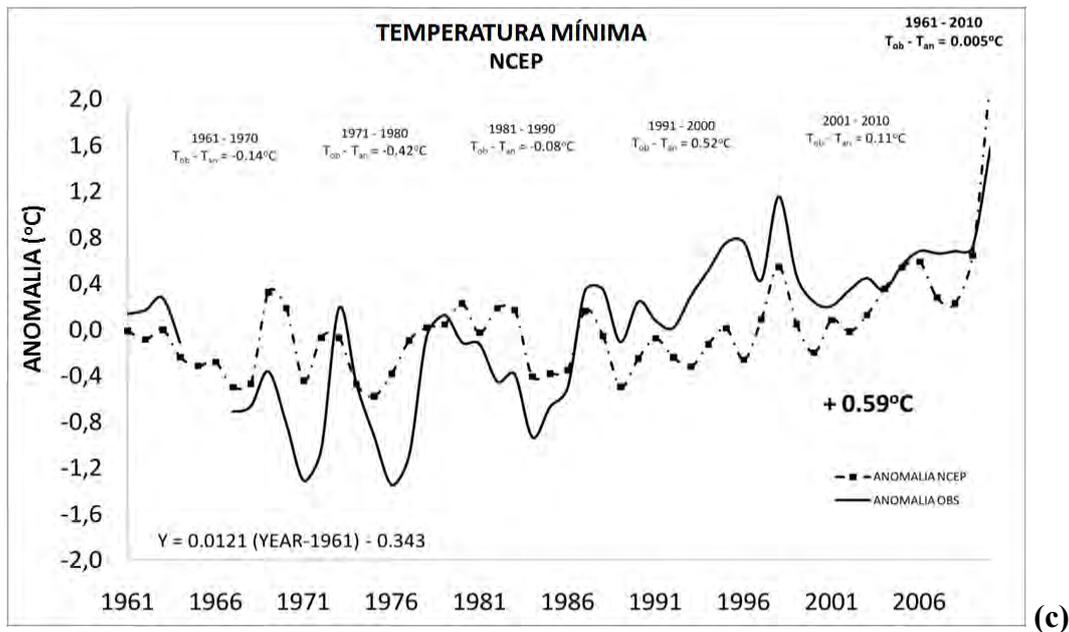


Figura 4.17 – Continuação. (c) mínima.

Assim como observado para Manaus, os dados de temperatura média estimados pelo NNR mostram que os processos de urbanização e mudanças nos usos da terra em Belém são um dos fatores responsáveis pela mudança de seu microclima, visto que a diferença calculada entre as reanálises e os dados observados para todo o período analisado foi de 1,15°C. Também se observa que nas duas últimas décadas, nas quais foram observadas as maiores mudanças de tamanho e população da cidade de Belém, a diferença de temperatura entre os dados NNR e observação foi de 1,45°C, mostrando assim os efeitos da ICU, intensificado por mudanças nos usos da terra em Belém, sobre seu microclima.

As diferenças entre os dados de reanálises e dados observados de temperaturas máxima e mínima em Belém (Figura 4.17) mostram um comportamento diferente do observado para Manaus. Neste contexto, os baixos valores da diferença mostram que este conjunto de dados não sofre influência das mudanças nos usos da terra no município analisado. Para a variável temperatura máxima, a maior diferença é observada no período de 1991-2000. Já para a temperatura mínima, a maior diferença é observada na última década analisada, entre 2001-2010. Estes resultados possivelmente estão relacionados ao processo de urbanização, mas também não se descarta outros processos de maior escala influenciando o comportamento destas variáveis. Vale ressaltar que tendência de elevação nos valores destas duas variáveis é observada para os conjuntos de dados

NNR, indicando assim uma possível influência de escalas regional ou global e mecanismos associados, como discutidos anteriormente.

4.3 Análise da ilha de calor urbana de Manaus

Hua et al (2008) mostraram que um método direto de investigar o efeito de ICU é analisando as diferenças, principalmente de temperatura e de umidade, entre a região de cidade e áreas rurais mais afastadas, muitas vezes pouco afetadas pela intensa urbanização. Assim, foram analisados os dados das estações localizadas em área urbana, estações do INMET e do aeroporto de Ponta Pelada (PP), e em área de floresta tropical, estação do Instituto de Pesquisas da Amazônia (INPA-ZF2).

Em uma primeira etapa, foram calculados os valores da IICU com relação aos valores diários das variáveis temperaturas média, mínima e máxima, e umidade relativa observada abaixo do dossel. A Tabela 4.5 apresenta as médias mensais da intensidade da ICU obtidas para o período de 2000 a 2008. Da análise geral dos valores apresentados na Tabela 4.5, nota-se que, com relação à temperatura média do ar em superfície, a cidade apresenta-se 1,74°C mais quente, com o mês de janeiro (setembro) apresentando os menores (maiores) valores de IICU (1,41°C e 2,12°C, respectivamente). Os valores de IICU para a temperatura máxima diária mostram uma área urbana ainda mais quente, tendo sido observadas diferenças de 2,98°C entre a cidade e a floresta e diferenças mínima (máxima) durante o mês de janeiro (outubro). O mesmo comportamento é observado para a temperatura mínima diária, com diferença de 0,84°C. Nota-se ainda um comportamento sazonal desta diferença, acompanhando as estações seca e chuvosa da região, em conformidade com o que foi apresentado anteriormente. Durante a estação chuvosa, a quantidade de calor armazenado na área urbana tende a diminuir devido à redução da radiação solar incidente à superfície, ocasionada pela presença de nebulosidade. Adicionalmente, a maior umidade do solo em área de floresta aumenta a capacidade de armazenamento de calor, o que conseqüentemente reduzirá a diferença de temperatura entre a floresta e a cidade.

Os resultados apresentados acima estão em concordância com os obtidos por Maitelli e Wright (1996), destacando-se que os do presente trabalho referem a uma análise mais abrangente com relação ao tamanho da série de dados e variáveis analisadas.

Segundo Oke (1988), o maior aquecimento de áreas urbanas resulta da combinação de fatores que alteram o balanço de energia local, como propriedades térmicas das construções, rugosidade da superfície urbana, fontes de calor antropogênicas e outros fatores que contribuem para o decréscimo da evapotranspiração. Assim sendo, com o crescimento da área urbana estudada espera-se que (i) sua rugosidade aumente, diminuindo assim o escoamento de ar; (ii) a capacidade térmica da superfície seja totalmente alterada devido à presença de novas construções, modificando de forma significativa o saldo de radiação em superfície e a evapotranspiração, o que juntamente com a frota veicular e o número de indústrias irá contribuir para o aumento dos fluxos de calor sensível.

Tabela 4.5 – Diferenças entre cidade e floresta para as variáveis temperaturas média, mínima e máxima, e umidade relativa entre os anos de 2000 e 2008 observados na cidade de Manaus.

	$T_{urb} - T_{flo} (^{\circ}C)$			$UR_{urb} - UR_{flo}$ (%)
	MÉD.	MÁX.	MIN.	
JAN	1.41	0.56	2.46	-2.40
FEV	1.43	0.48	2.83	-3.44
MAR	1.52	0.62	2.67	-1.75
ABR	1.87	0.99	3.14	-2.29
MAI	1.58	0.75	2.73	-3.17
JUN	1.99	0.75	3.22	-1.23
JUL	1.68	0.73	2.85	-0.22
AGO	1.54	0.68	2.75	1.28
SET	2.12	1.27	3.28	-0.49
OUT	2.08	1.32	3.59	-1.63
NOV	1.77	0.94	2.90	-2.35
DEZ	1.93	1.05	3.36	-2.38
	1.74	0.84	2.98	-1.67

Outra característica importante observada na formação de ICU são as diferenças no campo de umidade relativa entre áreas urbanas e não urbanizadas. Portanto, também foram utilizados dados de umidade relativa para o cálculo da IICU. Para o período de 2000 a 2008, nota-se que a cidade é 1,67% mais seca que a floresta. Durante o mês de fevereiro, época chuvosa da área de estudo, observa-se que a cidade é 3,44% mais seca do que a área de floresta. Liu et al. (2008) destacaram que os principais fatores que afetam a distribuição de umidade relativa em áreas urbanas são a turbulência causada

pela rugosidade da superfície e pelo aquecimento da área urbana, a redução na evapotranspiração devido a mudanças no uso da terra, emissão de vapor d'água por fontes industriais e transpiração, e pela remoção de vapor pela precipitação ou aerossóis. Vale ressaltar que a umidade relativa é uma variável altamente controlada pela temperatura do ar, mas pode significativamente colaborar para o entendimento de processos ligados a ICU.

A partir dos valores obtidos das diferenças entre temperatura e umidade relativa pode-se identificar a existência da ICU da cidade de Manaus. Com a finalidade de avaliar mais detalhadamente a ICU da cidade de Manaus, analisou-se o ciclo diurno da temperatura observada em área urbana e em floresta durante o período de 2000 a 2008 (Figura 4.18). Observa-se que o horário de máxima temperatura ocorre às 14 horas (HL) nas estações do INMET e INPA-ZF2, nos diferentes níveis, e às 15 horas (HL) na estação de PP, com uma diferença média entre a cidade e a floresta de 2,22° C dentro do dossel e 1,43° C para os valores de temperatura coletados acima do dossel. Vale ressaltar que a precipitação acumulada média anual para o período de 2000 a 2008 (2276,21 mm) esteve praticamente igual à média histórica calculada anteriormente para o período de 1961 a 2008.

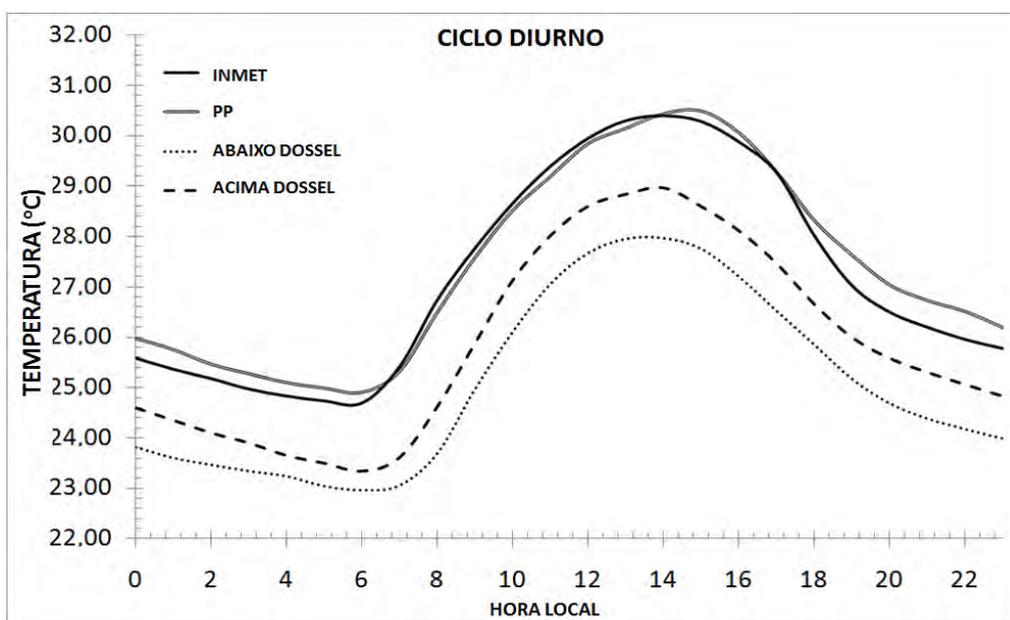


Figura 4.18 – Ciclo diurno da temperatura média observada em área urbana e floresta entre os anos de 2000 e 2008

Para a análise da intensidade da ICU, utilizando a equação 3.7, foi feita uma média entre os valores observados nos dois pontos da área urbana e estes então comparados com as medidas em área de floresta, tanto abaixo quanto acima do dossel (Figura 4.19). Os valores encontrados para a IICU corroboram a existência da ICU da cidade de Manaus durante todo o dia, com valores superiores a 1°C e média anual de 2,22° C abaixo e 1,43° C acima do dossel. Uma característica observada, tanto para o ciclo anual quanto para os períodos seco e chuvoso, foi a presença de dois picos em horários distintos em ambas as estações tanto acima quanto abaixo do dossel. Para as observações feitas abaixo do dossel nota-se um pico às 8 horas da manhã (HL) em todas as estações do ano e outro a tarde, às 16 horas (HL) para a média anual e durante a estação seca, e às 17 horas (HL) durante a estação chuvosa. Já a IICU analisada para os valores de temperatura acima do dossel mostra o mesmo pico às 8 horas da manhã (HL) para todas as estações, mas difere quanto ao segundo pico que ocorre às 16 horas (HL) para a média anual, às 15 horas (HL) durante a época chuvosa e às 17 horas (HL) durante o período seco.

O comportamento observado para a IICU difere do observado em trabalhos considerando outros locais do globo, como, por exemplo, para Granada na Espanha (MONTAVÉZ et al 2000) e para Seul, na Coreia do Sul (LEE E BAIK, 2010), para os quais a maior intensidade da ICU ocorre durante o período noturno e não durante o dia. Maitelli e Wright (1996) e Rodrigues da Silva et al. (2009) encontraram o ciclo diurno com apenas um pico, próximo às 14 horas (HL), para as cidades de Manaus e Campina Grande, respectivamente, as quais são duas cidades localizadas em área tropical no Brasil. O comportamento observado no presente trabalho possivelmente está relacionado com a capacidade da floresta em armazenar energia, como evidenciado por von Randow et al (2004), o que a torna um local distinto de áreas rurais ou pouco urbanizadas analisadas em estudos para diversos locais do planeta. Já a maior capacidade da área urbana de armazenar energia é discutida por Oke (1988), a qual foi apresentada nos parágrafos anteriores. Outro fator que pode contribuir para a presença de dois picos de intensidade da ICU de Manaus em horários distintos são os fluxos de energia resultantes de processos industriais, como queima de biomassa, e a presença de veículos automotores nos principais horários de maior movimento urbano.

Nota-se também um comportamento distinto entre os ciclos diurnos observados durante as estações seca e chuvosa. Para as duas estações, entre os anos de 2000 e 2008, a

intensidade média da ICU foi de 2,28° C abaixo e 1,33° C acima do dossel na época seca e 2,17° C abaixo e 1,53° C acima do dossel na época chuvosa.

Para os dados observados acima do dossel, nota-se que durante as estações seca e chuvosa a maior intensidade da ICU ocorre às 8 horas (HL), enquanto que para os observados abaixo do dossel, durante a estação chuvosa, a maior intensidade ocorre às 17 horas (HL). A maior intensidade observada durante a estação chuvosa (17 HL) está relacionada à menor temperatura na área de floresta durante este período. Isto ocorre principalmente devido à presença de nebulosidade que tende a diminuir a quantidade de radiação incidente e também à maior disponibilidade de água no solo o que, de certa forma, aumentará os processos de evaporação e evapotranspiração, o que está diretamente associado com processos que tendem a um resfriamento da atmosfera na área de floresta. Já os intensos valores observados durante o período seco, às 8 horas, estão diretamente relacionados com a disponibilidade de energia e a capacidade de armazenamento da superfície urbana, a qual se aquecerá mais rapidamente que a floresta adjacente próximo ao início da manhã.

Similar ao considerado por Lee e Baik (2010), para uma melhor interpretação e entendimento do comportamento do ciclo diurno da ICU, foram calculadas as taxas de resfriamento/aquecimento para a área urbana e para a floresta, acima e abaixo do dossel, durante todo o período anual e estações seca e chuvosa (Figuras 4.20 e 4.21). A taxa máxima de aquecimento é encontrada no início da manhã, as 8 HL (1,25°C hora⁻¹) na cidade e as 9 HL na floresta, com 1,28°C hora⁻¹ abaixo e 1,26°C hora⁻¹ acima do dossel. Já a taxa máxima de resfriamento para a área urbana é encontrada as 18 HL (-1,25°C hora⁻¹) e na região de floresta as 17 HL (-0,68°C hora⁻¹) abaixo do dossel e as 18 HL (-0,81°C hora⁻¹). Este comportamento deixa evidente que a cidade começa a aquecer-se mais cedo e mais lentamente, enquanto resfria-se mais tarde e de forma mais rápida em comparação com a floresta, principalmente devido às propriedades da superfície urbana, como o albedo, o que pode explicar os dois picos de ICU encontrados (Figura 4.19).

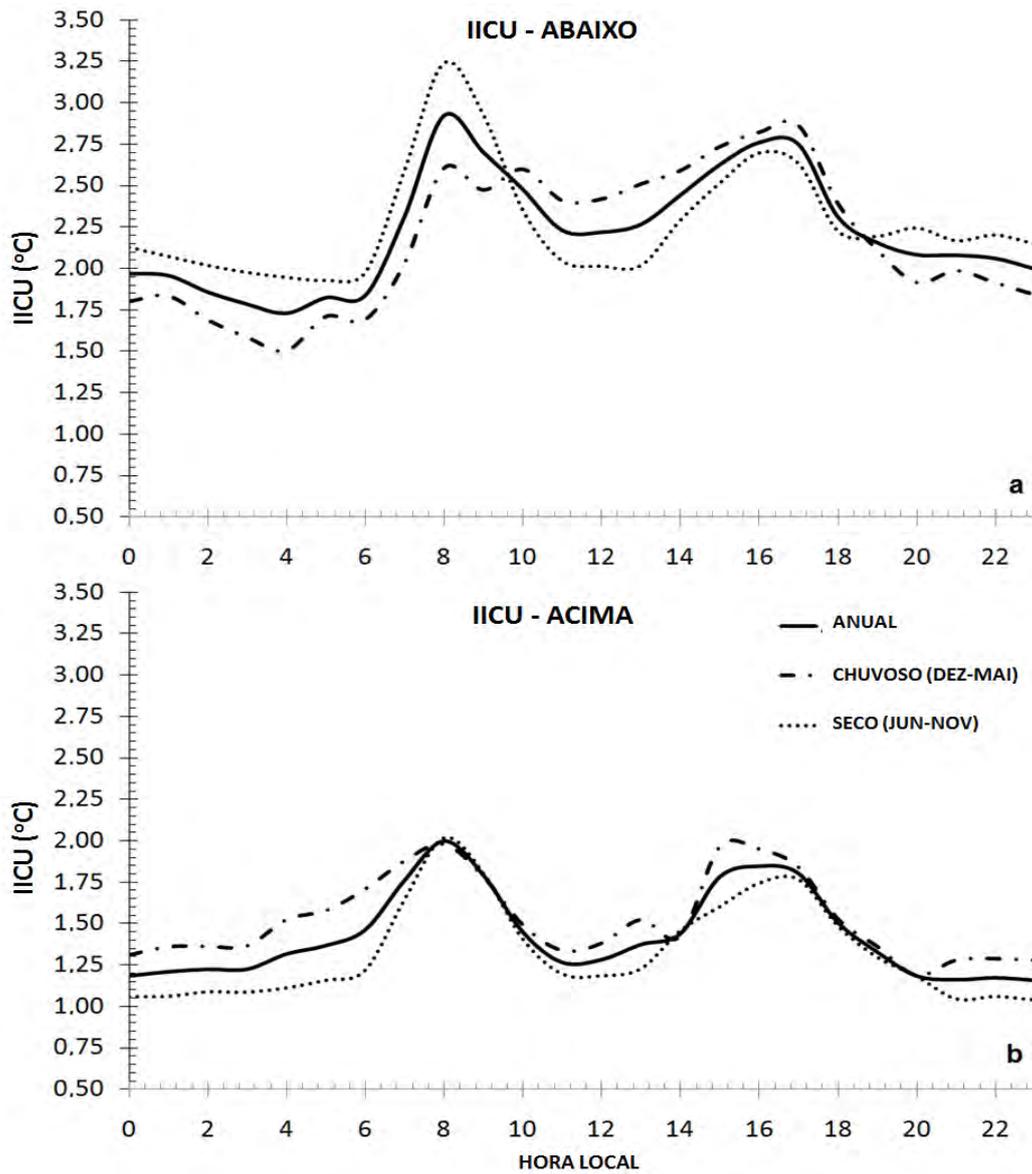


Figura 4.19 – Ciclo diurno da intensidade da ICU da cidade de Manaus observada (a) abaixo e (b) acima do dossel entre os anos de 2000 e 2008.

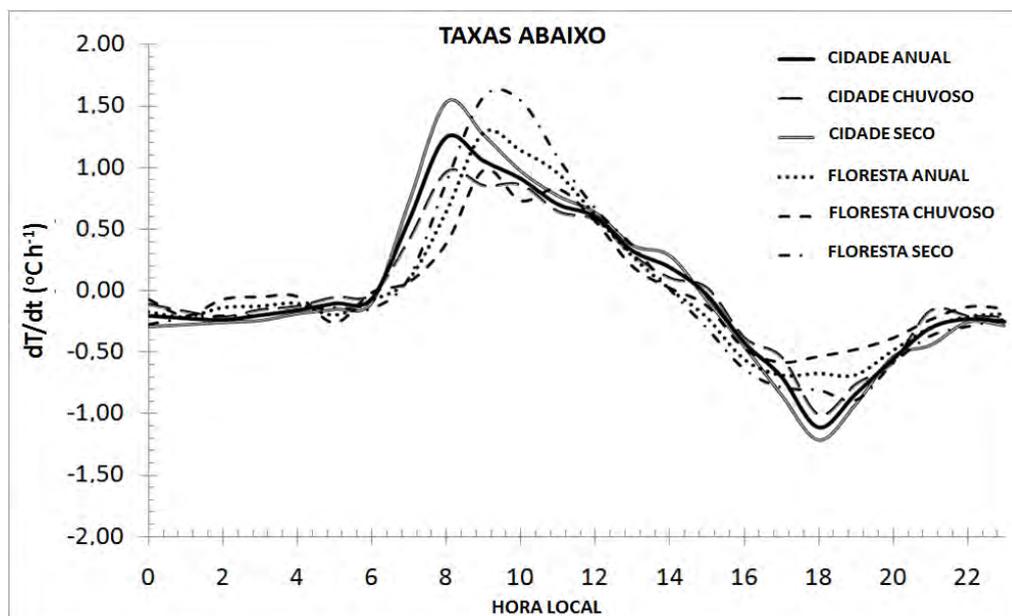


Figura 4.20 – Variação diurna da taxa de aquecimento/resfriamento entre área urbana e valores obtidos abaixo do dossel em área de floresta entre os anos de 2000 e 2008.

Analisando os valores da taxa de resfriamento/aquecimento para os períodos chuvoso e seco (Figura 4.20 e Figura 4.21) nota-se que existem diferenças significativas nos valores máximos encontrados tanto acima quanto abaixo do dossel. Para o período chuvoso, a amplitude entre a taxa máxima de aquecimento/resfriamento entre a cidade e a floresta é bem menor da observada durante o período seco, o que leva a uma diminuição da intensidade da ICU. O principal efeito que leva as menores taxas durante a época chuvosa é a diminuição da radiação solar incidente devido à presença de nebulosidade. Com relação à variabilidade das taxas de resfriamento/aquecimento para as áreas urbana e de floresta mencionadas acima, estas diferem das observadas por Lee e Baik (2010). Estes encontraram maior amplitude entre aquecimento e resfriamento para a área rural do que para a área urbana de Seul, embora os resultados sejam similares quando comparados com os dos períodos chuvoso e seco, tendo sido encontrado que durante os dias sem chuva os valores de aquecimento e resfriamento são menos intensos para as duas regiões.

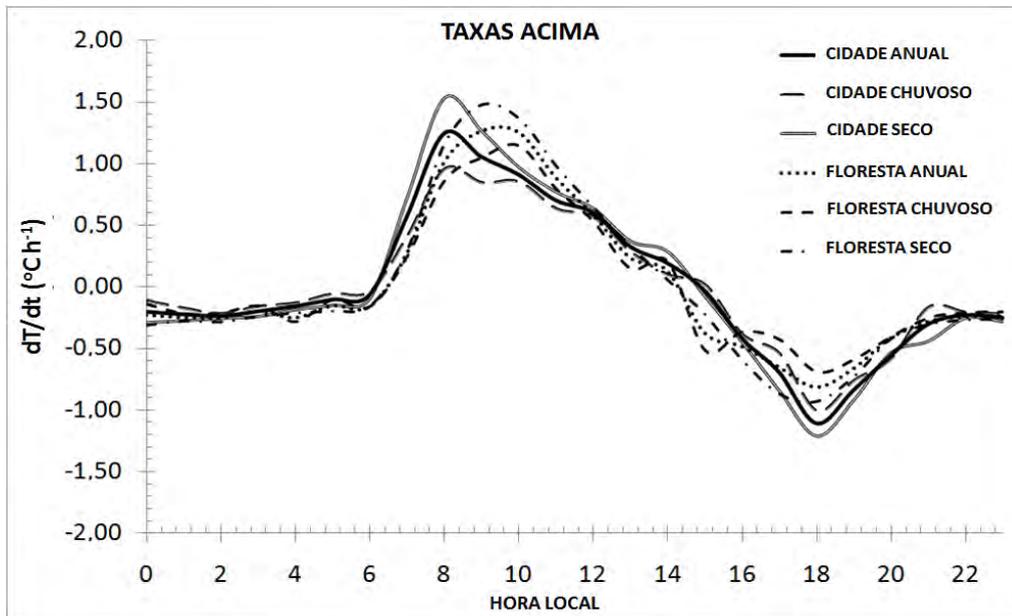


Figura 4.21 – Variação diurna da taxa de aquecimento/resfriamento entre área urbana e valores obtidos acima do dossel em área de floresta entre os anos de 2000 e 2008.

4.4 Considerações finais sobre os estudos observacionais

As características dos microclimas urbanos das cidades de Manaus e Belém no período de 1961 a 2010 foram avaliadas a partir de dados diários de temperatura e de precipitação. Para avaliar o papel da urbanização sobre o microclima da cidade de Manaus, também foram estudadas as características da ICU para um período de 9 anos (de 2000 a 2008), considerando-se dados diários e horários obtidos em área urbana e em área de floresta.

Inicialmente, analisou-se o crescimento da área urbana das cidades de Manaus e Belém. Os resultados permitiram concluir que um intenso crescimento da área urbana destas duas cidades é observado nos últimos 30 anos. De maneira geral, o crescimento populacional apresentou relação direta com o processo de urbanização, mas o surgimento de novas cidades e o incremento de aumento de uma região metropolitana, como no caso de Belém, também foram fatores que influenciaram o intenso crescimento da área urbana. Vale salientar que nem todo o processo de urbanização observado nestas duas cidades ocorreu de forma ordenada e respeitando áreas de risco. Sendo assim, principalmente áreas consideradas de risco e pouco desenvolvidas merecem melhor

atenção, pois os efeitos das mudanças nos microclimas observados para as cidades em estudo podem elevar os riscos já existentes.

As análises estatísticas realizadas mostram que os registros de temperatura entre 1961 e 2010 foram afetados por mudanças nos microclimas locais, principalmente durante as duas últimas décadas, período este que foi caracterizado por intensa urbanização nestas duas cidades. Este intenso crescimento resultou em tendências positivas da temperatura do ar em superfície, como também possivelmente influenciaram sistemas precipitantes sobre a área de estudo. Estes resultados observados para Manaus concordam com os observados por Oliveira et al. (2006 e 2008), embora estes autores atribuíssem estas tendências apenas à variabilidade climática. De certa forma não se pode negar que esta variabilidade tenha afetado os valores de temperatura do ar, principalmente quando são analisados os testes sequenciais de Mann-Kendall, em que o comportamento das curvas evidencia a influência de eventos de El Niño, mas quando analisadas as anomalias de TSM para as diferentes décadas não nota-se uma correlação muito direta com as tendências observadas. Assim sendo, também se deve considerar que a intensa urbanização foi um dos fatores, ou talvez o principal fator, que contribuiu para elevar as temperaturas das cidades de Manaus e Belém nos últimos 50 anos, principalmente durante as últimas décadas do período analisado.

Algumas evidências das mudanças nos microclimas das cidades de Manaus e Belém também foram analisadas através de índices de extremos, tal como apresentados por Vicent et al. (2005), relacionados com as temperaturas máxima e mínima diária. Os resultados deixam claro que há uma mudança nos extremos nestas duas cidades como, por exemplo, a temperatura do dia mais quente, índice o qual apresentou uma tendência de elevação. Também se observou que os demais índices, como, por exemplo, número de noites frias e número de noites quentes apresentaram comportamento diferente para as duas cidades. Enquanto em Belém foi observada uma tendência de aumento nestes dois índices, Manaus apresentou uma tendência de queda. De maneira geral, pode-se concluir que há mudanças nos extremos de temperatura diária para as duas cidades analisadas, mas a influência direta do crescimento urbano observado não fica muito clara, já que os índices número de dias quentes, número de dias frios, número de noites quentes e número de noites frias, os quais possivelmente refletem a influência do crescimento urbano, apresentaram comportamento oposto para Manaus e Belém. Mesmo assim não se pode descartar a influência das mudanças nos usos da terra e o

processo de urbanização como fatores responsáveis pelas mudanças observadas nos microclimas das duas cidades analisadas, já que a estimativa relacionada à outros fatores também não fica evidente.

O crescimento urbano e sua relação com as mudanças nos microclimas de Manaus e Belém foram analisados através da metodologia proposta por Kalnay e Cai (2003). A diferença entre dados de reanálises atmosféricas e dados observacionais, segundo os autores, permite inferir possíveis mudanças no microclima de determinado local relacionado com mudanças nos usos da terra, neste caso, o processo de urbanização. Os resultados mostraram que existem tendências nos dados de reanálises e estas possivelmente estão relacionadas com mudanças no clima regional e global. Já a diferença observada para o período de 1961 a 2010 entre os dois conjuntos de dados mostra que as tendências observadas para o conjunto de dados observacionais a tendência de aumento na temperatura foi mais elevada, para as duas cidades, com maiores valores em Manaus. Entretanto não é possível atribuir que a tendência observada para estas diferenças ocorre somente devido às mudanças nos usos da terra, mas deixa claro que o efeito de ICU e o processo de urbanização apresenta papel de fundamental importância na mudança do microclima local.

A análise de registros históricos de dados observacionais evidencia o papel da urbanização sobre o aquecimento urbano, evidenciando os efeitos da ICU e dos processos de urbanização das duas cidades analisadas sobre os microclimas locais. Sendo assim, objetivando conhecer o fenômeno ICU e inferir sua intensidade, foi estudada a ICU de Manaus através de comparações entre dados observacionais em área de floresta e área urbana. Os resultados mostraram que a área urbana caracterizou-se por ser mais quente e seca que a região de floresta adjacente durante todo o ano, com maior e menor intensidade nas épocas seca e chuvosa respectivamente. Com relação ao ciclo diurno da ICU da cidade de Manaus, notou-se um comportamento diferente daquele obtido em outros estudos sobre ICU para diversas localidades no mundo, ou seja, observaram-se dois picos de maior intensidade, um as 8 HL e outro variando entre as 15 e 17 HL.

Este padrão evidencia que o fenômeno ICU não é apenas um fenômeno noturno como salientado por Oke (1987), ou seja, a formação da ICU na área de estudo está diretamente relacionada com as taxas de aquecimento e de resfriamento observadas em

área de floresta e área urbana; logo, a cidade tendeu a se aquecer primeiro e mais lentamente e resfriar-se depois e mais rapidamente que a floresta, acompanhando o nascer e pôr-do-sol. Outra justificativa para este padrão pode estar relacionada com a liberação de calor por fontes automotoras e industriais, não avaliadas neste trabalho.

Salienta-se que estas diferenças nas taxas de aquecimento e resfriamento, assim como o comportamento diferenciado da intensidade da ICU de Manaus, está diretamente associada às propriedades da superfície, as quais influenciam de forma direta o BES. Considerando que devido às características de sua superfície e juntamente com fontes de calor antropogênicas, o fluxo de calor sensível na área urbana de Manaus aumenta significativamente com a incidência de radiação durante o período diurno, enquanto que a presença do dossel em área de floresta influencia de forma direta a radiação solar incidente e, assim, o aumento no fluxo de calor sensível ocorre de forma mais lenta. Já no período noturno, devido às propriedades de armazenamento de energia da superfície urbana, esta irá perder calor de forma mais rápida para a atmosfera, resfriando-se mais rapidamente, enquanto que o armazenamento de energia no dossel em área de floresta faz com que a temperatura nesta região diminua mais lentamente.

A falta de dados observacionais para a área urbana de Belém e de áreas afastadas da influência urbana, como, por exemplo, floresta adjacente ou áreas rurais, não permitiram a análise observacional da ICU, mas este fenômeno foi investigado através de modelagem numérica.

Os resultados obtidos através das análises observacionais apresentadas neste capítulo mostram que mudanças nos microclimas das cidades de Manaus e Belém ocorreram nestes últimos 50 anos. Além da variabilidade evidenciada no comportamento das variáveis, efeitos relacionados às mudanças no clima regional e global apresentam grande influência na modificação dos microclimas das cidades analisadas, mas também devem-se considerar que efeitos relacionados com a urbanização e ICU, além de mudanças nos usos da terra na região, apresentam influência significativa nas tendências observadas. Portanto, estudos mais específicos sobre a ICU e efeitos da urbanização sobre a modulação do clima local permitirão uma análise objetiva dos processos atmosféricos relacionados. Ressalta-se também que se torna relevante a elaboração de projetos e políticas que visem mitigar estes efeitos e melhorar a qualidade de vida da população urbana.

Os resultados obtidos ressaltam a presença da ICU da cidade de Manaus, possíveis efeitos da urbanização em Belém, e sua influência sobre o microclima local. O conhecimento das características dinâmicas da atmosfera associadas com a formação e presença da ICU também poderá ajudar a elucidar e detalhar este fenômeno ainda pouco estudado para regiões tropicais do globo, principalmente em áreas densamente florestadas. Portanto, o estudo de modelagem, considerando um modelo meteorológico de mesoescala acoplado com um esquema de dossel urbano é relevante para o estudo dos mecanismos físicos relacionados com a ICU da cidade de Manaus, o qual é apresentado no próximo capítulo.

4.5 Estudo numérico da ICU das cidades de Manaus e Belém

4.5.1 Análise de desempenho do modelo BRAMS

Com o objetivo de avaliar o desempenho do modelo BRAMS para as simulações da ICU, foram realizados três experimentos para Manaus e dois experimentos para Belém. Em um primeiro experimento (denominado LEAF), para as duas cidades, o esquema TEB não foi ativado e o modelo de interação SVAT LEAF-3 foi utilizado para o tratamento da interação entre superfície e atmosfera. O segundo experimento, apenas para Manaus, considerou o esquema TEB ativado (S_FLUXOS), realizando assim o tratamento do BES para o dossel urbano, mas não foram considerados os fluxos de calor sensível e latente emitidos por fontes antropogênicas. No terceiro experimento (CTRL), novamente para as duas cidades, o esquema TEB foi ativado e se considerou os fluxos de calor sensível e latente de fontes antropogênicas. Todas as simulações foram realizadas para o período de 1 mês, entre os dias 01/06/2008 e 30/06/2008, cujos resultados apresentados nesta seção são referentes à esse período.

Os parâmetros presentes no esquema TEB que tentam de melhor forma representar as características da área urbana são: comprimento de rugosidade (Z0Town); fração ocupada por construções na célula de grade (BLD); altura média das construções (BLD_HEIGHT); razão vertical/horizontal das construções (BLD_HL_RATIO); albedo dos telhados (AROOF); albedo das ruas (AROAD); albedo das paredes (AWALL); fluxo de calor sensível emitido por veículos (HTRAF); fluxo de calor sensível emitido por indústrias (HINDU); fluxo de calor latente emitido por veículos (PLETRAF) e fluxo de calor latente emitido por indústrias (PLEINDU). Para as simulações também é necessário fornecer dados sobre a hora de maior movimento de veículos (RUSH1 e RUSH2) e emissividade de ruas (EROAD), telhados (EROOF) e paredes (EWALL). A Tabela 4.6 apresenta um resumo de cada simulação e os valores utilizados para cada um dos parâmetros para as duas cidades.

Vale salientar que os fluxos de calor emitidos por fontes veiculares foram estimados seguindo a metodologia apresentada anteriormente. Logo, considerando a metodologia apresentada para a estimativa dos fluxos, para a cidade de Manaus foram obtidos os valores de $2,95 \text{ Wm}^{-2}$ para HTRAF e $0,176 \text{ Wm}^{-2}$ para o parâmetro PLETRAF. Para Belém o valor dos fluxos de calor HTRAF e PLETRAF foram estimados em $1,67 \text{ Wm}^{-2}$

e $0,09 \text{ Wm}^{-2}$ respectivamente. Todos os valores apresentados foram baseados em valores próximos aos observados *in situ* e que constam na metodologia. Uma importante característica do esquema TEB acoplado ao modelo BRAMS é que este distribui os fluxos de calor como uma função gaussiana dupla, diretamente relacionada com a hora de maior tráfego de veículos (hora do *rush*) no período da manhã e tarde.

Tabela 4.6 – Valores dos parâmetros do esquema TEB utilizados nas diferentes simulações de realizadas para as cidades de Manaus e Belém.

MANAUS				BELÉM		
	LEAF	CTRL	S_FLUXOS		LEAF	CTRL
RUSHH1	-	7,81	7,81	RUSHH1	-	7,81
RUSHH2	-	17,00	17,00	RUSHH2	-	17,00
ZO_TOWN	-	2,00	2,00	ZO_TOWN	-	2,00
BLD	-	0,60	0,60	BLD	-	0,60
BLD_HEIGHT	-	10,00	10,00	BLD_HEIGHT	-	12,00
BLD_HL_RATIO	-	2,00	2,00	BLD_HL_RATIO	-	2,00
AROOF	-	0,25	0,25	AROOF	-	0,25
EROOF	-	0,90	0,90	EROOF	-	0,90
AROAD	-	0,20	0,20	AROAD	-	0,20
EROAD	-	0,90	0,90	EROAD	-	0,90
AWALL	-	0,25	0,25	AWALL	-	0,25
EWALL	-	0,85	0,85	EWALL	-	0,85
HTRAF	-	2,95	0,00	HTRAF	-	1,68
HINDU	-	20,00	0,00	HINDU	-	20,00
PLETRAF	-	0,17	0,00	PLETRAF	-	0,09
PLEINDU	-	40,00	0,00	PLEINDU	-	40,00

Uma característica essencial para todas as simulações realizadas no contexto deste capítulo é a utilização do novo mapa de vegetação e usos da terra para todo Brasil, em que neste constam as áreas urbanas de Manaus e Belém. Portanto, quando a classe referente à área urbana (19) está presente no domínio da simulação é ativado o esquema de balanço de energia em áreas urbanas TEB e o BES é resolvido diferentemente para as demais classes de vegetação e usos da terra.

Os resultados apresentados nas Tabelas 4.7 e 4.8 mostram o desempenho do modelo BRAMS, para a cidade de Manaus, com relação aos dados horários observados de temperatura média e umidade relativa para o período de 01/06/2008 a 30/06/2008 nas estações do INMET (Lat: -3.129 Lon: -59.948), INPA (Lat: -3.095 Lon: -59.989),

aeroporto de Ponta Pelada (Lat: -3.146 Lon: -59.995), aeroporto Eduardo Gomes (Lat: -3.033 Lon: -60.044), todas estas em área urbana, e dados de floresta coletados na estação ZF2 (Lat: -2.610 Lon: -60.210).

O desempenho do modelo BRAMS, para a cidade de Belém, com relação aos dados horários observados de temperatura média e umidade relativa para o período de 01/06/2008 a 30/06/2008 nas estações do INMET (Lat: -1.401 Lon: -48.433) e do aeroporto internacional de Belém (AER) (Lat: -1.379 Lon: -48.476), são também mostrados nas Tabelas 4.9 e 4.10. Salienta-se a ausência de dados observacionais em área sem influência urbana; portanto, comparações entre regiões urbanizadas e não urbanizadas, assim como a estimativa da intensidade da ICU de Belém não puderam ser realizadas

A avaliação do desempenho das simulações segue a metodologia proposta, tendo sido calculados o desvio padrão para observação (σ_{obs}) e simulação (σ_{sim}), a correlação linear (R), erro médio (BIAS), a raiz do erro médio quadrático (REM_Q), a raiz do erro médio quadrático imparcial (REM_{QIM}) e desvio padrão. Mesmo as correlações apresentando uma boa informação sobre a relação entre as simulações e a observação, elas não consideram os desvios presentes, não evidenciando também a verdadeira acurácia das simulações. Para isso utiliza-se outras estatísticas como BIAS, REM_Q e REM_{QIM}. O BIAS representa apenas os erros de toda a série da simulação, mas não representa a acurácia da mesma. Sendo assim, para a medida da acurácia das simulações foram calculados as estatísticas REM_Q e REM_{QIM}.

Resumidamente, simulações com $BIAS > 0$ mostram que as médias das simulações são maiores que as observações, e um $BIAS < 0$ representa uma média das simulações menor que as observações. Já valores da REM_Q indicam a magnitude de discrepância entre as observações e simulações, em que a estatística REM_{QIM} diferencia-se por remover o desvio médio.

De acordo com Pielke (2002), o bom desempenho da simulação numérica pode ser demonstrado quando as seguintes características são satisfeitas:

- 1) $\sigma_{sim} \cong \sigma_{obs}$.
- 2) $REM_{Q} < \sigma_{obs}$.

$$3) \text{ REMQ}_{\text{IM}} < \sigma_{\text{sim.}}$$

O REMQ é uma medida da acurácia ou exatidão, isto é, o quanto o resultado de uma previsão é próximo do valor observado, e possibilita verificar a magnitude média do erro da simulação; ao elevar-se o erro ao quadrado os maiores erros são realçados (MENDONÇA, 1999), sendo que quanto maior o valor de REMQ menor é a acurácia da previsão numérica da quantidade de chuva. O REMQ_{IM} fornece a mesma informação que o REMQ, entretanto desconsidera os erros devidos ao viés do modelo numérico, possibilitando identificar quanto da acurácia de uma simulação está associada a esse viés. O Desvio Padrão fornece uma medida de quanto determinado valor está distante do valor médio, assim, quanto maior o Desvio Padrão maior é a dispersão dos valores em torno da média.

Os resultados apresentados nas Tabelas 4.7 e 4.8 mostram que a simulação CTRL apresenta melhor desempenho em representar o comportamento da temperatura média observada em Manaus em relação às demais simulações para o período analisado. Para a variável Umidade Relativa (UR) nota-se que o modelo apresenta bom desempenho, mas a simulação LEAF também apresenta uma boa performance na simulação deste conjunto de dados. Possivelmente estes resultados refletem as influências do dossel urbano na evapotranspiração, pois o esquema TEB não armazena água em superfície e, com isso, a evapotranspiração é praticamente nula em área urbana. Já o modelo LEAF trata a área urbana como uma superfície com propriedades pré-estabelecidas, considerando que o solo possui água disponível para processos de evaporação.

Tabela 4.7 – Análise do desempenho do modelo BRAMS para temperatura em Manaus.

TEMPERATURA						
INMET						
	R	REMQ	BIAS	REMQ_{IM}	σ_{sim}	σ_{obs}
LEAF	0,760	2,435	1,474	1,951	2,978	2,580
CTRL	0,812	2,295	1,492	1,769	3,089	2,580
S_FLUXOS	0,790	2,663	1,790	1,996	3,269	2,580

EG						
	R	REMQ	BIAS	REMQ_{IM}	σ_{sim}	σ_{obs}
LEAF	0,750	1,989	0,014	2,172	2,794	2,853
CTRL	0,786	1,962	-0,015	2,143	3,190	2,853
S_FLUXOS	0,782	2,062	0,105	2,234	3,294	2,853

INPA						
	R	REMQ	BIAS	REMQ_{IM}	σ_{sim}	σ_{obs}
LEAF	0,709	2,319	0,820	2,069	2,890	2,433
CTRL	0,743	2,187	0,703	2,039	3,108	2,433
S_FLUXOS	0,739	2,495	0,998	2,219	3,305	2,433

PP						
	R	REMQ	BIAS	REMQ_{IM}	σ_{sim}	σ_{obs}
LEAF	0,719	2,384	1,047	6,005	3,052	2,470
CTRL	0,763	2,296	1,173	5,980	3,101	2,470
S_FLUXOS	0,750	2,634	1,542	6,003	3,254	2,470

ZF2						
	R	REMQ	BIAS	REMQ_{IM}	σ_{sim}	σ_{obs}
LEAF	0,708	1,827	-0,369	2,007	2,496	2,085
CTRL	0,704	1,789	-0,377	1,965	2,473	2,085
S_FLUXOS	0,702	1,833	-0,413	1,989	2,465	2,085

Tabela 4.8 – Análise do desempenho do modelo BRAMS para umidade relativa em Manaus

UMIDADE RELATIVA						
INMET						
	R	REMQ	BIAS	REMQ _{IM}	σ_{sim}	σ_{obs}
LEAF	0,654	10,961	-5,121	9,658	12,063	11,177
CTRL	0,614	9,695	-0,148	9,666	11,018	11,177
S_FLUXOS	0,593	10,709	-1,851	10,513	12,197	11,177

EG						
	R	REMQ	BIAS	REMQ _{IM}	σ_{sim}	σ_{obs}
LEAF	0,646	11,915	-5,575	11,084	11,027	13,440
CTRL	0,634	11,371	-0,871	11,861	13,115	13,440
S_FLUXOS	0,617	11,813	-1,551	12,232	13,429	13,440

INPA						
	R	REMQ	BIAS	REMQ _{IM}	σ_{sim}	σ_{obs}
LEAF	0,054	13,777	-64,474	10,242	11,998	0,798
CTRL	0,034	10,893	-58,737	10,340	11,922	0,798
S_FLUXOS	0,014	12,560	-60,418	11,471	13,051	0,798

PP						
	R	REMQ	BIAS	REMQ _{IM}	σ_{sim}	σ_{obs}
LEAF	0,650	10,941	-4,671	9,865	12,403	11,051
CTRL	0,627	9,494	-0,216	9,466	11,078	11,051
S_FLUXOS	0,581	10,779	-1,815	10,589	12,128	11,051

ZF2						
	R	REMQ	BIAS	REMQ _{IM}	σ_{sim}	σ_{obs}
LEAF	0,552	15,112	-13,747	12,492	10,522	11,807
CTRL	0,517	15,468	-13,588	13,057	10,259	11,807
S_FLUXOS	0,511	14,832	-13,490	12,336	10,284	11,807

Tabela 4.9 – Análise do desempenho do modelo BRAMS para temperatura em Belém.

TEMPERATURA						
INMET						
	R	REMQ	BIAS	REMQ _{IM}	σ_{sim}	σ_{obs}
LEAF	0,529	3,105	2,749	2,375	1,582	2,665
CTRL	0,658	2,453	2,338	3,146	3,232	2,665

AER						
	R	REMQ	BIAS	REMQ _{IM}	σ_{sim}	σ_{obs}
LEAF	0,383	3,068	1,683	2,570	1,042	2,790
CTRL	0,744	2,701	1,842	2,000	2,840	2,790

Tabela 4.10 – Análise do desempenho do modelo BRAMS para umidade relativa em Belém

UMIDADE RELATIVA						
INMET						
	R	REMQ	BIAS	REMQ _{IM}	σ_{sim}	σ_{obs}
LEAF	0,511	14,772	-12,691	11,818	8,781	12,568
CTRL	0,487	12,900	-7,706	12,561	9,854	12,568

AER						
	R	REMQ	BIAS	REMQ _{IM}	σ_{sim}	σ_{obs}
LEAF	0,344	14,603	-7,570	12,577	6,295	13,316
CTRL	0,367	13,204	-3,876	12,649	7,674	13,316

A partir dos resultados apresentados nas Tabelas 4.9 e 4.10 pode-se observar que, assim como apresentado para Manaus, a simulação CTRL apresenta melhor desempenho em representar o comportamento da temperatura média e umidade relativa observada em Belém com relação à simulação utilizando o modelo de interação SVAT LEAF-3. Nota-se que todas as estatísticas comprovam a melhor performance do modelo BRAMS acoplado ao esquema TEB. Uma característica observada é que para a variável umidade

relativa o modelo apresenta um BIAS negativo, mostrando que os valores em ambas as simulações é subestimado. Possivelmente este resultado reflete que o tratamento para o conteúdo de água na superfície não é bem resolvido tanto no esquema LEAF quanto no TEB, considerando que o modelo LEAF trata a superfície urbana através de parâmetros fixos pré-estabelecidos, semelhantes à características de solo nu.

De maneira geral, as correlações obtidas com o LEAF são inferiores às obtidas com o esquema TEB ativado, mostrando que as simulações com o TEB a temperatura pode ser simulada com bastante precisão. Observa-se também que as correlações calculadas para a variável temperatura são maiores que para os dados de umidade relativa, mostrando que de certa forma os dados de temperatura estão em fase com os dados observacionais. A menor correlação entre os dados observados e os simulados para a variável umidade relativa mostram que o modelo BRAMS não consegue simular de forma satisfatória o ciclo diurno, apresentando os resultados fora de fase.

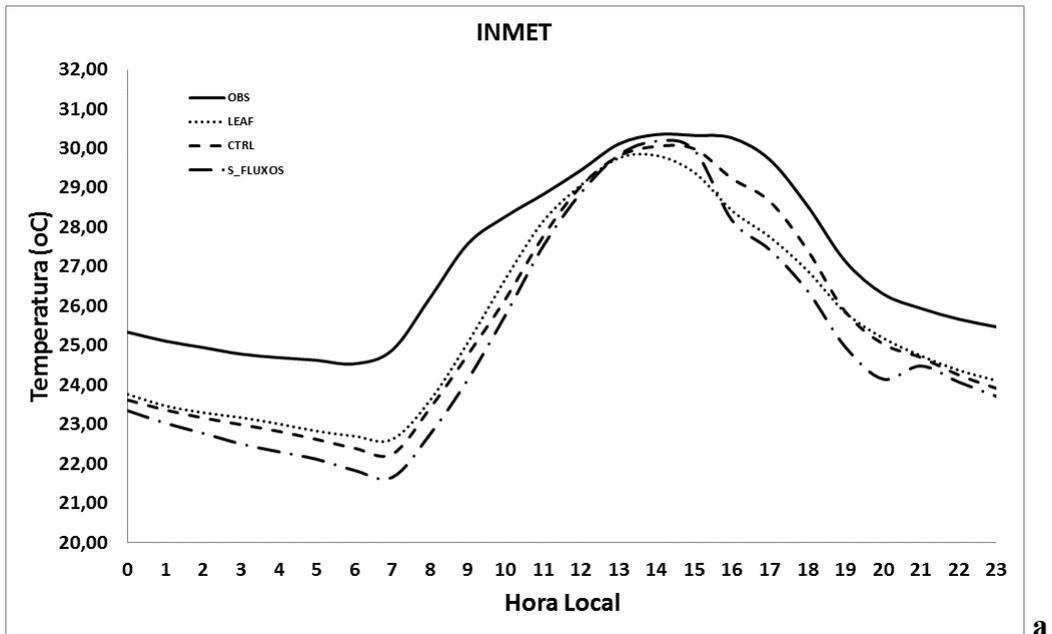
O desempenho do modelo BRAMS para as simulações de umidade relativa foi menor do que o observado para a variável temperatura. As simulações apresentam uma correlação menor, evidenciando que a umidade relativa simulada não está perfeitamente em fase com o dado observado. Porém, de maneira geral, o desempenho do modelo foi satisfatório, demonstrando assim a capacidade deste em simular as características atmosféricas da região. Nota-se novamente o melhor desempenho da simulação CTRL, mostrando que o esquema TEB ativado melhora a representação das condições atmosféricas no dossel urbano.

Os resultados apresentados nesta seção também evidenciam que a correta representação dos fluxos antropogênicos em área urbana, dentro do esquema de dossel urbano, apresenta grande influência na melhor representação do clima urbano. Observa-se que a simulação CTRL, para Manaus, é 1°C mais quente que a simulação S_FLUXOS, mostrando assim como os fluxos de calor sensível e de calor latente interferem no comportamento da temperatura em área urbana. Nota-se também que a inclusão dos fluxos antropogênicos também contribuiu para a diminuição da umidade relativa em área urbana em até 3%.

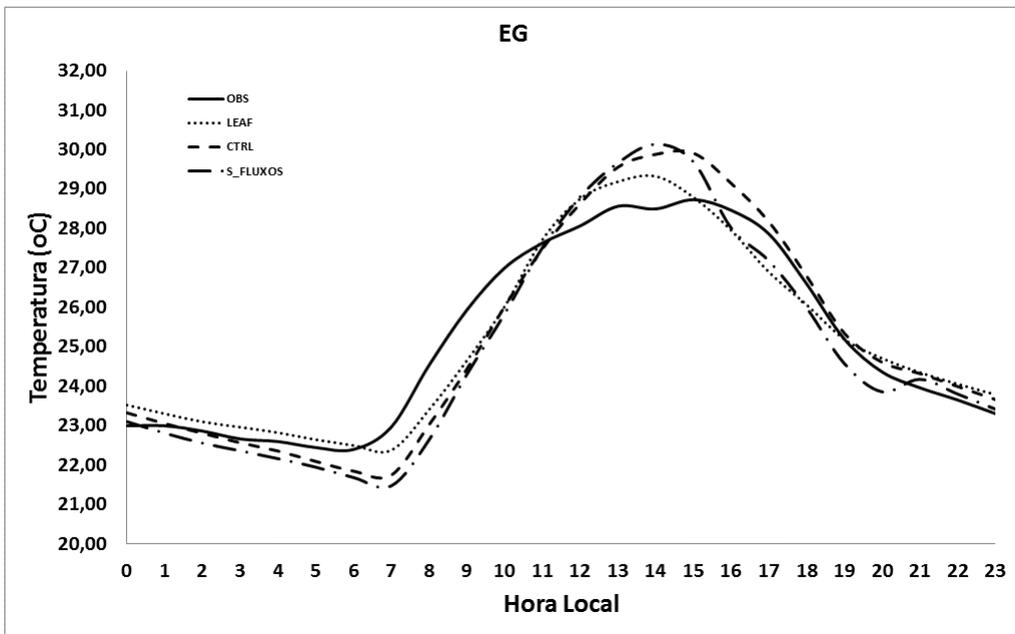
O comportamento do ciclo diurno de temperatura e umidade para as simulações realizadas (Figuras 4.22 e 4.23) também foi analisado. Pode-se observar que todas as

simulações conseguem representar de forma satisfatória o ciclo diurno de temperatura e umidade, tanto em área urbana quanto em floresta. Uma característica presente em todas as simulações é que o modelo possui certa deficiência em representar os máximos e mínimos observados. Uma característica que pode ser observada está associada com que as simulações em que o esquema TEB foi ativado, ou seja, a amplitude dos máximos são melhor representadas, mostrando assim a eficiência do esquema em representar de forma mais realista o BES em área urbana.

Os resultados permitem observar também que a simulação CTRL conseguiu simular corretamente o horário de máxima temperatura errando por apenas uma hora o horário de temperatura mínima observada em Manaus, para todas as estações analisadas. Em Manaus, a maior diferença entre simulações e dados observados pode ser observada para a simulação S_FLUXOS, em que o modelo simula uma temperatura 3,46°C mais elevada, às 8 HL, na estação do INMET. Para Belém, a correta representação dos máximos no experimento CTRL mostra uma diferença entre este experimento CTRL e o experimento LEAF superior a 3°C na estação do INMET e 2,8°C para a estação AER, indicando assim que o esquema TEB consegue resolver o BES em áreas urbanas e representar sua influência no ciclo diurno de temperatura.



a



b

Figura 4.22 – Ciclo diurno da temperatura observada e simulada em Manaus nos diferentes experimentos para as estações do (a) INMET, (b) aeroporto Eduardo Gomes. (continua)

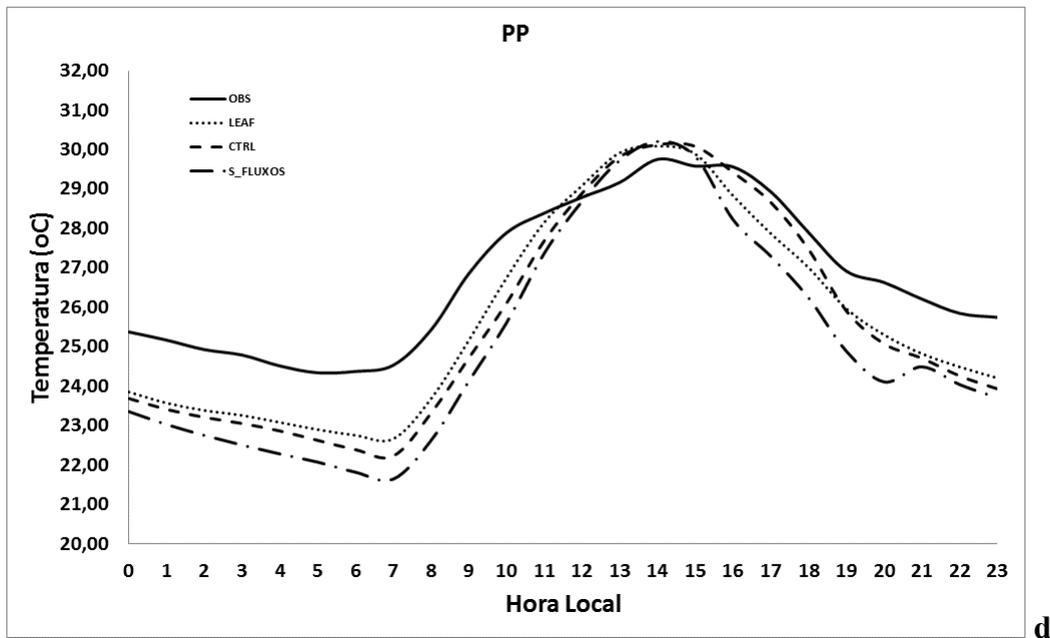
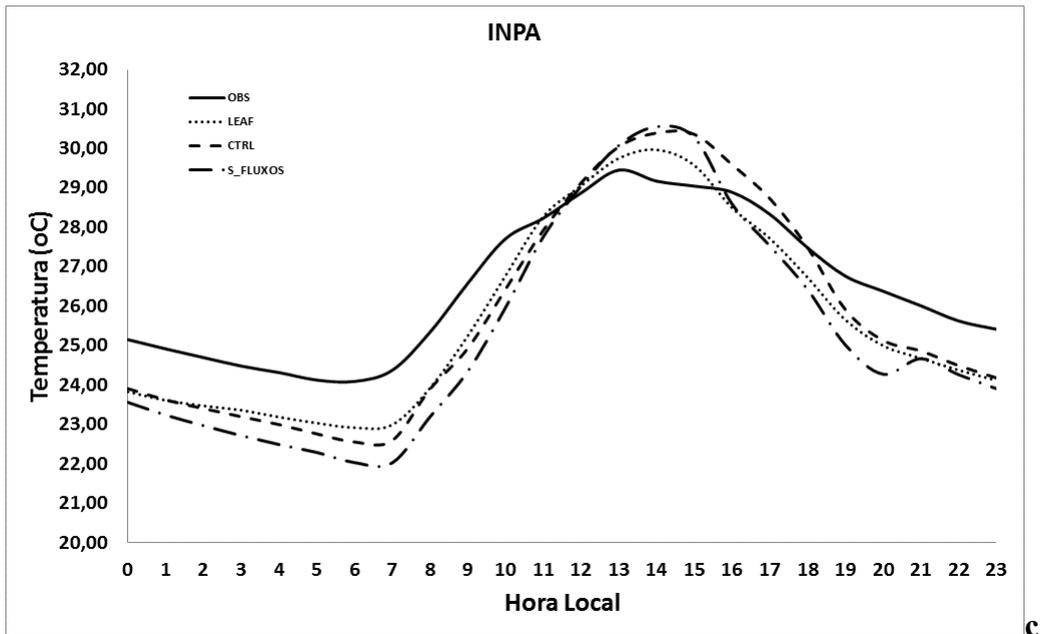


Figura 4.22 – Continuação. (c) INPA, (d) aeroporto de Ponta Pelada. (continua)

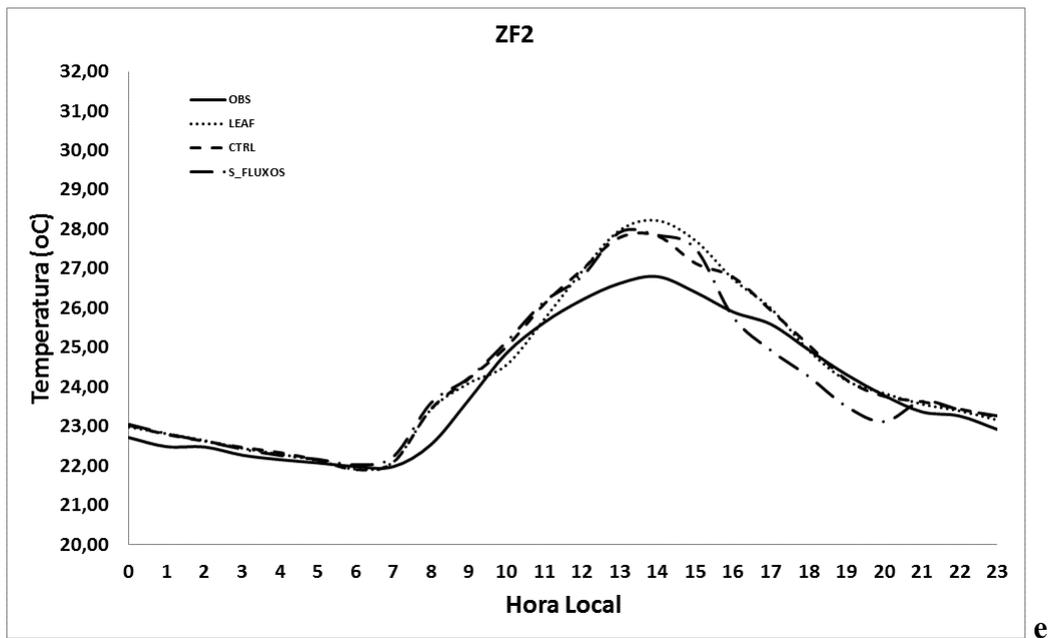
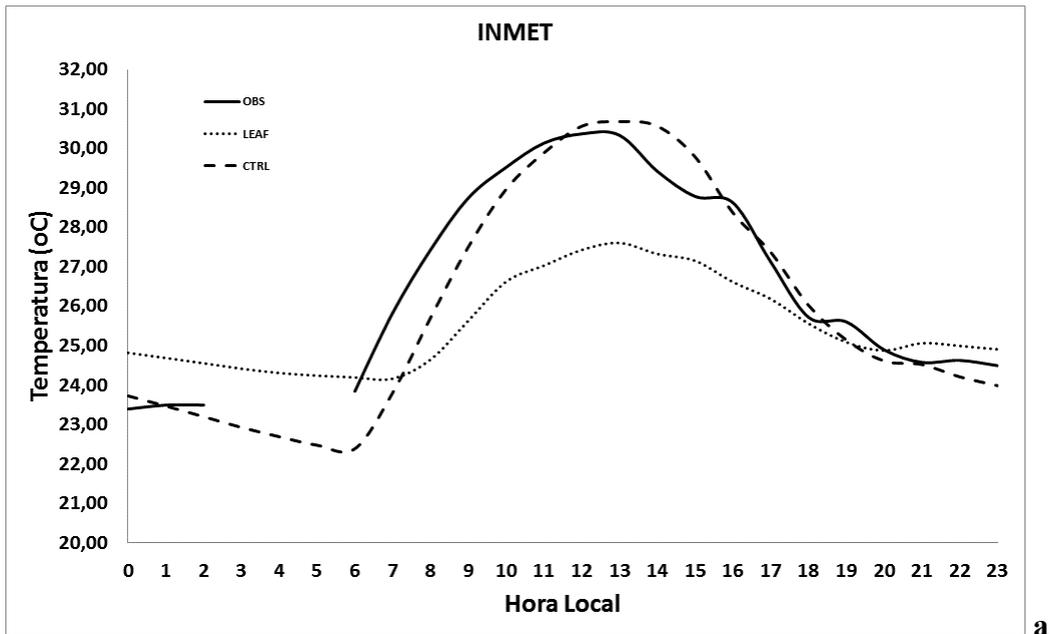
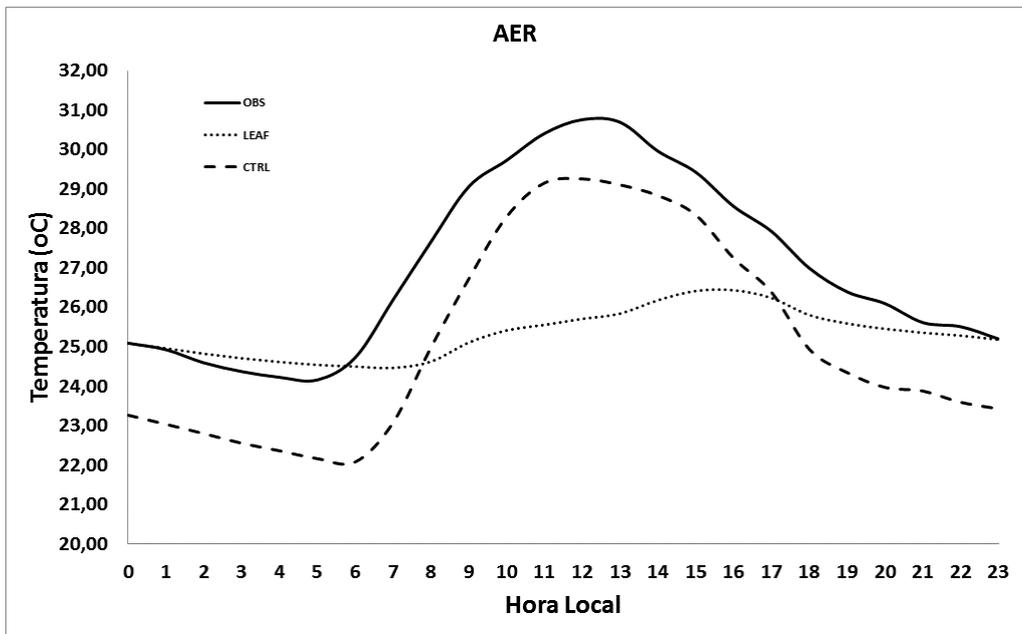


Figura 4.22 – Continua. (e) ZF2 em área de floresta.

As Figuras 4.24 e 4.25 mostram os ciclos diurnos observado e simulado para a variável umidade relativa. Uma característica presente em todas as estações de área urbana é que o modelo apresenta uma deficiência em representar o horário de mínima umidade relativa, atrasando em praticamente 3 horas em relação ao dado observado. Para a estação em área de floresta, em Manaus, o modelo consegue de forma satisfatória simular o ciclo diurno de umidade relativa. Os resultados também mostram que a simulação LEAF é mais úmida que a CTRL, indicando assim a melhor performance do modelo BRAMS acoplado ao esquema TEB em simular as características de umidade em área urbana. Possivelmente esta diferença observada deve-se ao fator conteúdo de água no solo para o período simulado. Considerando que a umidade relativa é uma variável diretamente relacionada com a temperatura, pequenos erros no horário de máxima temperatura também podem afetar o horário de mínima umidade relativa. Outro fator que influencia de forma direta os valores simulados de umidade relativa é que o esquema TEB não armazena água em superfície e o tratamento realizado pelo LEAF para a classe de vegetação urbana também apresenta característica de menor armazenamento de água no solo, sendo assim, a baixa disponibilidade de água para evaporação apresentou direta relação com os valores apresentados.

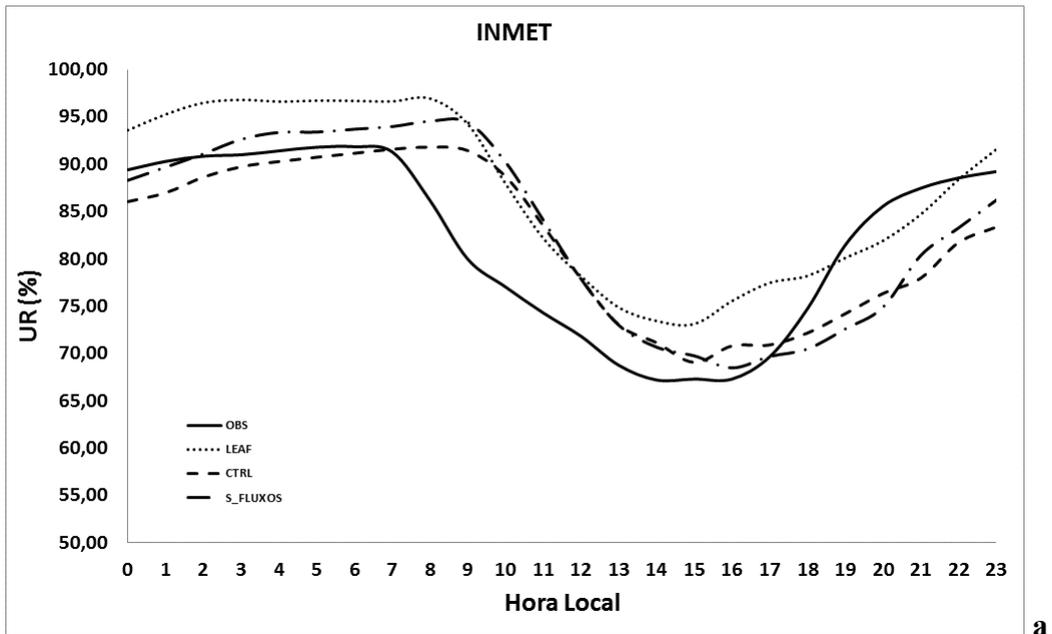


a

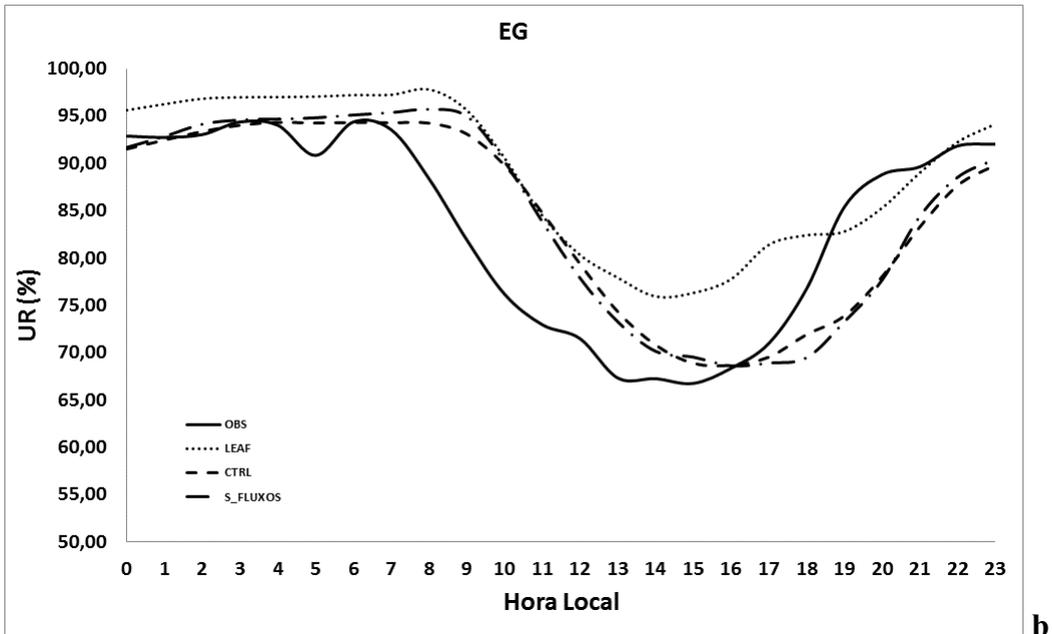


b

Figura 4.23 – Ciclo diurno da temperatura observada e simulada em Belém nos diferentes experimentos para as estações do (a) INMET e (b) aeroporto internacional de Belém.

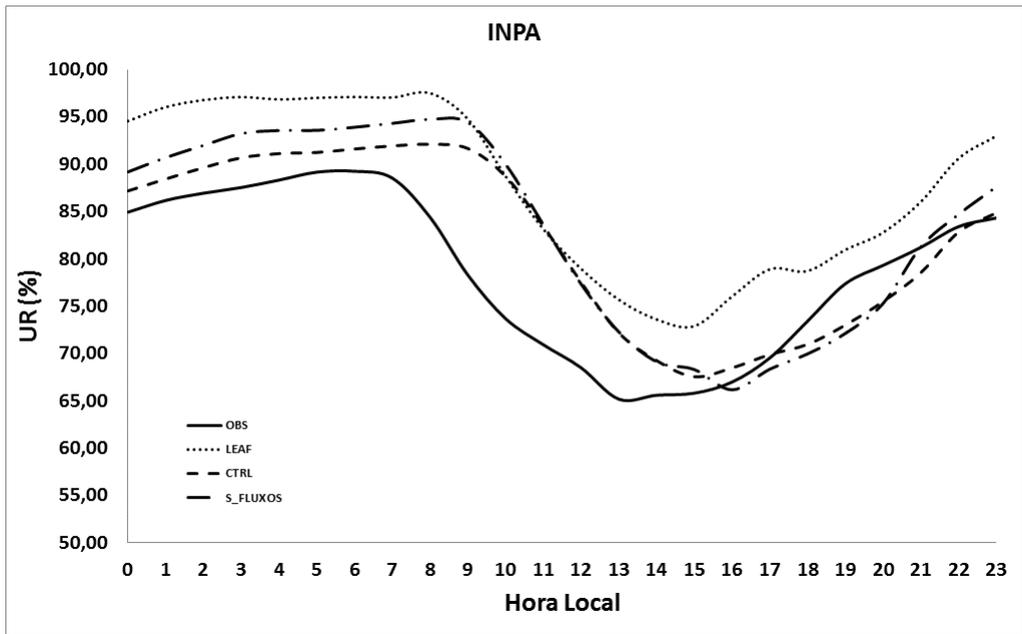


a

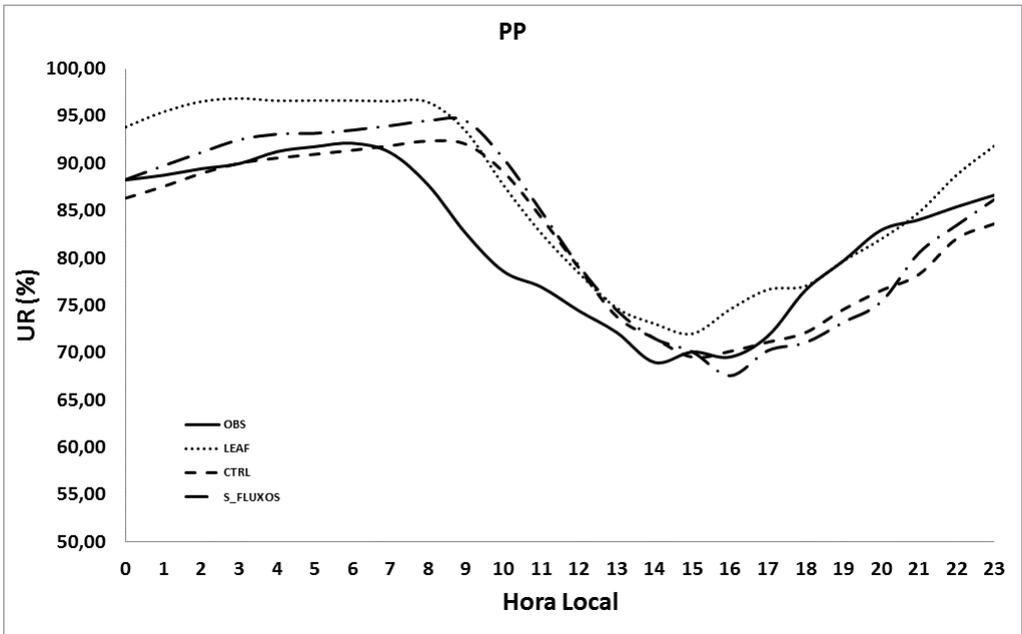


b

Figura 4.24 – Ciclo diurno da umidade relativa observada e simulada em Manaus nos diferentes experimentos para as estações do (a) INMET, (b) aeroporto Eduardo Gomes. (continua)



c



d

Figura 4.24 – Continuação. (c) INPA, (d) aeroporto de Ponta Pelada. (continua)

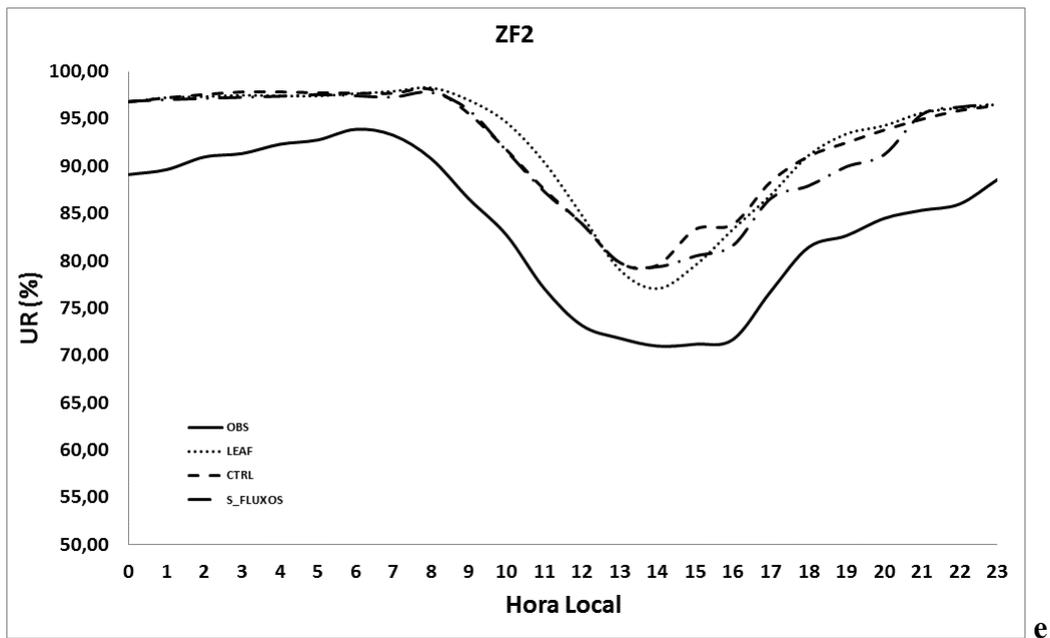


Figura 4.24 – Continuação. (e) ZF2 em área de floresta.

Os resultados apresentados nesta parte inicial demonstram que o modelo possui um bom desempenho em simular os ciclos diurnos de temperatura e umidade nas cidades de Manaus e Belém, características essenciais para o estudo da ICU e possíveis impactos do crescimento urbano. Nota-se o melhor desempenho das simulações com o esquema TEB ativado, principalmente quando os fluxos antropogênicos foram representados de forma realista. Estes resultados também estão de acordo com resultados apresentados por Rozoff et al. (2003) e Freitas et al. (2007), os quais demonstram a melhor performance do modelo RAMS quando acoplado com o esquema de dossel urbano TEB em simular as características atmosféricas em área urbana.

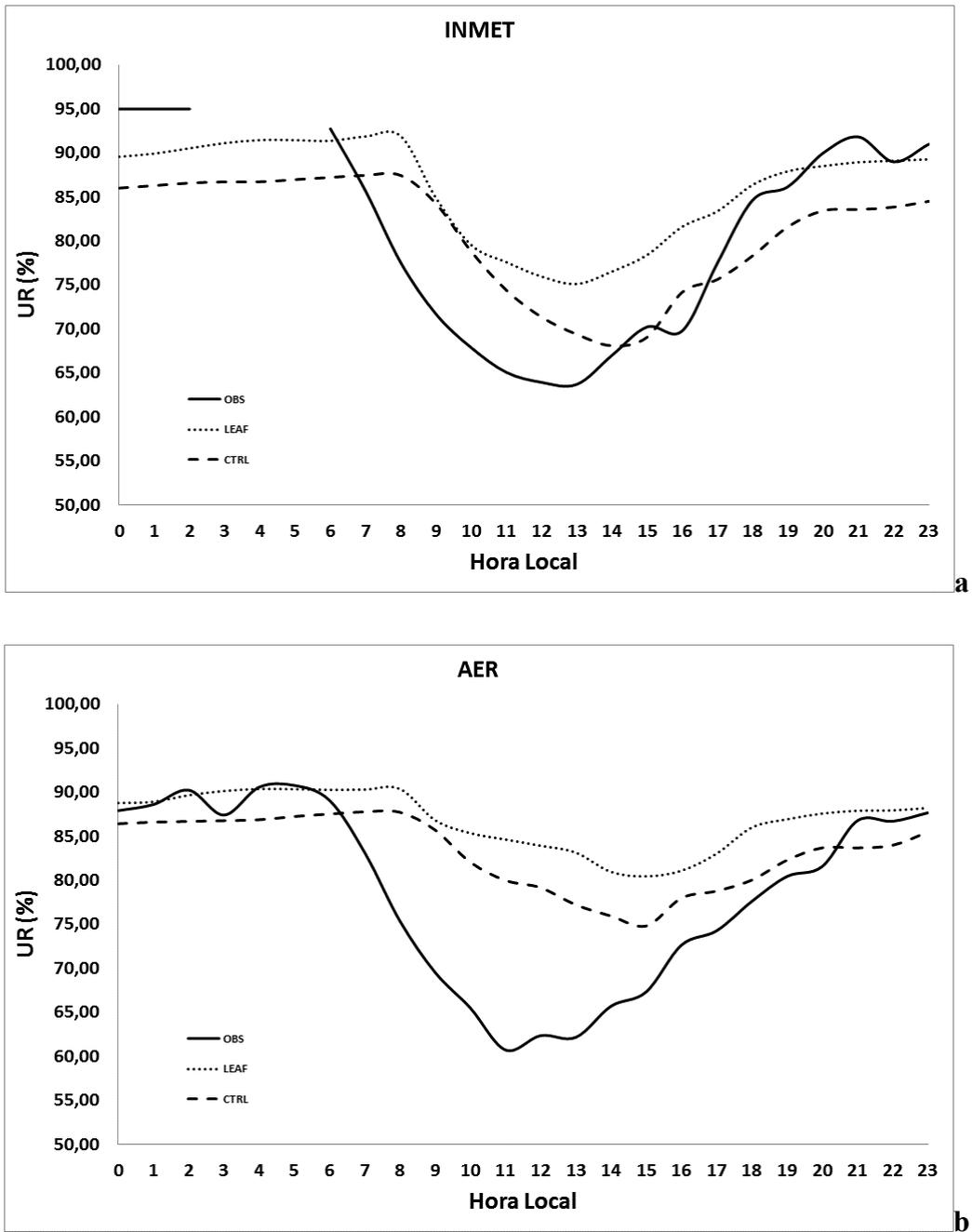


Figura 4.25 – Ciclo diurno da umidade relativa observada e simulada em Belém nos diferentes experimento para as estações do (a) INMET e (b) aeroporto internacional de Belém.

4.5.2 ICU e o crescimento urbano das cidades de Manaus e Belém

A análise da ICU da cidade de Manaus realizada anteriormente apenas demonstrou a presença e intensidade do fenômeno, mas da forma como proposto no estudo, não consegue elucidar alguns dos principais efeitos da ICU sobre a atmosfera como, por exemplo, formação e/ou mudanças das circulações locais. Além disso, o estudo realizado não permitiu o conhecimento dos efeitos futuros da ICU sobre a atmosfera local relacionado ao crescimento urbano. A falta de conjuntos de dados observacionais horários, tanto em área urbana quanto em regiões adjacentes, para um período de tempo suficiente para uma análise observacional mais criteriosa, não possibilitou a análise da ICU de Belém.

Assim, com o objetivo de identificar através da modelagem atmosférica o processo de formação e intensificação da ICU de Manaus e Belém, e quais as influências do crescimento urbano sobre o microclima local, nesta seção são discutidas os resultados das simulações numéricas descritas na seção anterior. Considerando que não foi realizado um estudo observacional sobre a ICU de Belém, a análise deste fenômeno foi feita apenas a partir de simulações numéricas com o modelo BRAMS.

Considerando o crescimento urbano observado através das imagens de satélite e apresentado nas seções anteriores deste Capítulo, foram gerados arquivos contendo informações de usos e cobertura da terra que consideraram a dimensão da área urbana das cidades de Manaus e Belém referente ao ano de 1973, configurando assim o EXPPAS. Neste mesmo sentido, baseado nas informações apresentadas sobre a tendência de crescimento da área urbana observado nos últimos 30 anos, também foi gerado um arquivo de usos e cobertura da terra no qual está representada uma possível representação da futura área urbana das cidades de Manaus e Belém (EXPFUT). O experimento controle (EXPCTRL) utilizou o novo mapa de usos e cobertura da terra, descrito na seção de metodologia, considerando a dimensão urbana das cidades de Manaus e Belém referente ao ano de 2008. Estes arquivos foram então utilizados pelo modelo BRAMS para gerar as condições de superfície que o modelo necessita durante a rodada. As Figuras 4.26 a 4.31 ilustram os cenários da área urbana de Manaus e Belém utilizados nas simulações, com espaçamento de grade de 1 km e referente à grade 3 dos experimentos. Os valores apresentados são referentes às classes de vegetação e usos da terra do modelo LEAF-3 (Tabela 4.11). Ressalta-se que para o EXPPAS o valor dos

fluxos antropogênicos utilizados no EXPCTRL foram reduzidos pela metade e no EXPFUT estes valores foram duplicados. Vale salientar também que o cenário de crescimento da área urbana respeitou os limites da Reserva Duke, em Manaus, de áreas de proteção em Belém, e de corpos de água presentes na região. Outra característica considerada foi a expansão da área urbana de Manaus no sentido da BR-174, seguindo a tendência de crescimento observada durante o estudo. Para Belém, considerou-se a direção predominante de crescimento avaliada anteriormente através da tendência de crescimento entre os anos de 1973 e 2008.

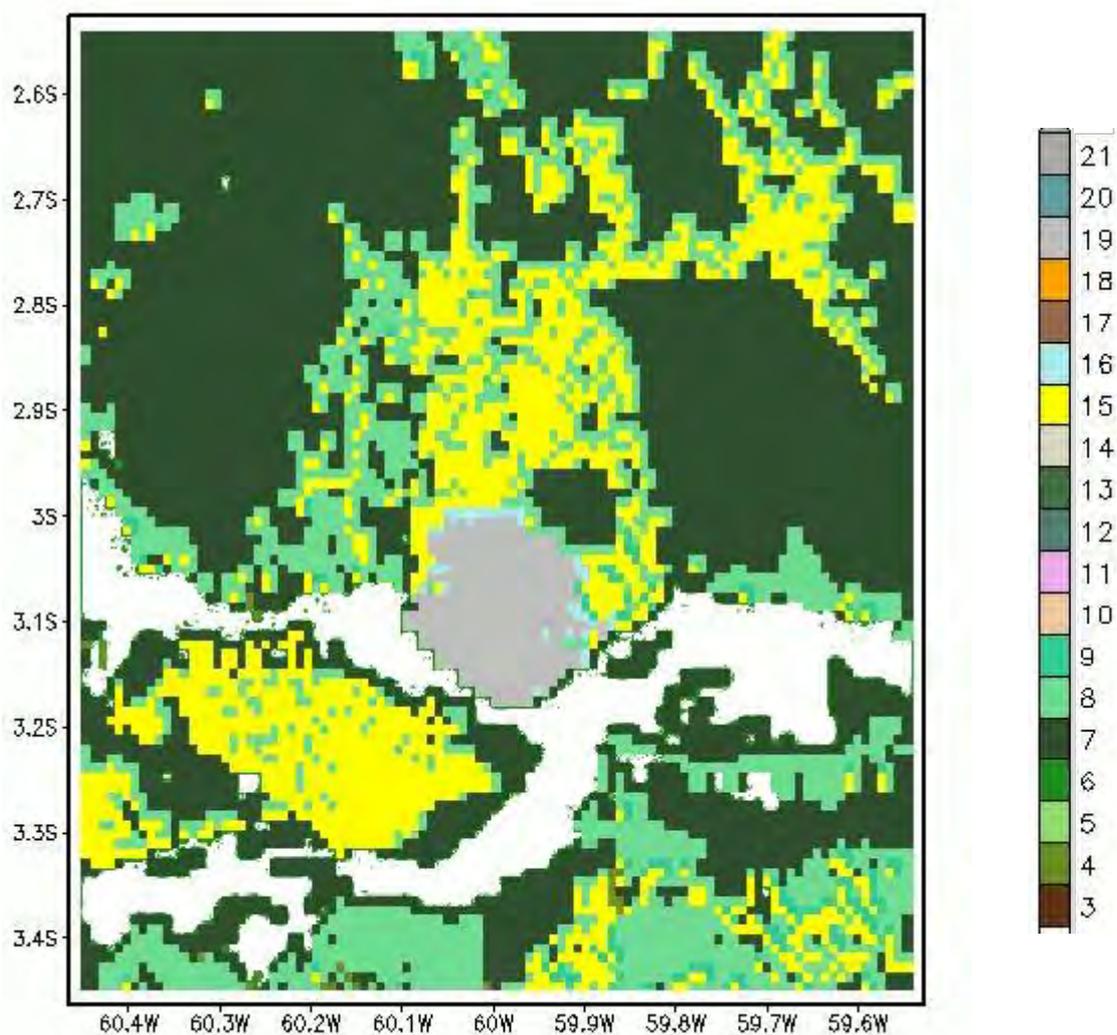


Figura 4.26 – Mapa de uso e cobertura da terra em Manaus para o ano de 2008 gerado pelo modelo BRAMS e utilizado durante as simulações do EXPCTRL.

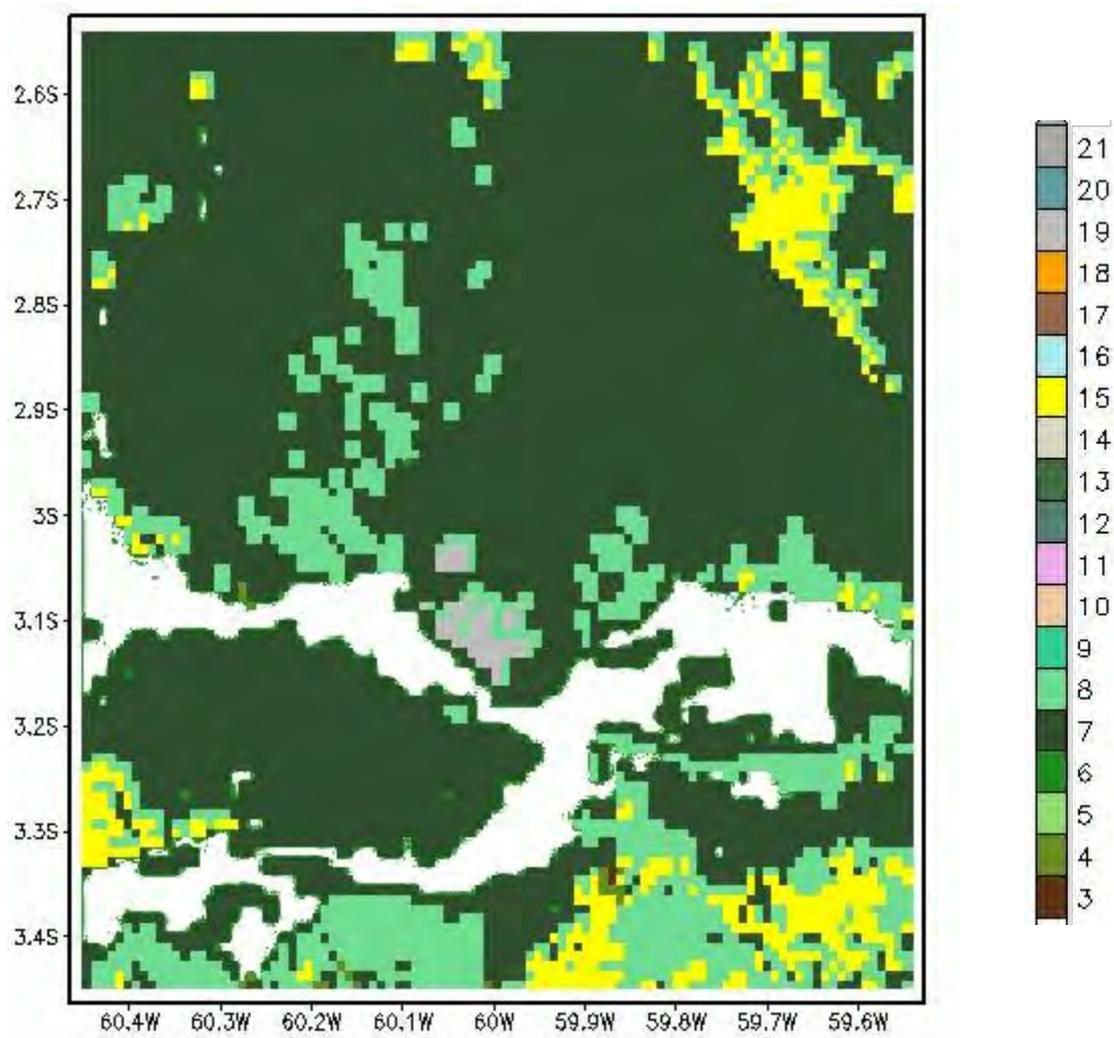


Figura 4.27 – Mapa de uso e cobertura da terra em Manaus para o ano de 1973 gerado pelo modelo BRAMS e utilizado durante as simulações do EXPPAS.

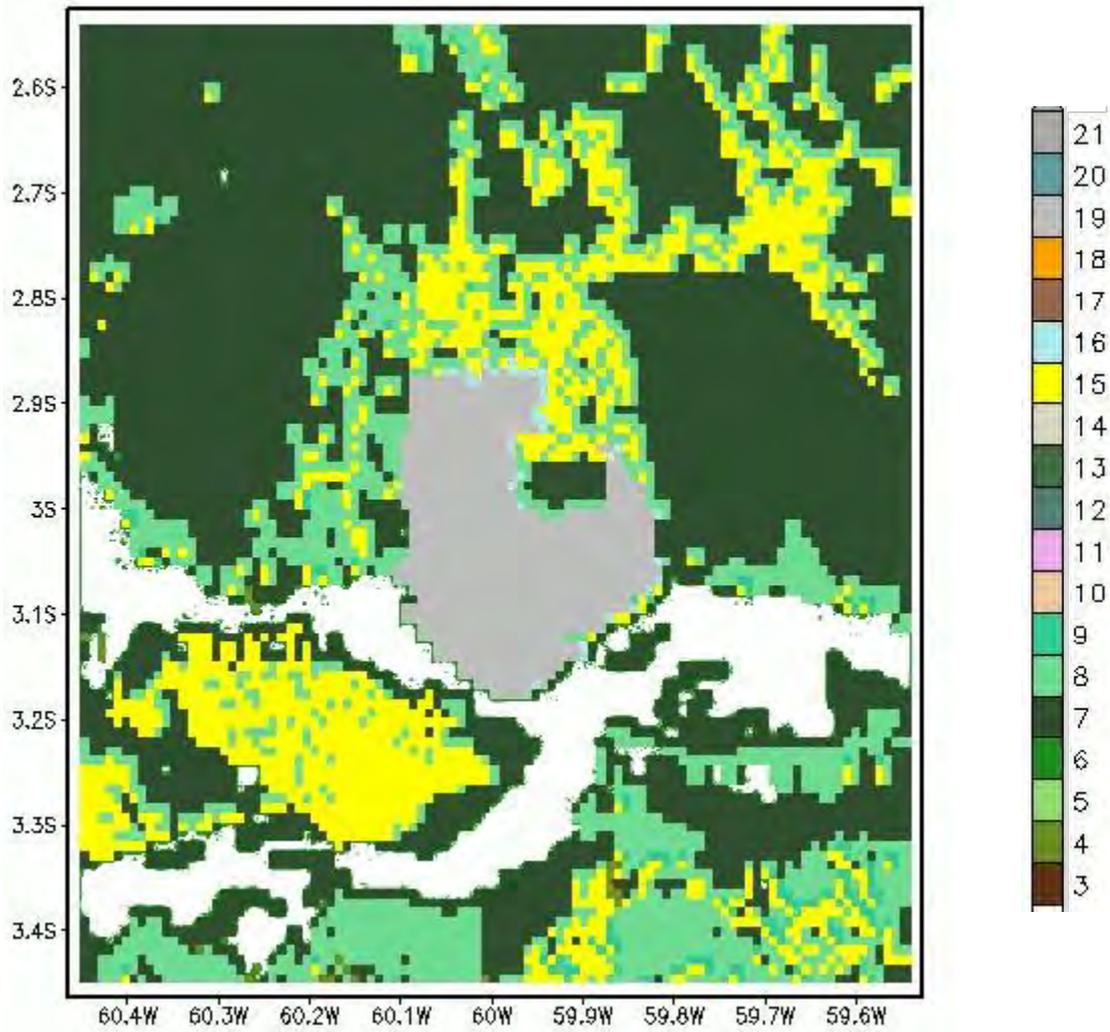


Figura 4.28 – Mapa de uso e cobertura da terra em Manaus para o futuro gerado pelo modelo BRAMS e utilizado durante as simulações do EXPFUT.

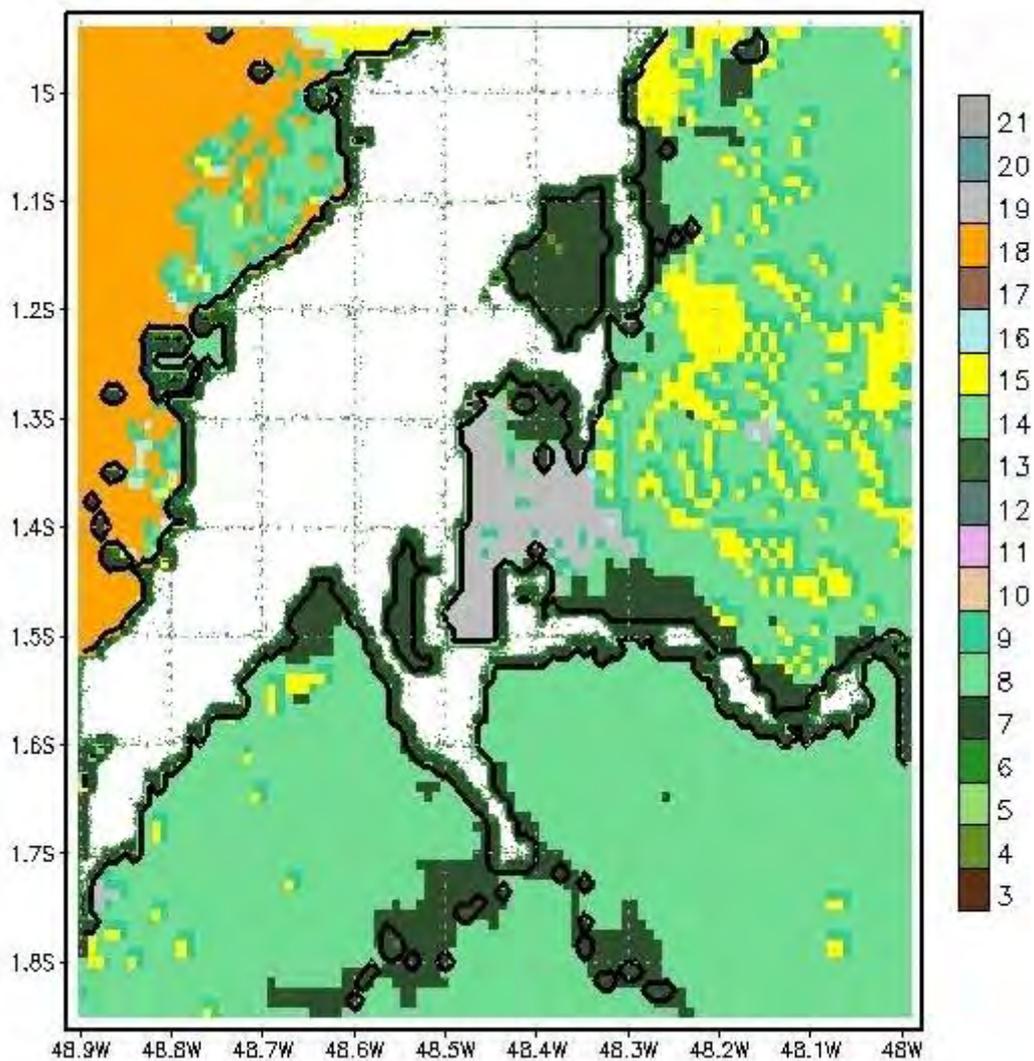


Figura 4.29 – Mapa de uso e cobertura da terra em Belém para o ano de 2008 gerado para o modelo BRAMS e utilizado durante as simulações do EXPCTRL.

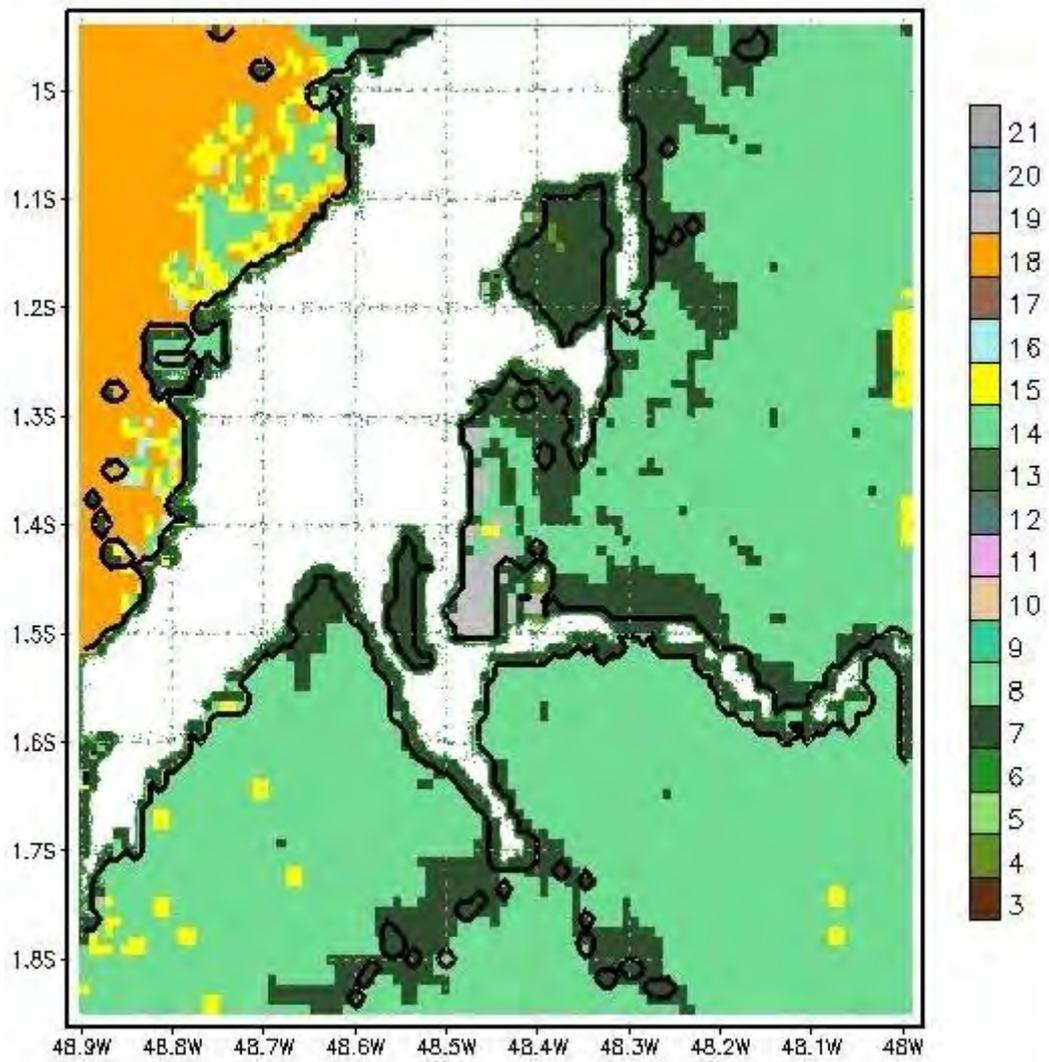


Figura 4.30 – Mapa de uso e cobertura da terra em Belém para o ano de 1973 gerado para o modelo BRAMS e utilizado durante as simulações do EXPPAS.

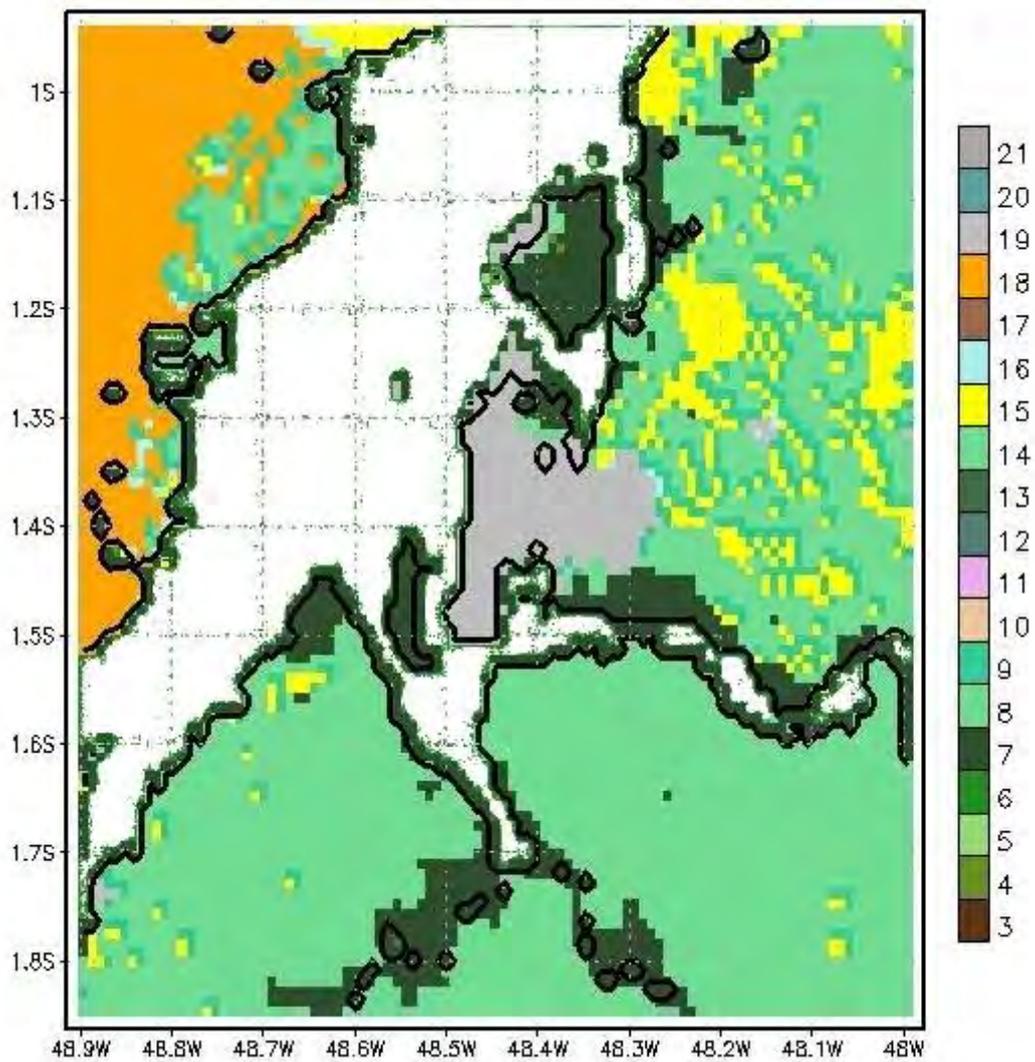


Figura 4.31 – Mapa de uso e cobertura da terra em Belém para o futuro gerado para o modelo BRAMS e utilizado durante as simulações do EXPFUT.

Tabela 4.11 – Classes de cobertura e usos da terra do modelo de interação SVAT LEAF-3

Código LEAF	Tipo de uso do solo
3	Deserto, solo nu
4	Coníferas sempre-verdes
5	Coníferas decíduas
6	Decíduas de folhas largas
7	Sempre-verdes de folhas largas
8	Gramma curta
9	grama alta
10	Semi-árido
11	Tundra
12	Abustos sempre-verde
13	Arbustos decíduos
14	Bosque
15	Cultivos
16	Cultivos irrigados
17	Pântano, brejo
18	Cerrado
19	Urbano
20	Sempre-verde de folhas largas de banhado
21	Urbano intenso

Considerando que o EXPCTRL refere-se à simulação CTRL apresentada na seção anterior, as estatísticas que comprovam a eficiência do modelo em representar as variáveis meteorológicas observadas foram satisfatórias; logo, considera-se que este experimento é o estado ótimo da atmosfera para o período de 01/06/2008 a 30/06/2008. Os resultados analisados nesta seção são médias horárias para o período de 02/06/2008 a 30/06/2008, desconsiderando-se as primeiras 24 horas de simulação as quais são consideradas como o tempo necessário para o modelo se ajustar às condições atmosféricas assimiladas (*spin-up*).

Inicialmente, foi analisada a formação da ICU de Manaus e Belém no EXPCTRL. Foram analisados os campos de temperatura a 2m, razão de mistura do vapor d'água e direção e intensidade do vento no primeiro nível do modelo, aproximadamente 20m de altura (Figuras 4.32 e 4.33). Os valores foram calculados como médias para todo o período de simulação. Também foi analisado o campo de advecção de temperatura, com

o objetivo de analisar a influência da floresta e dos corpos d'água na formação da ICU de Manaus.

Pode-se observar que a área urbana é mais quente em até 2,5°C e mais seca que a região adjacente, mostrando assim o efeito da ICU da cidade de Manaus. Estes resultados também foram observados nos dados observacionais, evidenciando que o modelo apresenta-se eficiente em representar a ICU da cidade. Em Belém também observa-se esta diferença, onde a área urbana é aproximadamente 1°C mais quente que a região adjacente. Esta característica também é observada nos dados de razão de mistura do vapor d'água, em que uma região mais seca é observada sobre as duas cidades, com diferenças próximas a 0,8 g/kg. Nota-se que existe um formato de ilha nos campos de razão de mistura e temperatura, exatamente de acordo com a definição de ICU apresentada na revisão bibliográfica.

Os resultados para o campo de direção e intensidade do vento em Manaus mostram um escoamento praticamente de leste sobre toda a grade analisada, o que possivelmente é influenciado pelo escoamento de grande escala. Nota-se que a direção e intensidade do vento são modificadas sobre a área urbana, aumentando sua intensidade e tornando o escoamento de noroeste. A presença da área urbana e o gradiente térmico formado entre esta e o rio e a floresta, apresenta grande influência sobre o escoamento. O ar mais frio presente em área de floresta e sobre o rio tende a escoar em direção à área urbana que, juntamente com o escoamento de grande escala, intensifica o vento sobre a cidade. Em Belém nota-se que o campo de vento em superfície médio para todo o período de simulação, apresenta direção predominante de nordeste sobre praticamente toda a grade. Este escoamento é diretamente influenciado pela circulação de grande escala, mostrando a presença dos ventos alísios sobre a região. Juntamente a este escoamento, não se pode descartar a presença de um escoamento de brisa marítima, visto a proximidade da área urbana de Belém do Oceano Atlântico tropical. O escoamento simulado sobre a área de estudo não evidencia de forma clara nenhuma circulação de brisa fluvial, mas este tipo de fenômeno não pode ser descartado. Para as duas cidades, assim como observado por Freitas et al. (2007) em São Paulo, a presença da área urbana intensifica circulações do tipo brisa.

Analisando o campo de advecção de temperatura nota-se que existe uma forte advecção fria na porção oeste da área urbana de Manaus e um advecção quente à leste. Já em

Belém observa-se que existe uma forte advecção fria à leste e norte da área urbana de e uma advecção quente ao sul da area urbana. Esta advecção fria está diretamente relacionada com o escoamento de ar mais frio da região de floresta e de áreas adjacentes à cidade, como também relacionado com a direção da brisa fluvial, no caso de Manaus, e da brisa marítima e fluvial, no caso de Belém, enquanto que a advecção quente observada à leste, para Manaus e ao sul em Belém, está diretamente relacionada ao escoamento mais quente oriundo da área urbana.

Logo, nota-se um padrão de resfriamento da área urbana de Manaus à oeste e um aquecimento à leste, o que também deixa claro que a ICU de Manaus possui grande influência no escoamento. Na Figura 4.5.2.4d também fica claro uma advecção fria sobre praticamente toda fronteira do rio com o continente, mostrando assim a formação e influência da brisa fluvial na área de estudo, como também a eficiência no modelo em representar este tipo de fenômeno.

Em Belém, a advecção quente observada ao sul da cidade deixa claro que o ar quente presente sobre a área urbana escoar em direção sul, sobre o rio e área de floresta adjacente. O comportamento observado para a advecção de temperatura mostra que possivelmente existe um escoamento de brisa formado pelo contraste térmico entre a cidade e área vizinhas. Outra característica que pode ser observada é que com a advecção fria à leste e norte do município, estas regiões tendem a ser mais frias que as demais áreas do município.

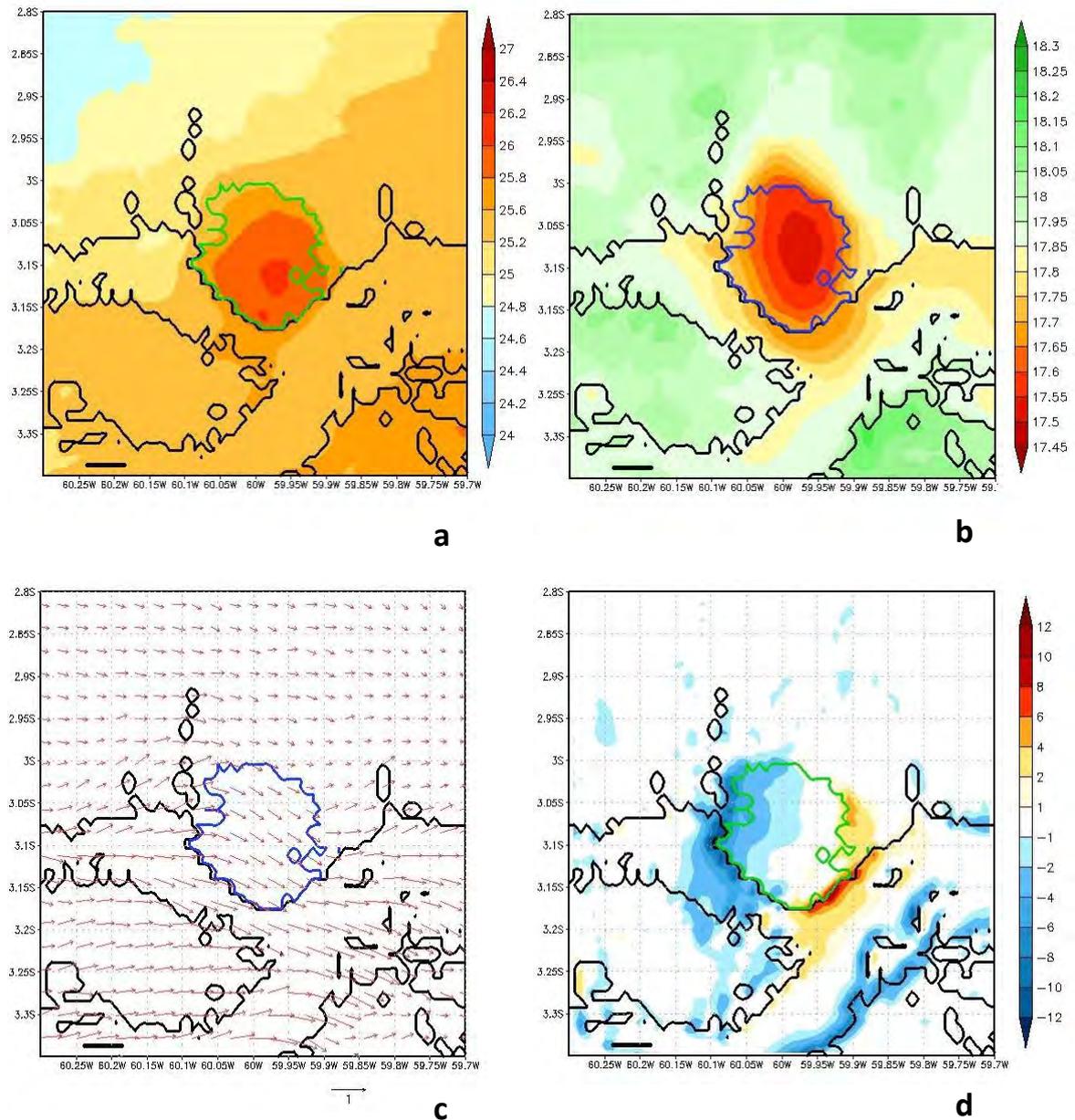


Figura 4.32 – Campo médio para o período de 02/06/2008 a 30/06/2008, em Manaus, para as variáveis (a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), (b) razão de mistura do vapor d'água (g/kg), (c) vento (m/s) e (d) advecção de temperatura ($^{\circ}\text{Cm/s}$). Áreas com contorno preto representam os limites continente e corpos de água. Áreas com contorno azul e verde representam a área urbana de Manaus no EXPCTRL.

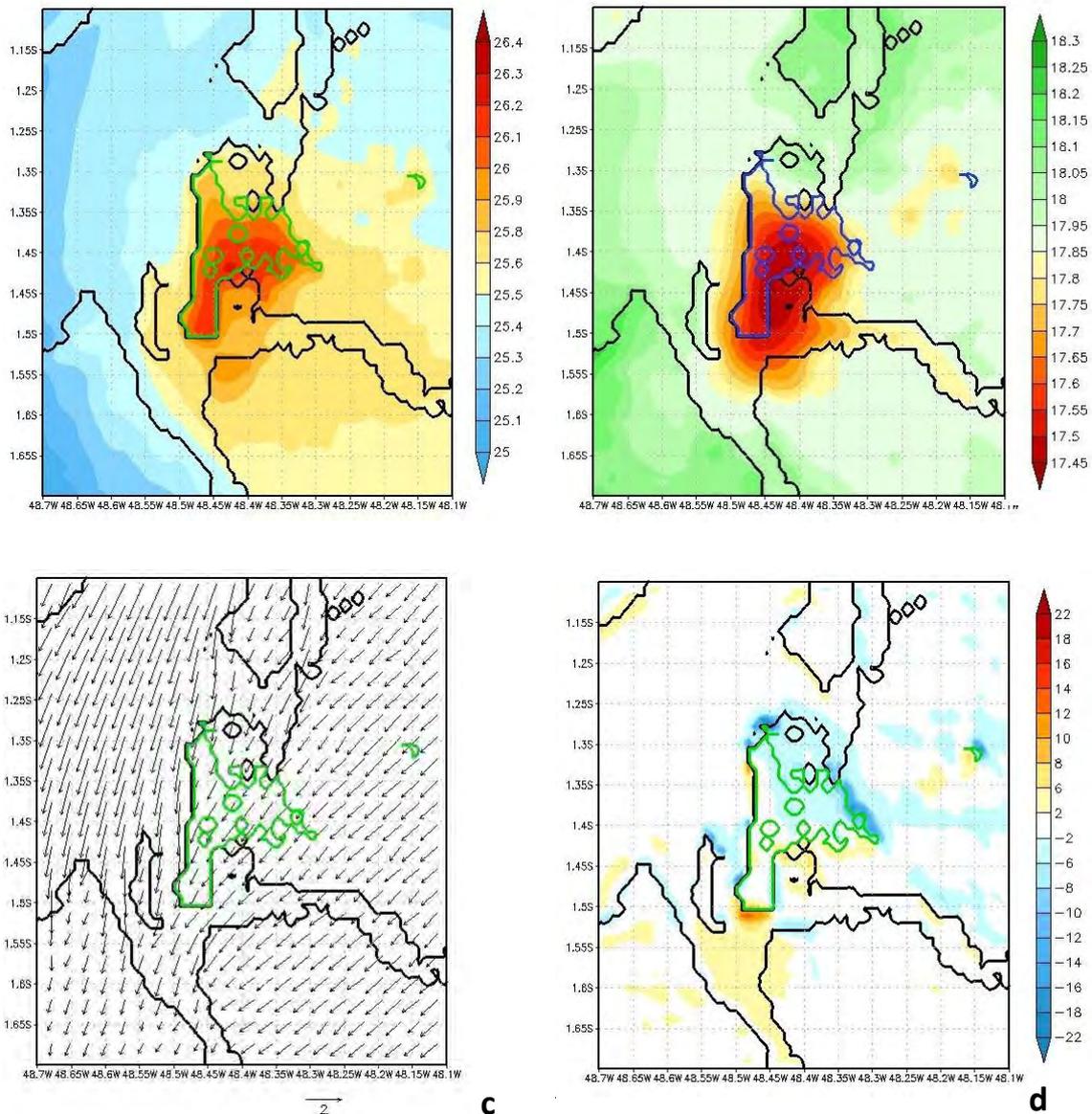


Figura 4.33 – Campo médio para o período de 02/06/2008 a 30/06/2008, em Belém, para as variáveis (a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), (b) razão de mistura do vapor d'água (g/kg), (c) vento (m/s) e (d) advecção de temperatura ($^{\circ}\text{Cm}/\text{s}$). Áreas com contorno preto representam os limites continente e corpos de água. Áreas com contorno azul e verde representam a área urbana de Belém no EXPCTRL.

Considerando que os resultados mostram uma circulação do tipo brisa, diretamente relacionado com a interação entre área urbana e áreas adjacentes, de floresta e corpos de água, foi analisado o perfil vertical médio horário das componentes zonal e meridional do vento, velocidade vertical do vento, temperatura potencial e razão de mistura do vapor d'água para o período de estudo. Desta forma, procura-se entender o papel da área

urbana no desenvolvimento de circulações locais assim como no desenvolvimento da Camada Limite Planetária (CLP). As médias apresentadas nas figuras foram calculadas para o quadrado representante de cada área urbana estudada.

Em Manaus, o perfil de temperatura potencial, vento zonal e vertical (Figura 4.34a) mostra um escoamento de oeste para leste durante praticamente toda noite, manhã e início da tarde, entre as 03UTC (23 HL) e 17UTC (13HL). Nota-se que este escoamento possui uma componente zonal positiva entre a superfície e 300m de altura e uma componente zonal negativa a partir de 600m. A componente presente mais próxima à superfície indica uma circulação local no sentido rio/floresta para cidade, caracterizando assim uma circulação do tipo brisa, formada como consequência do gradiente térmico entre área urbana e o rio/floresta.

A Figura 4.34b mostra o perfil para temperatura potencial, componente meridional e vertical do vento. Pode-se observar mais claramente neste perfil que existe uma célula de circulação local bem definida entre a área urbana e o rio. Um escoamento com sentido cidade para rio é observado a partir da superfície até 300m de altura entre as 01UTC (21HL) e 13UTC (09HL), com uma célula de circulação bem definida entre 21HL e 05HL. Este escoamento é consequência do contraste de temperatura entre o rio e a área urbana, que neste horário encontra-se mais fria que o rio, principalmente devido às propriedades da superfície urbana. Com o início do aquecimento da superfície urbana como função da radiação solar incidente, nota-se que o escoamento inverte seu sentido, com um escoamento do rio para área urbana, com maior intensidade e estendendo-se em praticamente toda CLP.

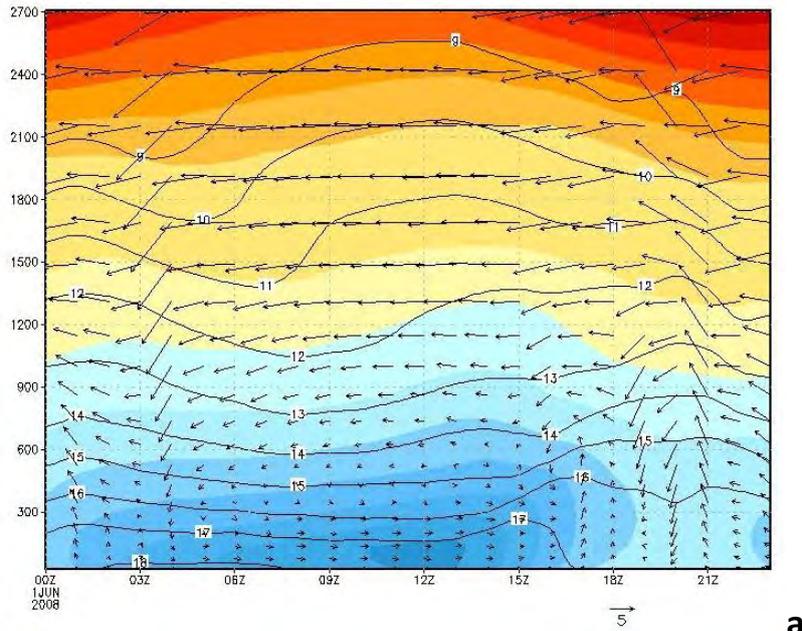
Em Belém, o perfil de temperatura potencial, vento zonal e vertical e razão de mistura do vapor d'água (Figura 4.35a) mostra um escoamento de leste para oeste durante praticamente toda a noite e manhã, entre as 00UTC (21 HL) e 14UTC (11HL). Observa-se que este escoamento de leste para oeste está presente em praticamente toda a camada analisada, mas com maior intensidade em níveis superiores a 300m, não definindo uma célula de circulação. Com o aquecimento diurno, devido à maior incidência de radiação pode-se observar que um escoamento vertical intenso inicia, próximo as 12HL, estendendo-se até praticamente 2400m de altura. Este escoamento está diretamente relacionado à maior flutuabilidade do ar próximo à superfície urbana, que por efeito de

empuxo tende a subir, intensificando assim o movimento vertical e praticamente suprimindo o escoamento zonal antes observado.

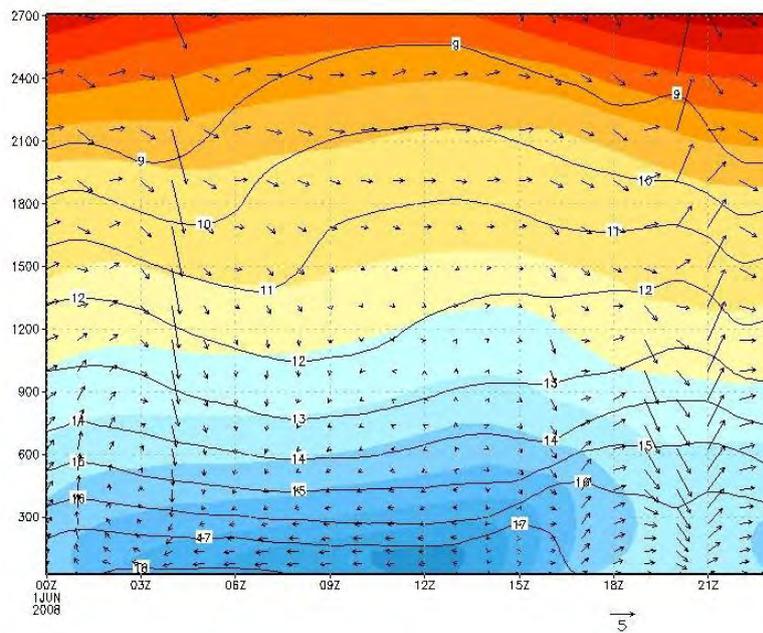
A Figura 4.35b mostra o perfil para temperatura potencial, componente meridional, vertical do vento e razão de mistura do vapor d'água. Neste perfil fica clara a formação de uma célula de circulação entre a superfície e 2700m de altitude entre as 21HL e 10HL. Próximo à superfície até praticamente 500m observa-se um escoamento de norte, com intensidade moderada. Acima desta camada observa-se a formação de uma corrente de retorno com sentido oposto, definindo assim uma célula de circulação, que possivelmente evidencia a circulação de brisa marítima e fluvial sobre a região. Assim como observado para a componente zonal, com o aquecimento mais intenso da superfície urbana forma-se um intenso escoamento vertical que estende-se até 2700m de altitude.

Estes resultados evidenciam o papel da área urbana na formação e intensificação de circulações atmosféricas locais na área de estudo, assim como sua influência na formação de convecção. Para o caso de Manaus, nota-se que a brisa formada entre área urbana e floresta é menos intensa do que a formada entre o rio e a cidade. Isto se deve ao maior gradiente térmico formado entre o rio e a cidade do que para floresta, principalmente pelo fator relacionado ao armazenamento de energia no dossel e propriedades físicas em área de floresta mais densa, influenciando de forma direta o BES nestas regiões.

Dos resultados obtidos para Belém, para os dois perfis analisados observa-se que a convecção gera uma mistura de propriedades na vertical, levando ar mais quente e úmido para níveis mais elevados da atmosfera, o que possivelmente contribui para a formação de nebulosidade e precipitação. Outra evidência é que o escoamento de maior escala está presente em níveis superiores a 300m de altura, principalmente quando analisada a componente zonal do vento, mostrando que o escoamento em mais baixos níveis está associado à efeitos locais devido a presença da área urbana. Esta influência fica mais clara quando observado que entre a superfície e 300m há uma inversão no sentido do escoamento com o decorrer do dia, acompanhando assim a formação de um gradiente térmico responsável pela criação de um escoamento de brisa entre a área urbana e regiões adjacentes.

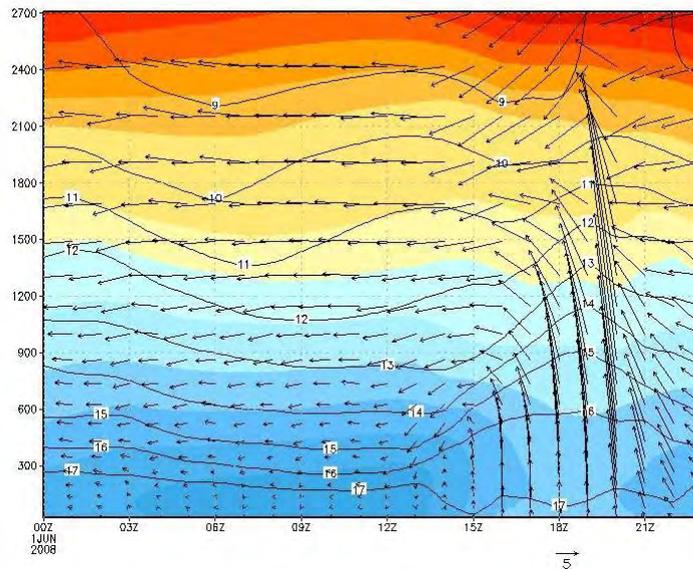


a

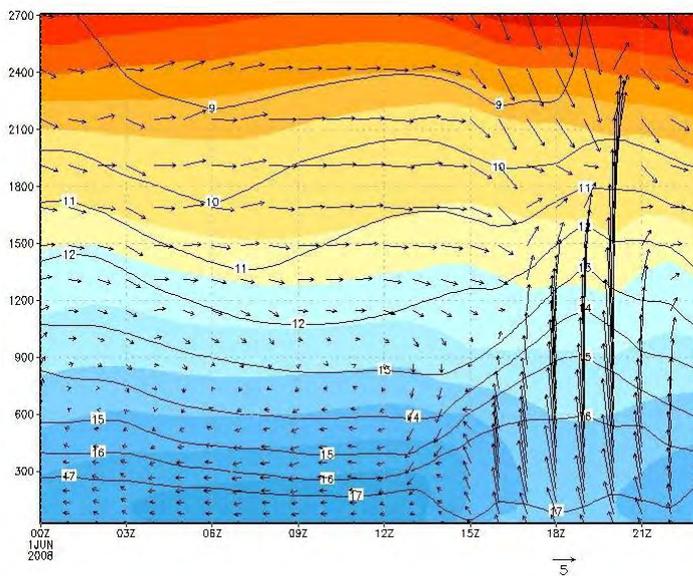


b

Figura 4.34 – Variação diurna média para o período de análise do perfil vertical médio de temperatura potencial, razão de mistura do vapor d'água e componentes (a) zonal e (b) meridional do vento para o EXPCTRL em Manaus.



a



b

Figura 4.35 – Variação diurna média para o período de análise do perfil vertical médio de temperatura potencial, razão de mistura do vapor d'água e componentes (a) zonal e (b) meridional do vento para o EXPCTRL em Belém.

Oliveira e Fitzjarrald (1993) observaram o mesmo padrão de circulação de brisa fluvial sobre a cidade de Manaus através de dados observacionais, com uma componente meridional negativa durante a noite e início da manhã. Assim como observado pelos autores, os resultados apresentados aqui evidenciam a presença de um jato noturno em baixos níveis, na camada entre 100m e 300m, associado com a formação da brisa

fluvial. A principal forçante deste sistema, como citado pelos autores, e observado nos resultados das simulações, é o gradiente térmico formado entre o rio e a área urbana.

A Figura 4.36 mostra a direção e intensidade predominante do vento no EXPCTRL sobre a cidade de Manaus. Assim como observado para os perfis das componentes zonal e meridional, pode-se observar que existe uma rotação no escoamento em superfície, evidenciando assim a formação da brisa fluvial. Estes resultados também estão em acordo com as análises observacionais realizadas por Oliveira e Fitzjarrald (1993).

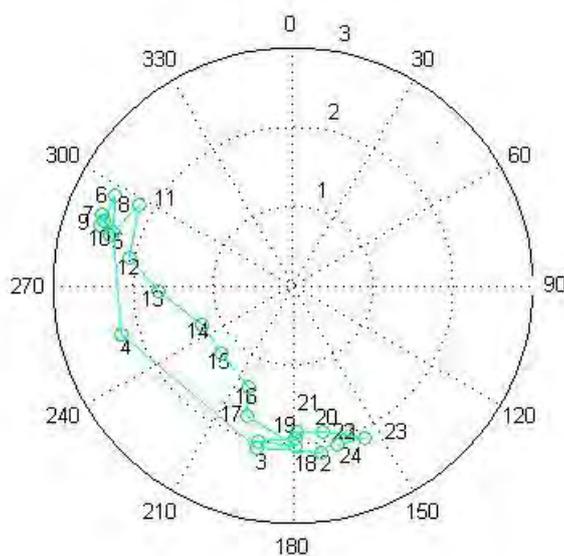


Figura 4.36 – Hodógrafa do vento simulado em Manaus para o EXPCTRL.

O ciclo diurno da intensidade e direção do vento predominante sobre a área urbana de Belém, para as simulações do EXPCTRL, é mostrado na Figura 4.37. Observa-se que entre as 17HL e 09HL o escoamento predominante e mais intenso sobre a cidade de Belém é de norte/nordeste, modificando para noroeste entre as 10HL e 16HL, diminuindo sua intensidade. Esta modificação na direção e intensidade do escoamento possivelmente evidencia a formação de um escoamento entre o rio e a área urbana de Belém, formado pelo contraste térmico entre a cidade e o rio. Este escoamento é menos intenso pois sofre grande influência do escoamento de grande escala de norte/nordeste.

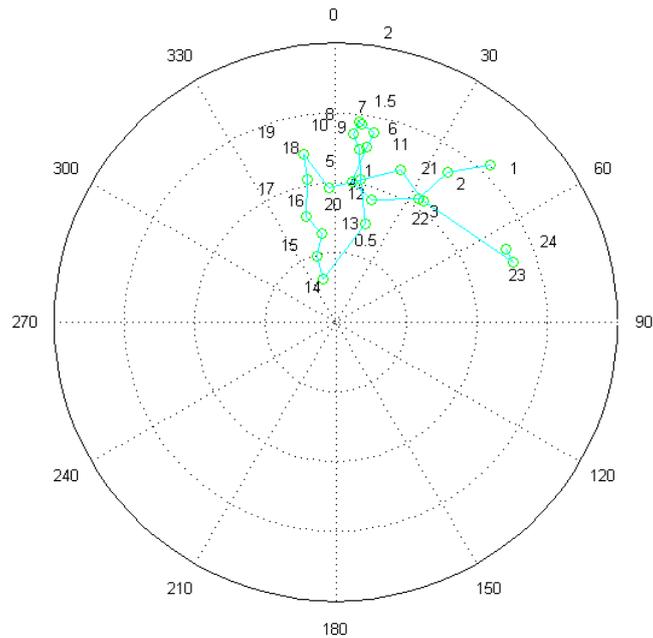


Figura 4.37 – Hodógrafa do vento simulado em Belém para o EXPCTRL.

Os valores simulados de razão de mistura (R) sobre as duas áreas urbanas em estudo (Figuras 4.38 e 4.39) mostram que há uma queda no meio do dia, seguido por uma elevação. Em Manaus, nota-se que o máximo valor de R ocorre às 00 HL, horário de máximo escoamento sentido rio para a área urbana. Este comportamento evidencia a influência da circulação de brisa fluvial, observada nos campos de vento analisados anteriormente, no transporte de umidade para a área urbana. Diferentemente do observado para Manaus, observa-se que o máximo valor de R ocorre as 17 HL em Belém, horário em que é observado o final do intenso movimento vertical e tem-se início o escoamento de norte/nordeste. Este comportamento deixa claro que o escoamento de grande escala apresenta grande influência no transporte de umidade para a área urbana de Belém.

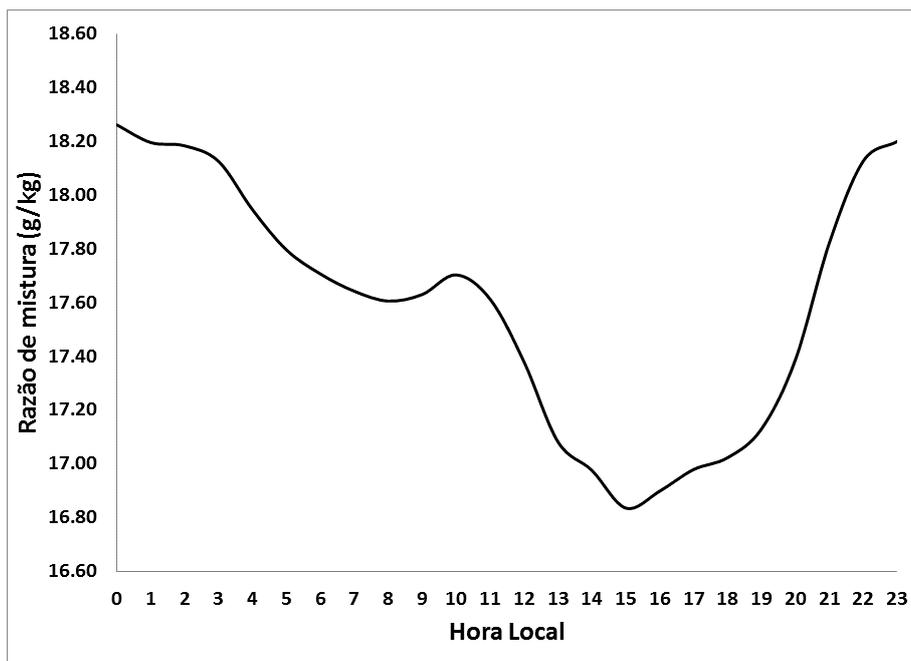


Figura 4.38 – Ciclo diurno médio para o período de análise da razão de mistura do vapor d’água (g/kg) simulado no EXPCTRL em Manaus.

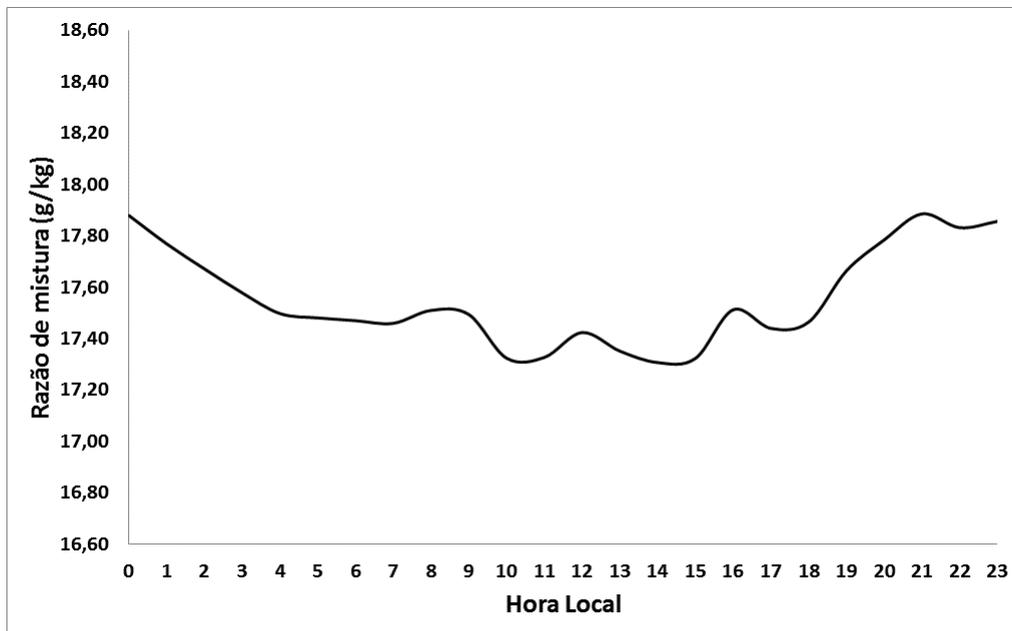


Figura 4.39 – Ciclo diurno médio para o período de análise da razão de mistura do vapor d’água (g/kg) simulado no EXPCTRL em Belém.

Os perfis de temperatura potencial (THETA) e razão de mistura do vapor d’água (R) (Figuras 4.40 e 4.41) mostram a evolução da CLP sobre a área urbana das cidades de

Manaus e Belém e as possíveis influências das circulações locais. Como definição geral, a CLP é a parte da troposfera influenciada diretamente e que responde de forma mais rápida às forçantes da superfície terrestre em uma curta escala de tempo através da transferência de momentum e fluxos de calor sensível e latente (Stull, 1988).

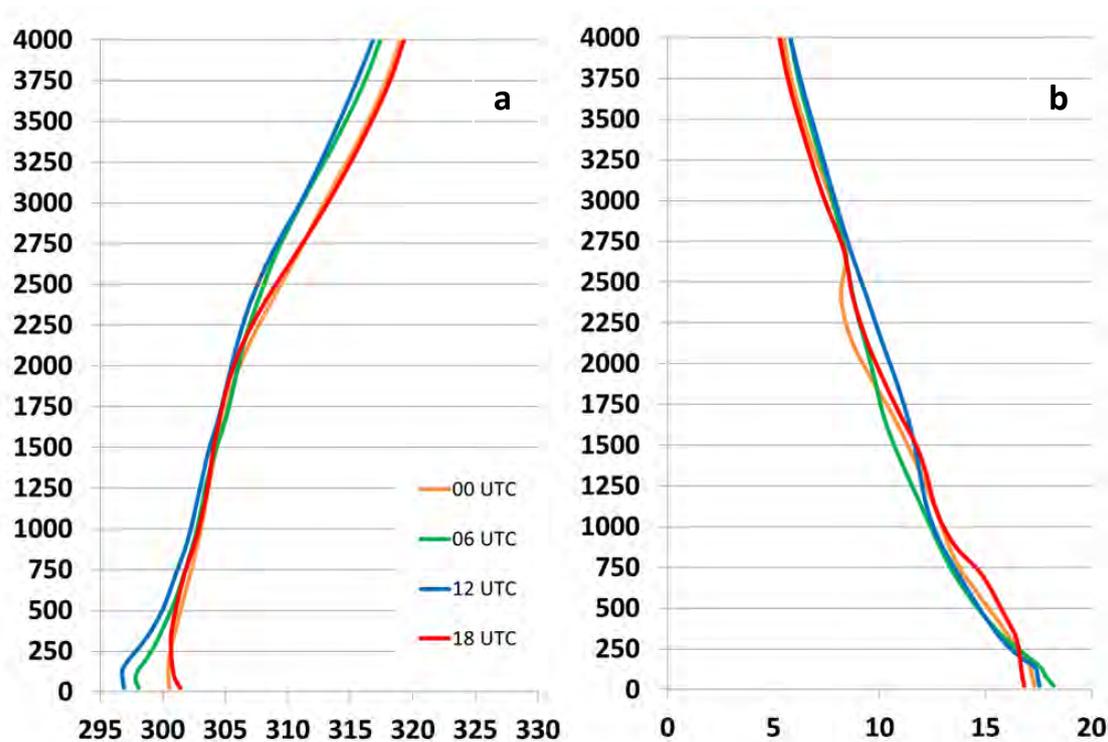


Figura 4.40 – Perfil vertical da (a) temperatura potencial (K) e (b) razão de mistura do vapor d'água, simulados pelo EXPCTRL em Manaus.

Pode-se observar que a CLP sobre a área urbana de Manaus possui uma altura média de aproximadamente 2500m, apresentando uma evolução entre 1500m durante o período da manhã, até próximo de 2500m no final da tarde e noite. Nota-se também que durante o período noturno e início da manhã existe uma forte camada de inversão entre a superfície e 300m de altura, diretamente relacionada com as circulações locais descritas anteriormente. Sobre esta camada de inversão existe uma mistura, provocada pela célula de circulação observada nas Figuras 4.34a e 4.34b. No período da tarde, horário de máximas temperaturas em área urbana, observa-se uma maior mistura dentro da CLP, formando assim uma camada de mistura bem definida.

Em Belém, observa-se que a CLP sobre a área urbana tem uma altura média de aproximadamente 2000m, apresentando uma evolução entre 1600m durante o período

da manhã até próximo de 2400m no final da tarde e noite. O perfil vertical de THETA também permite verificar que existe uma camada de inversão próxima à superfície até praticamente 250m de altura, principalmente à noite e de manhã, indicando assim a formação de uma camada limite estável, que no decorrer do dia enfraquece e forma-se a camada limite convectiva. O perfil de razão de mistura também evidencia a evolução diurna da CLP sobre a cidade de Belém. Uma característica interessante a ser salientada é que no horário em que são observados os intensos movimentos verticais sobre a área urbana observa-se um aumento no conteúdo de umidade nos níveis mais elevados do perfil, evidenciando assim o papel da convecção gerada pela área urbana da cidade no transporte de propriedades na vertical.

Os resultados discutidos acima demonstram a relação direta do perfil de temperatura em área urbana e a formação e intensificação das circulações locais. O desenvolvimento de uma camada de inversão próxima à superfície fornece suporte termodinâmico para o desenvolvimento de uma circulação do tipo brisa. Com a maior mistura do ar dentro da CLP, os gradientes de temperatura entre as superfícies adjacentes à área urbana são amenizados, influenciando assim de forma direta a permanência e intensidade da circulação local.

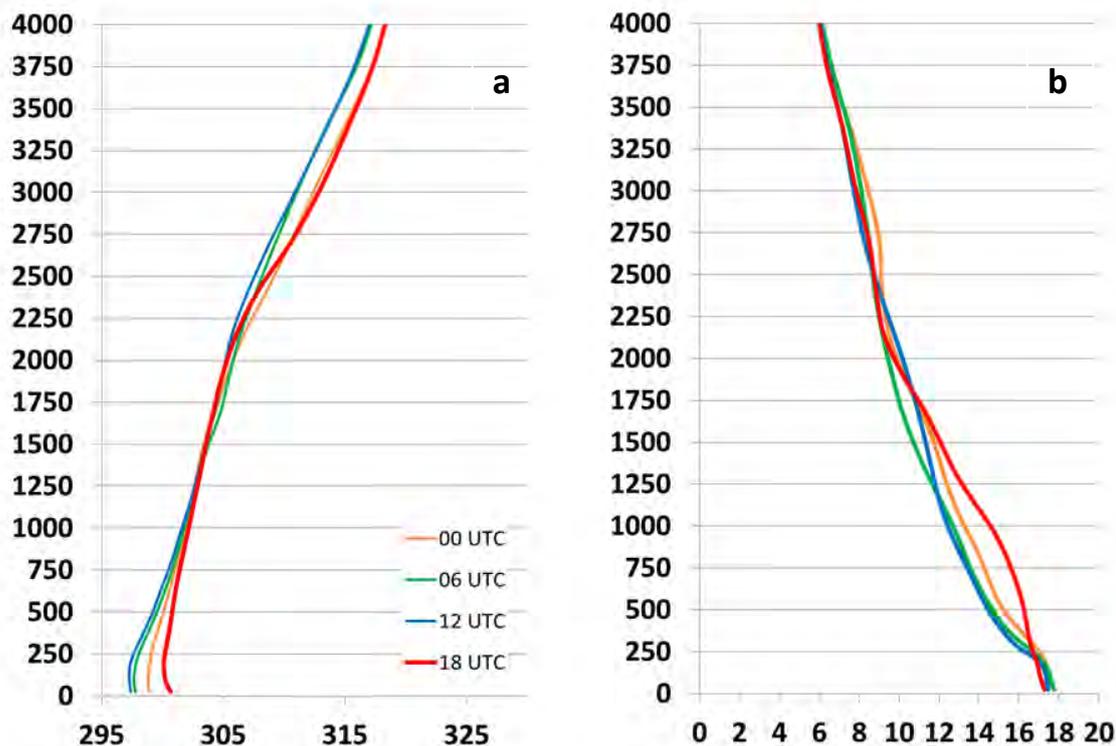


Figura 4.41 – Perfil vertical de (a) temperatura potencial (K) e (b) razão de mistura do vapor d'água simulados pelo EXPCTRL em Belém.

Com o objetivo de analisar a intensidade da ICU das cidades em estudo, foram consideradas as diferenças em Manaus entre a temperatura simulada em área urbana das diferentes estações (INMET, EG, INPA, PP), e a temperatura em área de floresta, semelhante ao realizado para os dados observacionais. Para Belém as diferenças foram realizadas através de comparações entre valores simulados em área urbana, nos pontos referentes às estações INMET e AER, e um ponto localizado fora da influência urbana de Belém, em que o tipo de vegetação e usos da terra representa a classe 7.

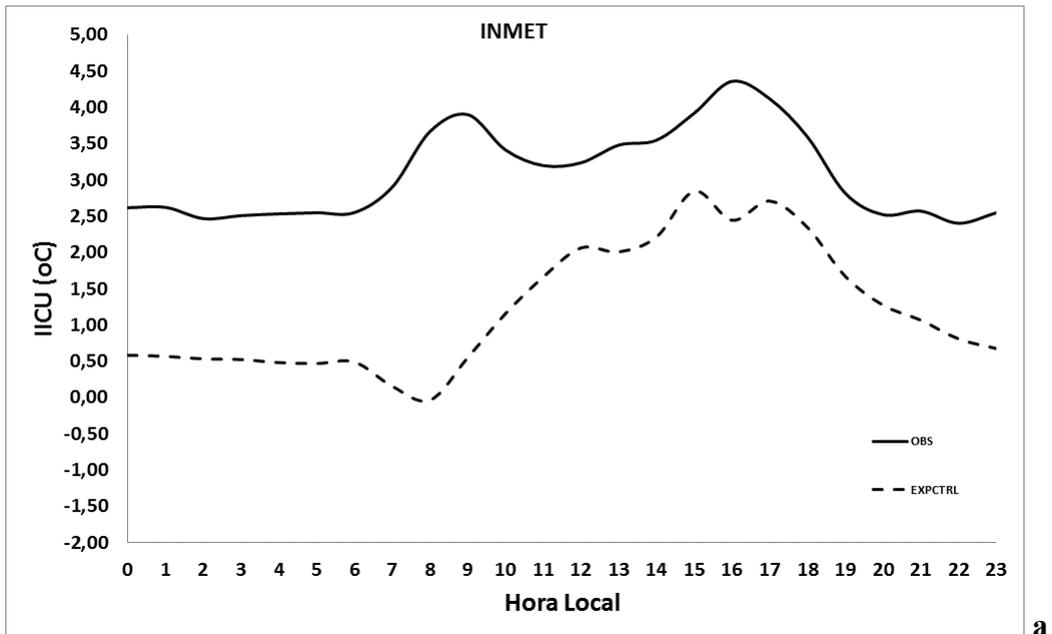
As Figuras 4.42 evidenciam que para o período de 02/06/2008 a 30/06/2008 a intensidade da ICU de Manaus possui dois picos de maior intensidade, assim como observado nas análises observacionais para o período de 2000 a 2008, apresentados no capítulo anterior. Também se pode observar que o modelo consegue simular o comportamento da intensidade da ICU de Manaus de forma satisfatória, mas subestimando os valores principalmente no período da madrugada e início do dia nas estações do INMET e PP, áreas densamente urbanizadas, e superestimando valores nos horários de máxima temperatura nas estações EG e INPA, áreas com maior densidade

de vegetação. Os dois picos observados nos dados observacionais não ficam bem claros nos resultados de modelagem, com um máximo de intensidade as 15 HL, 1 hora atrasado em relação ao segundo máximo observado. A superestimativa observada para as estações EG e INPA ocorreu porque o esquema TEB não considera áreas vegetadas no interior do dossel, o que possui grande influência no BES, principalmente em áreas urbanas.

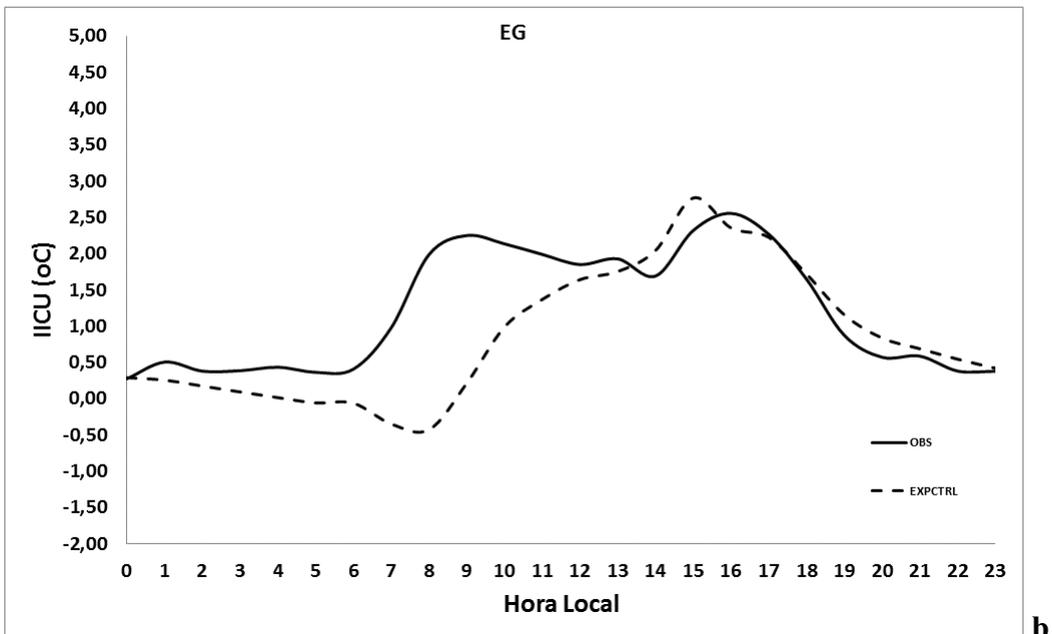
Possivelmente esta deficiência do modelo em representar os dois picos de maior intensidade da ICU está relacionada com problemas na representação de máximos e mínimos pelo modelo. Nas análises sobre o desempenho das simulações de teste, observou-se que o modelo apresenta um melhor desempenho na simulação dos máximos, com os valores simulados apresentando-se em fase com os dados observacionais. Já a simulação da temperatura mínima apresentou deficiência no modelo e estes resultados influenciaram de forma direta a intensidade da ICU, isto é, no horário de mínima às 8 HL, o modelo simula a intensidade da ICU com valores negativos.

Em Belém, a Figura 4.43 mostra claramente a formação e a intensidade da ICU. Nota-se que existe apenas um máximo de intensidade, entre as 11HL e 12HL, o que evidencia a influência direta do aquecimento radiativo sobre o BES na área urbana e sua influência no aquecimento do ar em área urbana.

Considerando que as simulações realizadas no contexto do EXPCTRL apresentaram estatísticas que comprovaram o desempenho do modelo em representar as características atmosféricas para a cidade de Belém, pode-se dizer que a intensidade da ICU simulada pode estar próxima de uma estimativa observacional, mostrando que a maior intensidade do fenômeno ocorre próximo à máxima temperatura.

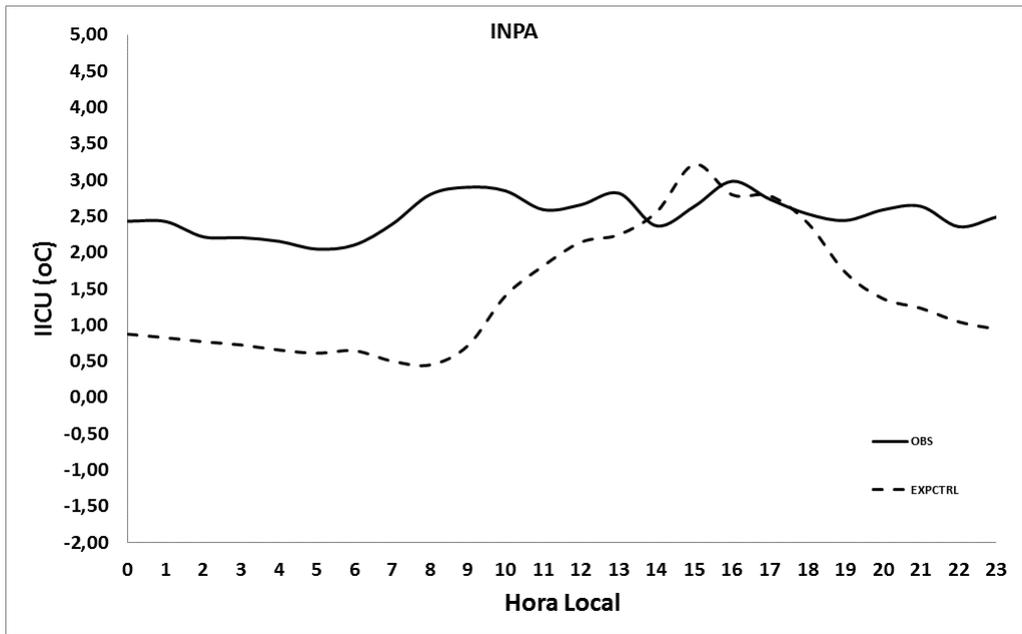


a

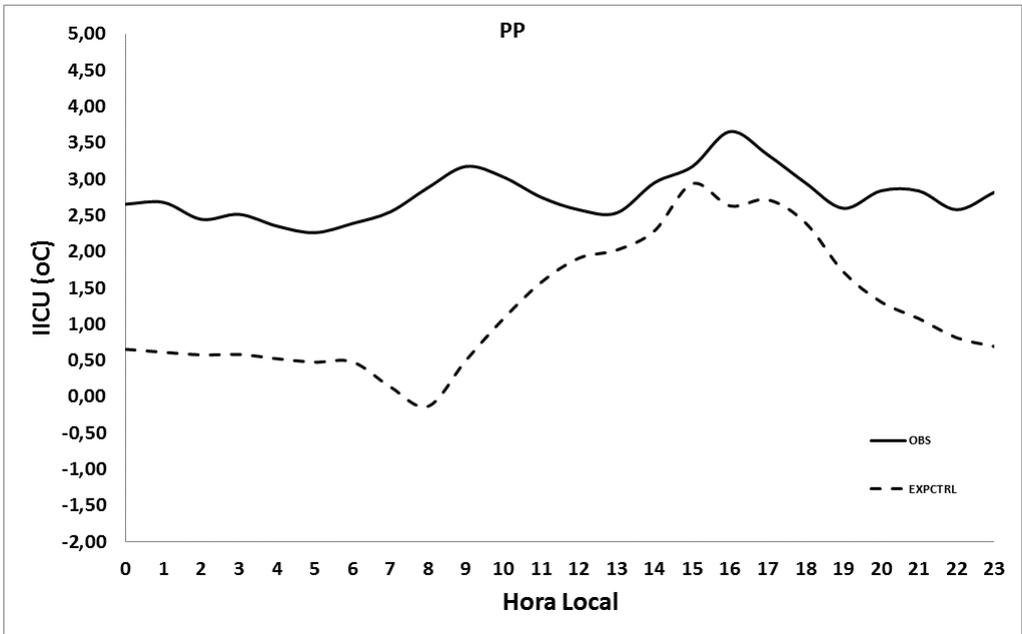


b

Figura 4.42 – Ciclo diurno da intensidade da ICU de Manaus simulada pelo EXPCTRL nas estações (a) INMET, (b) aeroporto Eduardo Gomes. (continua)



c



d

Figura 4.42 – Continuação. (c) INPA e (d) aeroporto de Ponta Pelada.

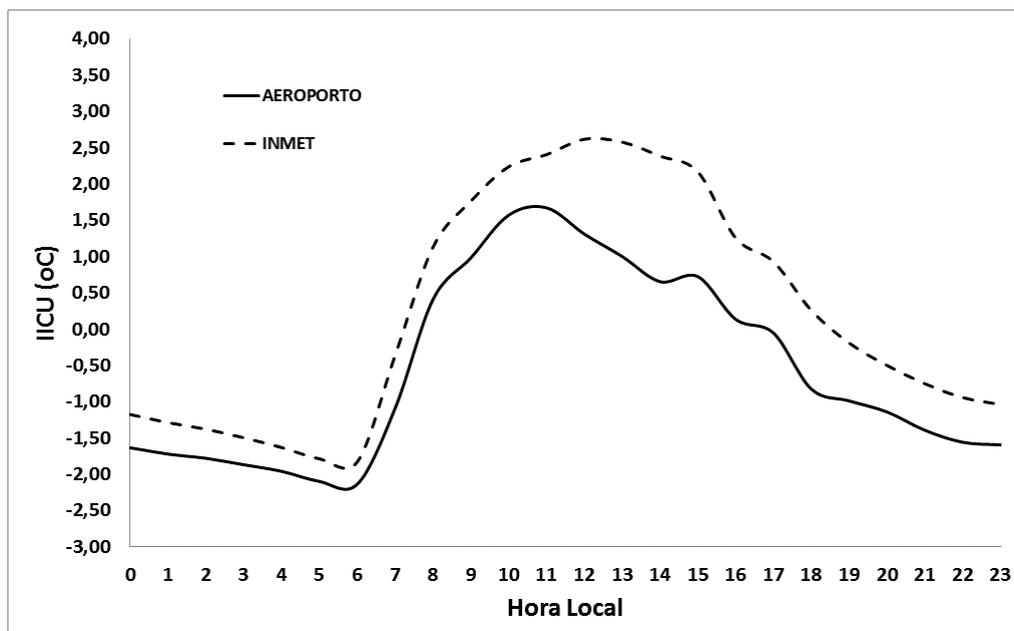


Figura 4.43 – Ciclo diurno da intensidade da ICU de Belém simulada pelo EXPCTRL nas estações (a) INMET e (b) aeroporto internacional de Belém.

As análises do experimento controle realizadas permitiram observar a formação e as características da ICU das cidades de Manaus e Belém. Foi observado que a área urbana é mais quente e mais seca que a região vizinha e que a CLP é diretamente influenciada pela superfície urbana. Observa-se que o gradiente térmico entre área urbana e regiões vizinhas, como floresta e/ou rios, é responsável pela formação de um escoamento do tipo brisa nas duas cidades estudadas. Com relação aos resultados obtidos para Belém, o gradiente térmico formado entre a cidade e áreas adjacentes possibilita a formação de um escoamento devido à este gradiente térmico, mas este possivelmente encontra-se embebido no escoamento de grande escala.

Os resultados apresentados através das simulações numéricas possibilitaram verificar que o primeiro máximo de intensidade da ICU em Manaus está diretamente relacionado com a temperatura mínima observada em floresta e a influência do dossel urbano na modificação do horário de mínima temperatura em área urbana. Possivelmente as propriedades da superfície urbana, como armazenamento de calor, juntamente com os fluxos antropogênicos, modificam o horário de mínima temperatura em área urbana, colaborando assim para o comportamento diferenciado da intensidade da ICU.

Depois de evidenciada a formação e características da ICU de Manaus e Belém, assim como sua influência na formação e intensificação de circulações atmosféricas locais

sobre a área de estudo, analisaram-se os possíveis impactos da intensa urbanização observada sobre as características da ICU. Para cumprir com os objetivos, foram então realizadas simulações numéricas para o período de 01/06/2008 a 30/06/2008 considerando os mapas de vegetação e usos da terra com a representação da área urbana das duas cidades, referente ao ano de 1973 (EXPPAS) e também um mapa em que a área da cidade foi extrapolada seguindo as condições observadas (EXPFUT). Desta forma, quando comparadas estas simulações com o EXPCTRL será possível evidenciar os impactos do processo de urbanização sobre a formação e características da ICU.

As Tabelas 4.12 e 4.13 apresentam um resumo das comparações entre os diferentes cenários simulados. Em Manaus, o ciclo diurno da temperatura observada na área urbana não apresenta grandes diferenças, ou seja, estas são praticamente nulas ($-0,02^{\circ}\text{C}$) entre o EXPCTRL e o EXPFUT. Já o EXPPAS mostra que a área urbana de Manaus era mais fria aproximadamente $0,42^{\circ}\text{C}$ do que no tempo presente. A maior diferença entre os experimentos foi observada no horário das 16 HL, com uma diferença de $0,89^{\circ}$ entre o EXPCTRL e o EXPPAS, e de $0,19^{\circ}\text{C}$ entre o EXPCTRL e o EXPFUT. Uma característica interessante a ser ressaltada, é que a partir das 18 HL até às 09 HL a diferença entre as simulações controle e futuro são negativas, com valores de $-0,29^{\circ}\text{C}$, mostrando que no cenário futuro a cidade estará mais fria neste período do dia.

Em Belém, os resultados mostram que as diferenças entre a temperatura simulada no EXPCTRL e EXPPAS de aproximadamente $0,12^{\circ}\text{C}$, comprovando que o crescimento da área urbana apresenta grande influência no aumento da temperatura em superfície. Se analisado o comportamento diurno das diferenças entre os experimentos citados, nota-se que a cidade é mais quente principalmente no período diurno, entre as 9HL e 17HL.

Possivelmente estes resultados refletem a influência das propriedades da superfície urbana em armazenar calor por um período maior de tempo, influenciando diretamente o BES. Com isso, a área urbana apresentando uma maior dimensão, ela possivelmente se resfriará mais, pois irá armazenar menor quantidade de calor quando comparado ao tempo presente. Outra consequência pode estar relacionado com a modificação de circulações locais sobre a área de estudo, que será discutido posteriormente.

Com relação aos valores observados para a diferença entre os experimentos presente e passado, estes apresentam-se de acordo com as análises observacionais realizadas no

capítulo anterior, os quais mostraram uma tendência de elevação da temperatura em área urbana, colaborando para a hipótese de relação entre o processo de urbanização e mudanças no microclima local.

Tabela 4.12 – Diferenças entre os diferentes cenários de área urbana em Manaus para as variáveis Temperatura, umidade Relativa e Razão de mistura do Vapor d'água.

	TEMP (°C)		UR (%)		R (g/kg)	
	CTRL-PAS	CTRL-FUT	CTRL-PAS	CTRL-FUT	CTRL-PAS	CTRL-FUT
0	0,44	-0,08	-3,19	3,79	0,11	0,36
1	0,41	-0,08	-3,56	3,63	0,06	0,29
2	0,37	-0,06	-3,51	3,38	0,15	0,29
3	0,37	-0,02	-3,44	2,75	0,22	0,27
4	0,39	0,03	-3,36	2,42	0,18	0,15
5	0,35	0,00	-3,44	1,99	0,12	0,06
6	0,32	-0,07	-3,33	1,75	0,09	0,04
7	0,26	-0,08	-3,04	1,64	0,10	0,07
8	0,25	-0,08	-3,43	1,72	-0,12	0,12
9	0,08	-0,03	-1,51	1,10	-0,20	0,12
10	-0,02	0,00	1,35	0,78	-0,02	0,15
11	0,01	0,04	1,95	0,54	0,02	0,15
12	0,18	0,13	1,59	0,55	0,02	0,19
13	0,32	0,14	0,64	0,52	-0,06	0,23
14	0,57	0,05	-0,03	0,63	0,02	0,25
15	0,58	0,01	-1,46	-0,02	-0,18	0,10
16	0,89	0,19	-3,91	-0,81	-0,43	-0,03
17	0,77	0,17	-5,51	-1,34	-0,56	-0,13
18	0,70	-0,09	-4,90	-0,47	-0,49	-0,10
19	0,65	-0,24	-4,19	0,38	-0,42	-0,06
20	0,48	-0,29	-3,14	1,07	-0,26	0,00
21	0,59	-0,10	-3,70	1,26	0,00	0,24
22	0,52	-0,03	-2,58	2,91	0,17	0,44
23	0,49	-0,08	-3,31	2,76	0,13	0,38

Tabela 4.13 – Diferenças entre os diferentes cenários de área urbana em Belém para as variáveis Temperatura, umidade Relativa e Razão de mistura do Vapor d'água

	TEMP		UR		R	
	CTRL-PAS	CTRL-FUT	CTRL-PAS	CTRL-FUT	CTRL-PAS	CTRL-FUT
0	-1,46	0,10	-2,95	1,10	-0,08	0,28
1	-1,57	0,06	-2,97	0,65	-0,10	0,18
2	-1,69	0,04	-3,46	0,36	-0,20	0,11
3	-1,82	0,04	-3,89	0,40	-0,27	0,09
4	-1,93	0,07	-4,11	0,42	-0,29	0,09
5	-2,07	0,08	-3,79	0,64	-0,23	0,14
6	-2,11	0,07	-3,45	0,97	-0,17	0,19
7	-0,87	-0,13	-3,47	1,08	-0,20	0,19
8	0,71	-0,17	-3,55	1,04	-0,50	0,18
9	1,74	0,10	-0,87	0,19	-0,22	0,11
10	2,61	0,22	-2,02	-0,74	-0,34	0,04
11	3,23	0,17	-3,91	-0,32	-0,35	0,14
12	3,34	-0,21	-4,69	0,84	-0,29	0,26
13	3,17	-0,07	-5,82	0,22	-0,34	0,08
14	2,95	0,19	-6,72	0,02	-0,35	0,13
15	2,28	0,43	-7,47	0,01	-0,54	0,28
16	1,28	-0,14	-5,19	1,92	-0,50	0,42
17	0,63	-0,10	-5,66	1,45	-0,64	0,25
18	-0,27	-0,31	-6,61	1,87	-0,70	0,19
19	-0,72	-0,27	-5,15	2,11	-0,46	0,20
20	-1,03	-0,26	-4,23	1,97	-0,32	0,18
21	-1,01	0,01	-4,79	0,93	-0,22	0,27
22	-1,24	0,00	-4,61	0,72	-0,21	0,27
23	-1,34	0,09	-3,75	1,17	-0,12	0,34

As diferenças entre os resultados dos experimentos para a variável umidade relativa em Manaus, mostram que no passado a área urbana era mais úmida em até 5,51% do que no tempo presente. Para as simulações representativas do futuro, a cidade apresenta-se mais seca em até 3,79% do que no tempo presente. O conteúdo de vapor d'água na atmosfera para os diferentes cenários foi analisado através da razão de mistura do vapor d'água. Os resultados mostram que no passado a cidade apresentava um menor conteúdo de água na atmosfera; mas, durante o período noturno este conteúdo aumenta significativamente. Este aumento no período noturno está diretamente relacionado com as circulações locais observadas sobre a área urbana de Manaus, as quais colaboram para o transporte de umidade de regiões mais úmidas para a cidade. Com o crescimento

da área urbana, diminui o conteúdo de umidade na atmosfera, o que possivelmente está relacionado com modificações nas circulações locais sobre a área urbana neste cenário, analisadas posteriormente.

Os resultados para a variável umidade relativa em Belém também comprovam o efeito da urbanização no conteúdo de umidade em área urbana. Nota-se que a cidade é mais seca, superior a 4%, e possui 0,32 g/kg a menos no cenário atual do que nas simulações para o passado. Quando analisadas as diferenças entre o EXPFUT e o EXPCTRL nota-se que estas não são muito significativas, principalmente para a temperatura. Observa-se uma diferença praticamente nula, mostrando que a extrapolação da área urbana não possui muita influência no comportamento da temperatura. Diferenças entre estes dois experimentos são apenas observadas para a quantidade de umidade em área urbana. Os resultados permitem observar que a cidade é mais úmida aproximadamente 0,8% e apresenta uma maior quantidade de vapor d'água na atmosfera (0,19 g/kg). Observa-se que o maior conteúdo de vapor d'água no EXPFUT ocorre no mesmo período em que o escoamento predominante é de norte/nordeste, evidenciando assim o transporte de umidade pela circulação de grande escala. Inicialmente pode-se levantar a hipótese de que com a maior dimensão da área urbana, maior é o gradiente térmico e possivelmente uma intensificação no escoamento pode ocorrer. Esta característica observada no EXPFUT será analisada posteriormente.

Efeitos relacionados com o aumento da temperatura e diminuição da umidade relativa, assim como conteúdo de água na atmosfera, relacionados com processo de urbanização, também foram evidenciados em Istambul por Ezber et al. (2007) através de simulações numéricas.

Analisando espacialmente as diferenças entre os cenários simulados neste capítulo, observa-se que as maiores diferenças de temperatura estão presentes sobre as novas áreas urbanizadas. Em Manaus, a diferença entre o cenário do presente e o cenário passado (Figura 4.44a) mostra que nas regiões antes não urbanizadas esta diferença alcança 0,5°C. Sobre a área urbana já existente, a cidade é mais quente entre 0,3°C e 0,4°C no cenário atual. Estes resultados concordam com as tendências de aquecimento da área urbana previamente analisados através de dados observacionais.

Continuando a análise para Manaus, com relação ao conteúdo de umidade (R) na atmosfera (Figura 4.44b), nota-se também que a cidade atualmente é mais seca do que no passado, com valores próximos a $-0,25$ g/kg, principalmente sobre as novas áreas urbanizadas, mas também se pode observar que sobre a área urbana já existente o conteúdo de umidade também apresenta uma diminuição. Estes resultados deixam clara a influência da área urbana no armazenamento de umidade e capacidade de evapotranspiração, processos já discutidos anteriormente.

As anomalias no escoamento entre os cenários atual e passado (Figura 4.44c) em Manaus, mostram que em superfície o vento aumenta sua intensidade, principalmente sobre a área urbana. Pode-se observar que há a criação de um escoamento da floresta em direção à área urbana, assim como um escoamento com direção da cidade para o rio. Esta modificação no escoamento deixa claro que o processo de urbanização apresenta grande influência na formação e intensificação de circulações locais sobre a área de estudo. Analisando o campo de diferença entre os cenários presente e passado para a advecção de temperatura (Figura 4.44d) fica clara a advecção anômala fria sobre a região de fronteira entre a área urbana e o rio, indicando assim que o crescimento urbano influencia diretamente o transporte de ar mais frio do rio para o continente.

Assim como analisado e discutido anteriormente, a diferença entre o cenário do presente e o cenário passado em Belém (Figura 4.45a) mostra que nas regiões antes não urbanizadas esta diferença alcança $0,7^{\circ}\text{C}$. Sobre a área urbana já existente a cidade é mais quente entre $0,3^{\circ}\text{C}$ e $0,4^{\circ}\text{C}$ no cenário atual. Estes resultados concordam com as tendências de aquecimento da área urbana já analisados através de dados observacionais.

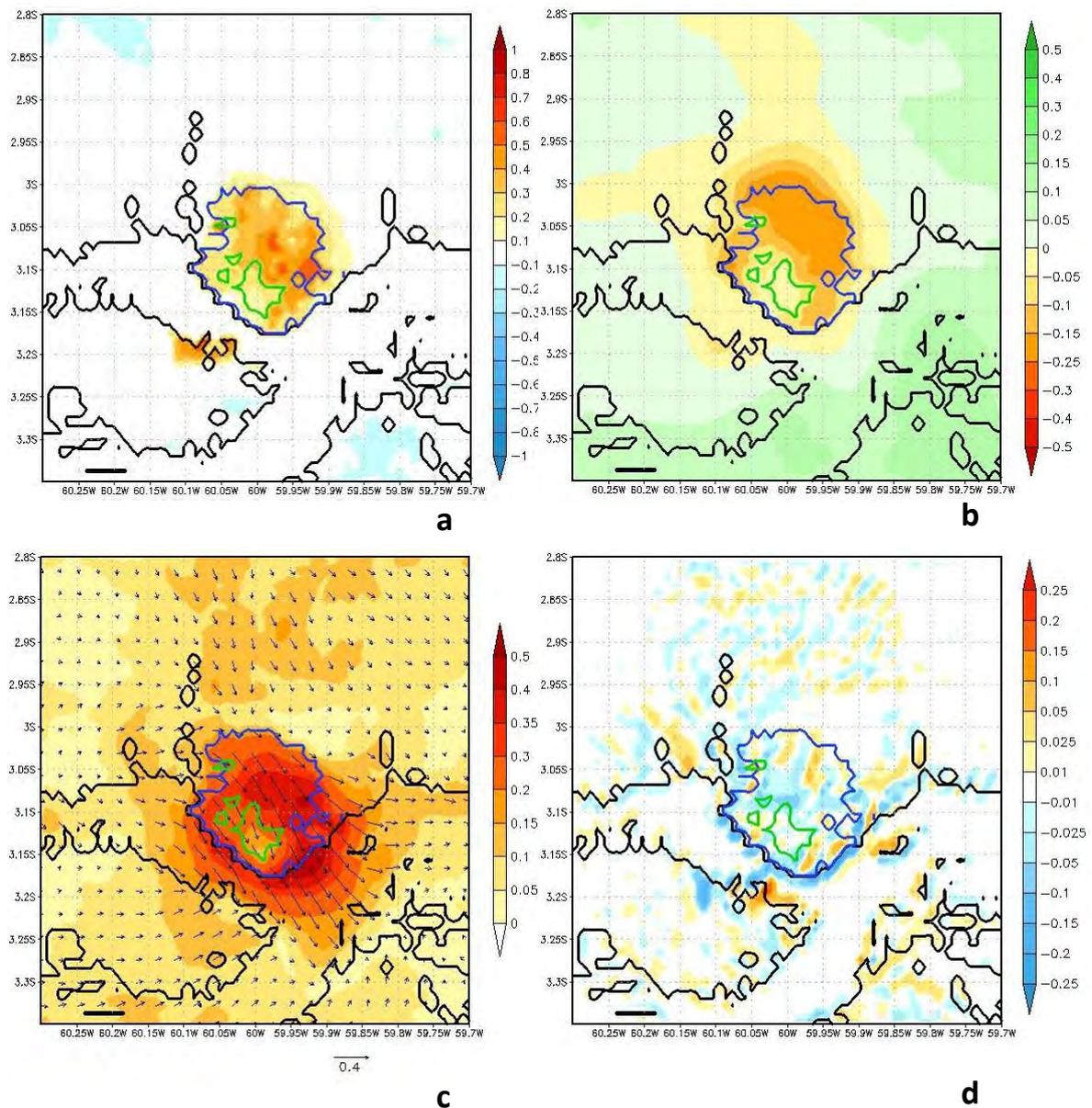


Figura 4.44 – Diferença entre o EXPCTRL e EXPPAS do campo médio para o período de análise para as variáveis (a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), (b) razão de mistura do vapor d'água (g/kg), (c) vento (m/s) e (d) advecção de temperatura ($^{\circ}\text{Cm}/\text{s}$). Áreas com contorno preto representam os limites continente e corpos de água. Áreas com contorno azul representam a área urbana de Manaus no cenário atual (EXPCTRL) e verde representam a área urbana de Manaus no cenário passado (EXPPAS).

A influência do crescimento urbano de Belém também é evidenciada para o conteúdo de umidade (R) na atmosfera (Figura 4.45b). Pode-se observar que a cidade atualmente é mais seca do que no passado, com valores próximos a $-0,4 \text{ g}/\text{kg}$, principalmente sobre as novas áreas urbanizadas, mas observa-se também que sobre as regiões já urbanizadas no

passado o conteúdo de umidade também apresenta uma diminuição. Estes resultados deixam clara a influência da área urbana no armazenamento de umidade e capacidade de evapotranspiração, processos já discutidos anteriormente.

A Figura 4.45c mostra as anomalias no escoamento entre o EXPCTRL e EXPPAS para a cidade de Belém. Os resultados indicam que em superfície o vento aumenta sua intensidade sobre praticamente toda a grade analisada, não apresentando uma característica específica sobre a área urbana. Salienta-se que os usos da terra no EXPPAS não apresenta a classe 15 sobre a grade analisada, referente à cultivos. As modificações nas características da superfície entre os dois experimentos analisados modificaram de forma significativa o escoamento, mostrando que não somente o crescimento urbano, mas o aumento na área de cultivos sobre a região modifica o BES em superfície, intensificando o escoamento sobre toda a área analisada. A diferença entre o EXPCTRL e o EXPPAS mostra que com o aumento da área urbana existe um aumento na advecção fria na nova fronteira urbana à leste da área urbana já existente em 1973. Este aumento na advecção fria mostra que além da influência das anomalias no escoamento observadas, o gradiente térmico entre a nova área urbana possivelmente cria um escoamento de brisa entre a área urbana do cenário atual e áreas adjacentes.

Como citado anteriormente na revisão da bibliografia, áreas urbanas apresentam influência direta na modificação do BES. Com o aumento das dimensões da área urbana, assim como os fluxos de calor antropogênicos entre o EXPPAS e o EXPCTRL, espera-se que exista uma diferença nos fluxos de calor sensível e latente, o que será discutido para os dois municípios. Vale ressaltar que segundo a bibliografia o processo de urbanização pode afetar diretamente o BES, visto que com o crescimento da área urbana haverá um aumento nos fluxos antropogênicos, mudanças nas propriedades de superfície, como albedo e emissividade, contribuindo positivamente para o aumento do fluxo de calor sensível e possivelmente uma queda no fluxo de calor latente. Para verificar esta hipótese citada anteriormente, foi calculada a diferença entre o fluxo de calor sensível e latente para as duas cidades nos diferentes cenários propostos.

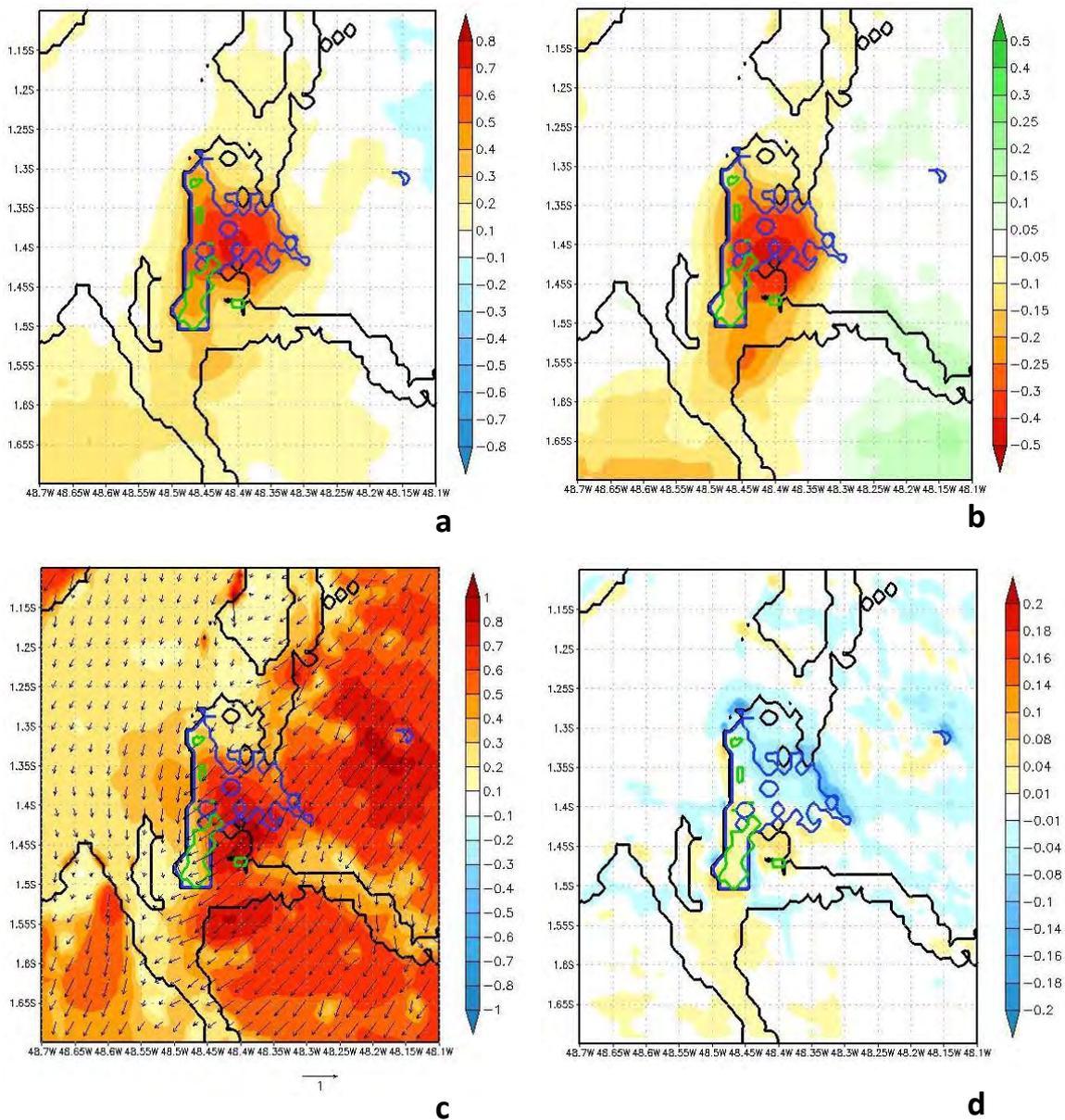


Figura 4.45 – Diferença entre o EXPCTRL e EXPPAS do campo médio para o período de análise para as variáveis (a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), (b) razão de mistura do vapor d'água (g/kg), (c) vento (m/s) e (d) advecção de temperatura ($^{\circ}\text{Cm/s}$). Áreas com contorno preto representam os limites continente e corpos de água. Áreas com contorno azul representam a área urbana de Belém no cenário atual (EXPCTRL) e verde representam a área urbana de Belém no cenário passado (EXPPAS).

Em Manaus, estas modificações no BES ficam claras na Figura 4.46, onde se observa um aumento no fluxo de calor sensível e uma diminuição no fluxo de calor latente, principalmente sobre as regiões onde o crescimento urbano foi evidenciado. Os resultados para Belém também evidenciam que com o aumento da área urbana de

Belém (Figura 4.47) há um aumento no fluxo de calor sensível e uma queda no fluxo de calor latente, modificando assim o BES em área urbana.

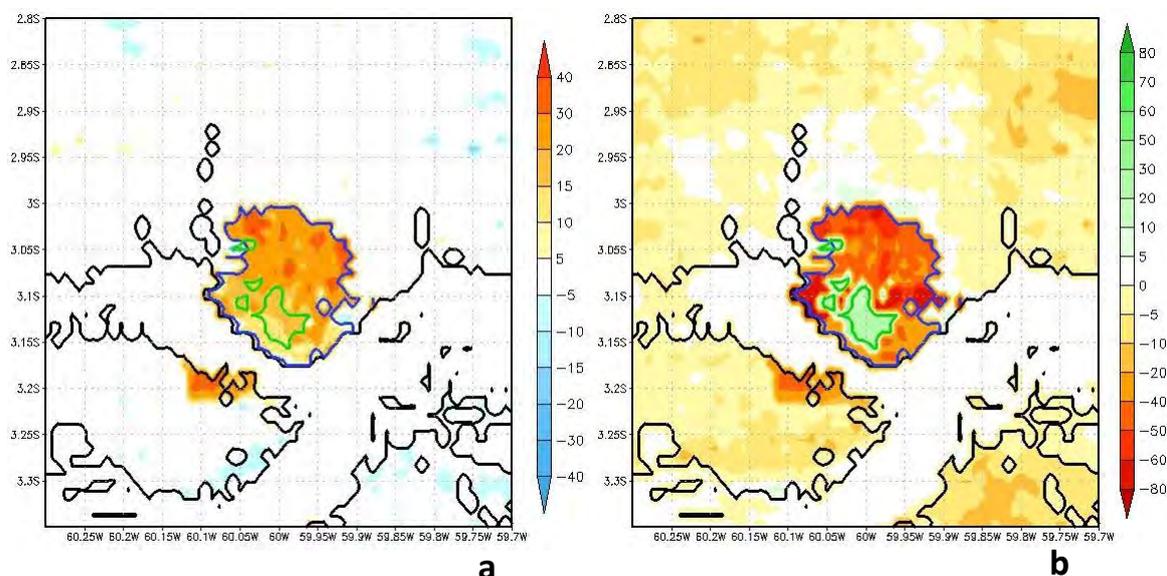


Figura 4.46 – Diferença média para o período de análise entre os EXPCTRL e EXPPAS para as variáveis (a) fluxo de calor sensível (w/m²) e (b) fluxo de calor latente (w/m²). Áreas com contorno preto representam os limites continente e corpos de água. Áreas com contorno azul representam a área urbana de Manaus no cenário atual (EXPCTRL) e verde representam a área urbana de Manaus no cenário passado (EXPPAS).

Estas diferenças para os fluxos de calor sensível, estão associadas com as propriedades do dossel urbano em cada cenário, visto que o aumento da área urbana representa um aumento no armazenamento de calor durante o dia, além de representar as maiores contribuições dos fluxos antropogênicos. Com relação ao fluxo de calor latente, a substituição de área vegetada por área urbana representa uma grande diminuição na quantidade de água disponível para a evaporação, visto que o esquema TEB não considera água armazenada em superfície urbana.

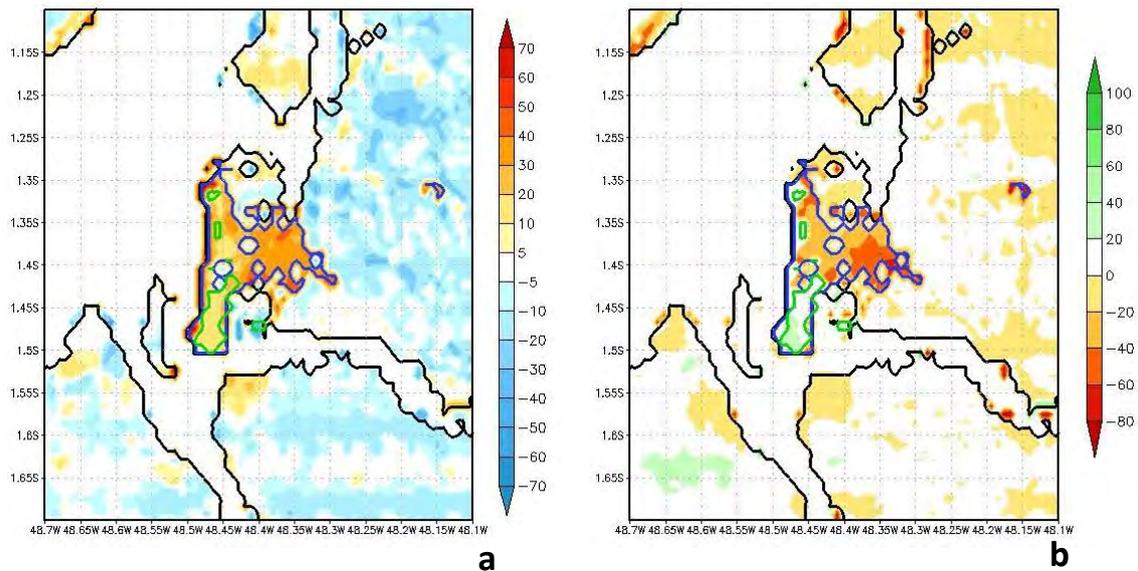
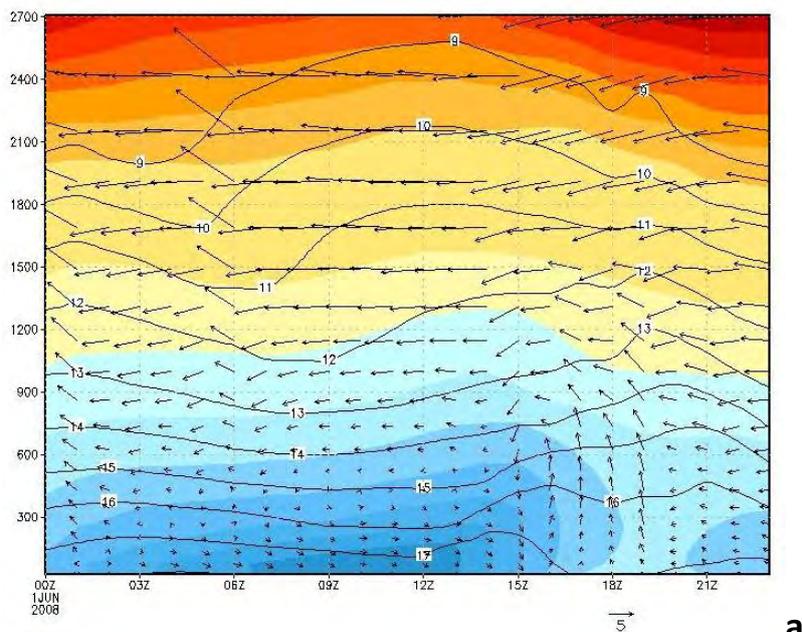
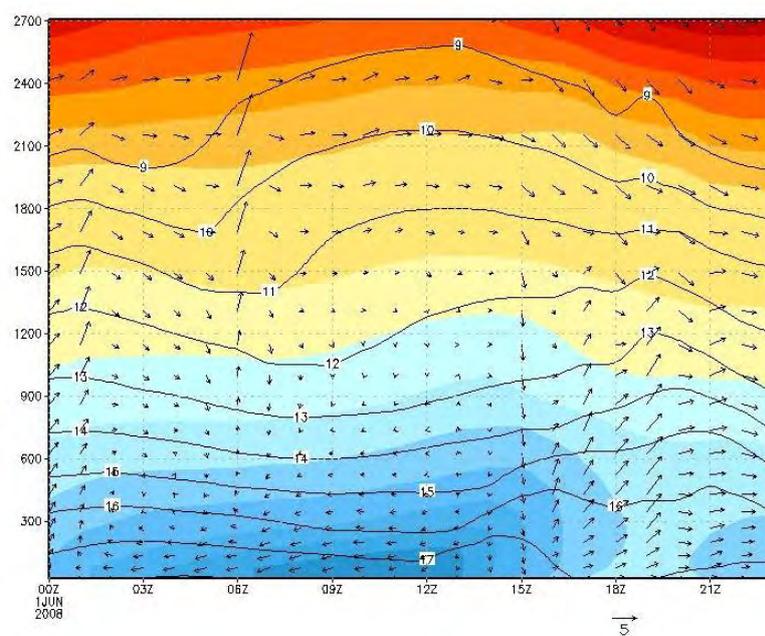


Figura 4.47 – Diferença média para o período de análise entre os EXPCTRL e EXPPAS para as variáveis (a) fluxo de calor sensível (w/m^2) e (b) fluxo de calor latente (w/m^2). Áreas com contorno preto representam os limites continente e corpos de água. Áreas com contorno azul representam a área urbana de Belém no cenário atual (EXPCTRL) e verde representam a área urbana de Belém no cenário passado (EXPPAS).

A Figura 4.48a mostra o perfil para temperatura potencial e componente zonal do vento para o cenário passado em Manaus. Observa-se que o escoamento zonal de oeste para leste é menos intenso e com menor profundidade do que no cenário atual. A célula de circulação de brisa entre a região de floresta e a cidade também está presente, com um escoamento da floresta para a área urbana entre 23 HL e 7 HL, com uma corrente de retorno acima de 600m de altitude, e a partir das 14 HL há uma perturbação neste escoamento, desconfigurando-o. O perfil para a componente meridional do vento e temperatura potencial, simulado no contexto do EXPPAS para Manaus (Figura 4.48b), mostra um escoamento de sentido área urbana para o rio entre as 21 HL e 8 HL, semelhante ao observado e discutido anteriormente para o cenário atual, apresentando os mesmos mecanismos de formação. Assim como observado para o EXPCTRL, com o aquecimento da superfície urbana o sentido do escoamento modifica, iniciando um escoamento com sentido rio para cidade.



a



b

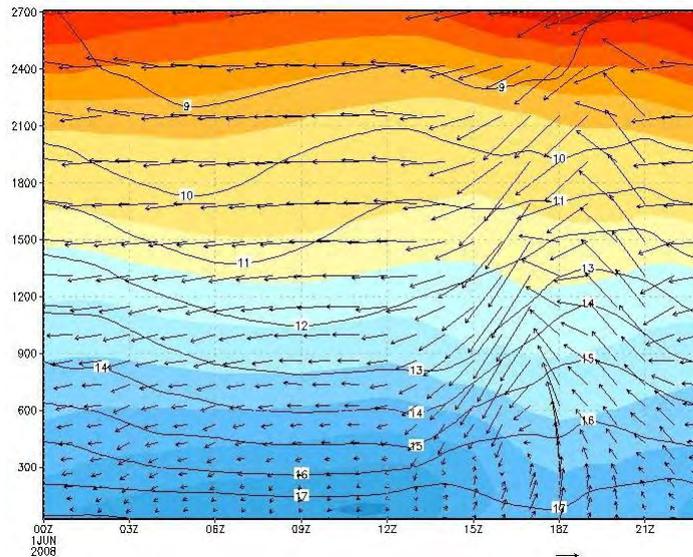
Figura 4.48 – Variação diurna média para o período de análise do perfil vertical médio de temperatura potencial, razão de mistura do vapor d'água e componentes (a) zonal e (b) meridional do vento para o EXPPAS em Manaus.

Assim como analisado para Manaus, o perfil de temperatura potencial e componente zonal do vento simulados no contexto do EXPPAS para Belém (Figura 4.49a), mostra um escoamento zonal de leste para oeste em praticamente toda a camada analisada, principalmente em níveis superiores a 300m de altura. Assim como observado para o

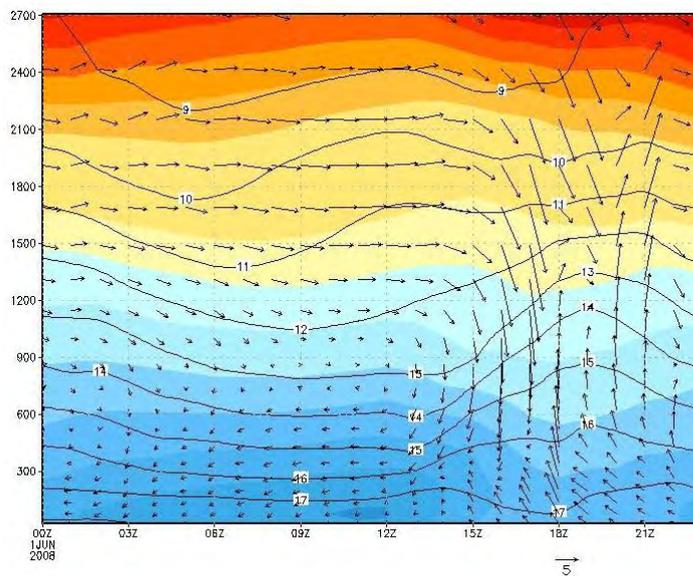
cenário atual, nota-se que o escoamento entre a superfície e 300m apresenta uma inversão com o decorrer do dia, mostrando que o gradiente térmico formado pelo aquecimento da superfície urbana influencia na formação de um outro escoamento embebido no escoamento principal. Outra característica marcante é o intenso movimento vertical observado entre 12HL e 17HL. Este movimento vertical está associado à formação de convecção sobre a área urbana devido ao aquecimento da superfície e o ganho de fluatibilidade do ar sobre a região. Nota-se que este movimento vertical apresenta a característica de mistura de propriedades na vertical, levando calor e umidade para níveis mais elevados da atmosfera e possivelmente influenciando a atividade convectiva na área de estudo.

Para Belém, continuando a análise dos resultados do EXPPAS, os resultados para o perfil de temperatura potencial, componente meridional do vento e razão de mistura do vapor d'água são mostrados na Figura 4.49b. Neste perfil fica mais evidente a formação de uma célula de circulação entre a superfície e 2400m de altura. Assim como observado para a componente zonal do vento, um escoamento com inversão no sentido com o decorrer do dia é observado entre a superfície e 300m de altura, evidenciando assim o papel da área urbana na formação de um escoamento em escala local.

Comparando os perfis analisados aqui com os apresentados para o cenário atual, pode-se observar que o movimento vertical observado à tarde sobre Belém é mais intenso para o cenário atual, evidenciando assim o papel da urbanização no escoamento em escala local sobre a área urbana. Nota-se também que com o aumento das dimensões urbanas o escoamento entre a superfície e 300m de altura é mais intenso, mostrando assim o papel do gradiente térmico mais intenso sobre o escoamento na área de estudo.



a



b

Figura 4.49 – Variação diurna média para o período de análise do perfil vertical médio de temperatura potencial, razão de mistura do vapor d'água e componentes (a) zonal e (b) meridional do vento para o EXPPAS em Belém.

O perfil vertical de temperatura potencial (THETA) e razão de mistura do vapor d'água (R) mostra que a CLP no cenário passado em Manaus (Figura 4.50) é menos profunda, atingindo uma altura média de 2000m. Também se pode observar que a camada de inversão próxima à superfície é mais baixa do que no cenário atual, com profundidade de aproximadamente 150m. Esta menor espessura apresenta influência direta na altura

do escoamento em baixos níveis, associado com circulações atmosféricas locais dos tipos brisa fluvial e brisa entre área urbana e floresta.

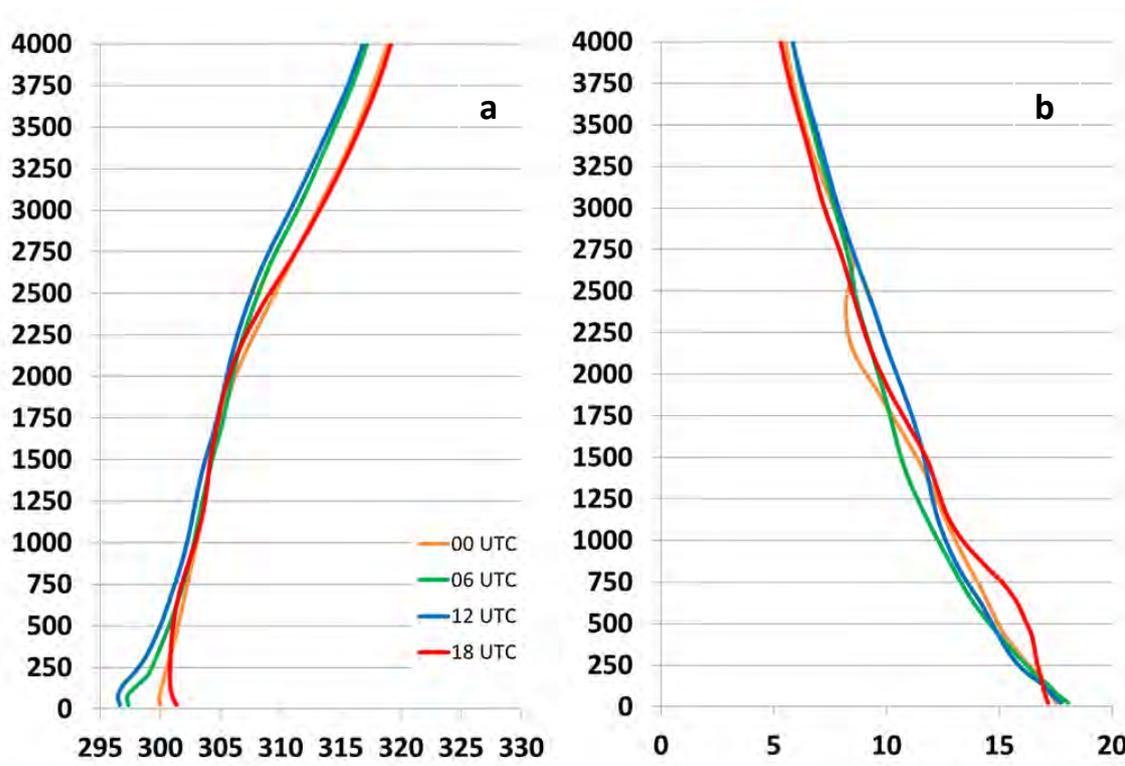


Figura 4.50 – Perfil vertical de (a) temperatura potencial (K) e (b) razão de mistura do vapor d'água simulados pelo EXPPAS em Manaus.

Diferentemente do observado para Manaus, o perfil vertical de temperatura potencial (THETA) e razão de mistura do vapor d'água (R) em Belém no cenário passado, mostra que a CLP no cenário passado (Figura 4.51) não apresenta grande diferença do simulado para o cenário atual, apresentando uma altura média de 2000m. A principal diferença é a altura da camada de inversão próxima à superfície, que no cenário passado não ultrapassa 100m de altitude.

Estes resultados novamente evidenciam claramente a influência direta das mudanças nos usos da terra na área de estudo, como por exemplo o processo de urbanização, sobre o comportamento de algumas das principais características atmosféricas, modificando de forma significativa a CLP e a transferência de propriedades na vertical, processos estes que influenciam de forma direta o microclima local.

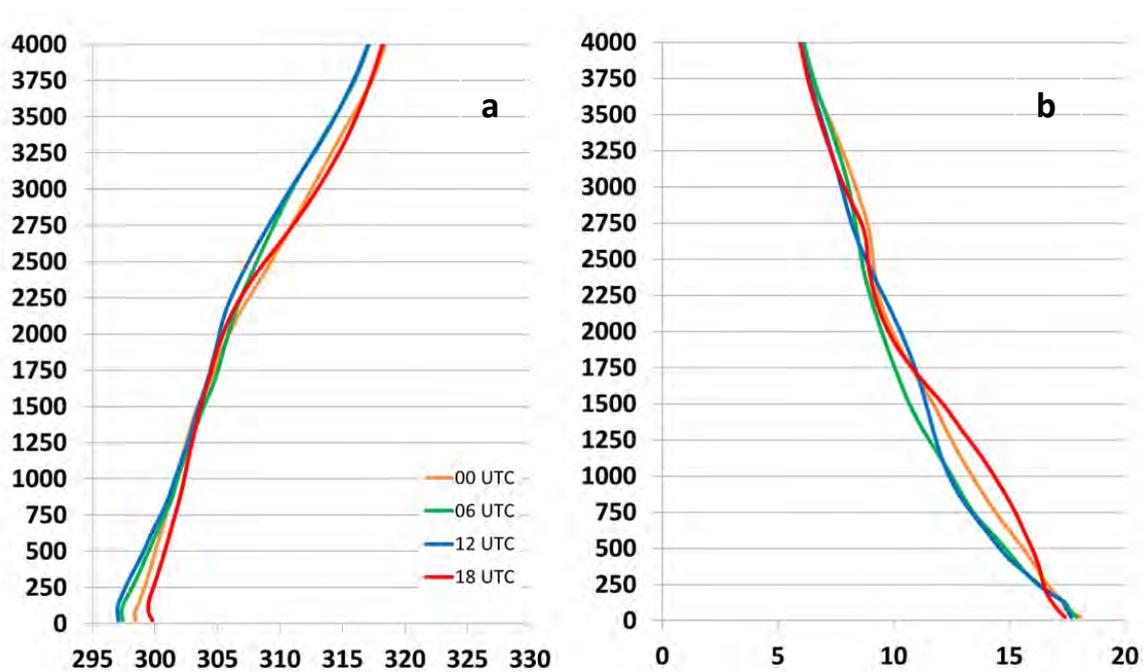


Figura 4.51 – Perfil vertical de (a) temperatura potencial (K) e (b) razão de mistura do vapor d’água simulados pelo EXPPAS em Belém.

As modificações nas circulações locais devido ao processo de urbanização também são evidenciadas quando analisada a hodógrafa do vento em superfície em área urbana para o EXPPAS em Manaus (Figura 4.52). Pode-se observar que o escoamento é menos intenso do que o observado no cenário atual. A rotação na direção do vento é praticamente a mesma, com um escoamento da área urbana em direção ao rio durante o final da noite e início da manhã, invertendo o sentido no decorrer do dia, como observado anteriormente, e também de acordo com as observações de Oliveira e Fitzjarrald (1993).

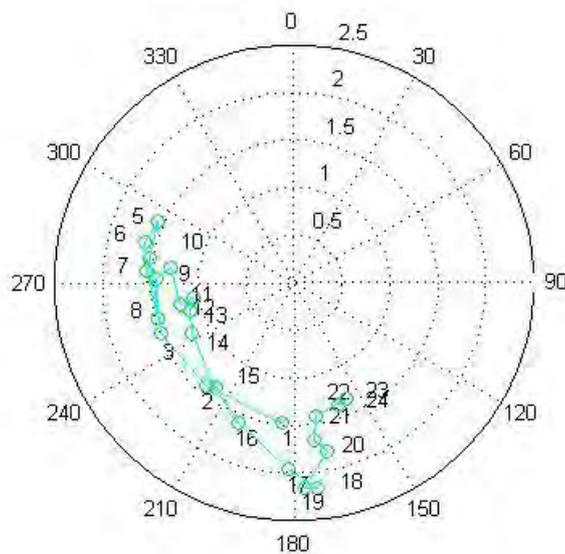


Figura 4.52 – Hodógrafa do vento simulado no EXPPAS em Manaus.

Assim como em Manaus, o crescimento da área urbana de Belém também mostra grande influência no escoamento em superfície quando analisados os resultados do EXPPAS (Figura 4.53). Como observado para o cenário atual, o escoamento em superfície entre 17HL e 09HL apresenta direção norte/nordeste, modificando para noroeste entre 10HL e 16HL. A principal diferença entre os dois cenários é que para o EXPPAS o escoamento sobre a área urbana é mais intenso, mostrando que o aumento na rugosidade em superfície e a criação de uma forte convecção no cenário atual tende a diminuir o escoamento sobre a área urbana no EXPCTRL.

No cenário futuro (Figura 4.54), a cidade de Manaus é mais quente aproximadamente 0,2°C do que atualmente, principalmente sobre as novas áreas urbanizadas, assim como observado para o cenário passado. Nota-se que existem áreas na fronteira entre a cidade e floresta em que a área urbana no cenário futuro é mais fria do que atualmente. Esta característica está diretamente associada com a maior intensidade do escoamento anômalo (Figura 4.54c) com sentido floresta para cidade, gerando um aumento na advecção fria (Figura 4.54d) sobre esta região da área urbana. Neste sentido, o crescimento da área urbana de Manaus intensifica o gradiente térmico entre floresta e cidade, intensificando assim o escoamento de brisa da região de floresta.

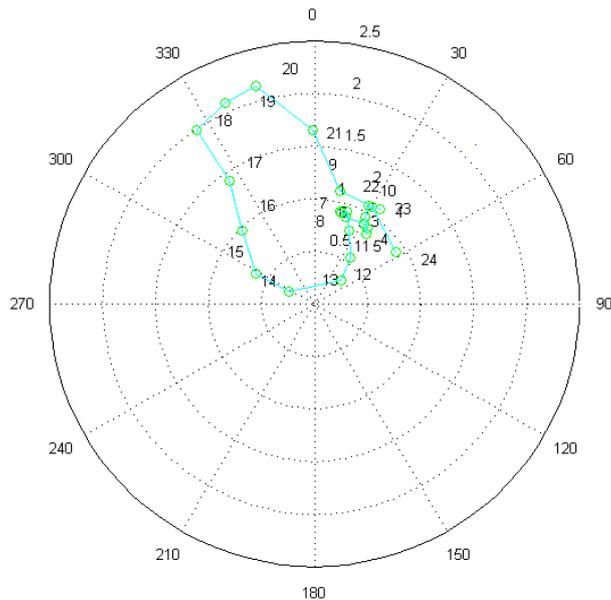


Figura 4.53 – Hodógrafa do vento simulado no EXPPAS em Belém.

Para Belém, a diferença entre as simulações EXPFUT e EXPCTRL mostra que a cidade no cenário futuro é mais quente em até $0,3^{\circ}\text{C}$, principalmente sobre as novas áreas urbanizadas (Figuras 4.55a). Pode-se observar que sobre a grade analisada existem locais em que a temperatura no EXPFUT é menor do que no cenário atual. Provavelmente esta diferença está associada à anomalias no escoamento sobre a grade, gerados pelas modificações nas características de superfície. Nota-se também que a cidade no cenário futuro é mais seca do que no cenário atual (Figuras 4.55b), com um conteúdo de umidade até $0,4\text{ g/kg}$ menor, mostrando que o crescimento da área urbana diminui a quantidade de água disponível para a atmosfera.

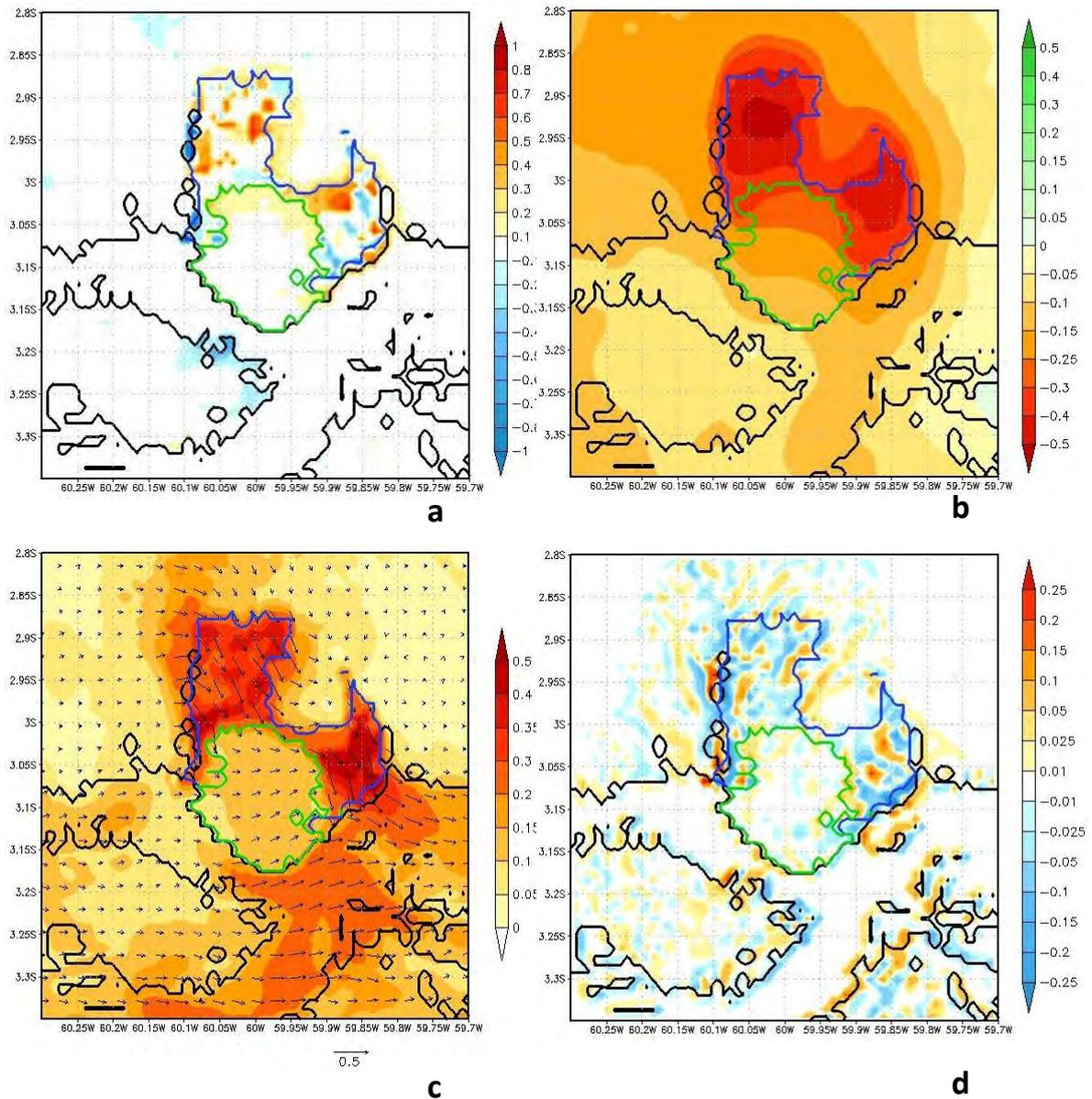


Figura 4.54 – Diferença entre o EXPFUT e EXPCTRL do campo médio para o período de análise para as variáveis (a) temperatura (°C), (b) razão de mistura do vapor d’água (g/kg), (c) vento (m/s) e (d) advecção de temperatura (°Cm/s). Áreas com contorno preto representam os limites continente e corpos de água. Áreas com contorno azul representam a área urbana de Manaus no cenário futuro (EXPFUT) e verde representam a área urbana de Manaus no cenário atual (EXPCTRL).

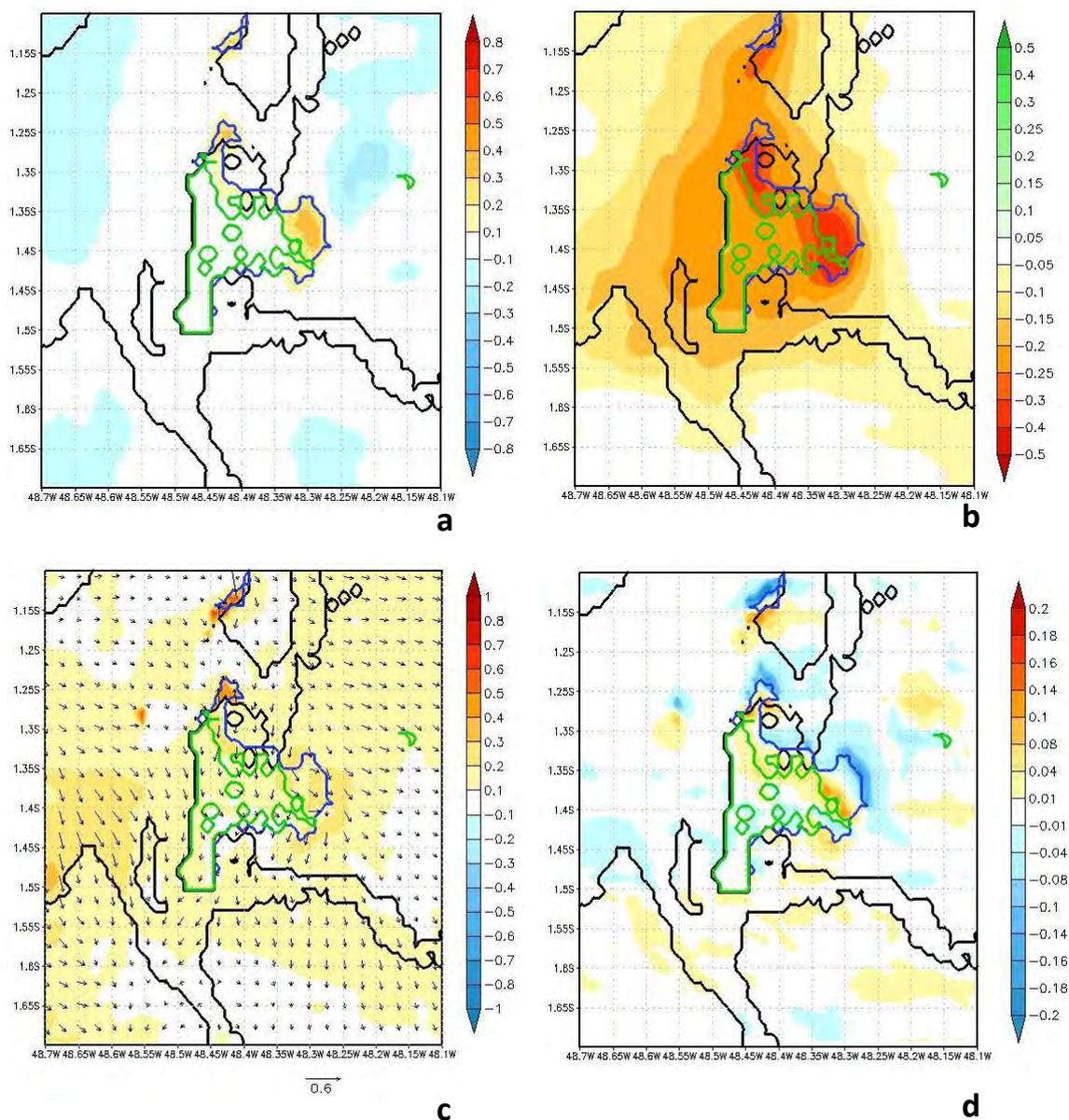


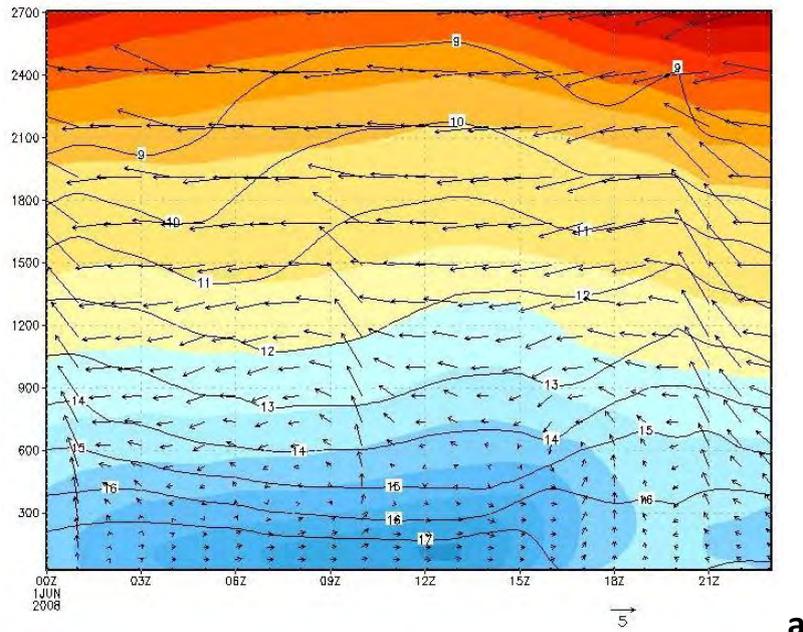
Figura 4.55 – Diferença entre o EXPFUT e EXPCTRL do campo médio para o período de análise para as variáveis (a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), (b) razão de mistura do vapor d'água (g/kg), (c) vento (m/s) e (d) advecção de temperatura ($^{\circ}\text{Cm}/\text{s}$). Áreas com contorno preto representam os limites continente e corpos de água. Áreas com contorno azul representam a área urbana de Belém no cenário futuro (EXPFUT) e verde representam a área urbana de Belém no cenário atual (EXPCTRL).

Analisando as anomalias no escoamento entre os cenários atual e futuro para Belém, observa-se que existe um escoamento anômalo de noroeste sobre praticamente toda a grade analisada (Figuras 4.55c). O aumento da área urbana de Belém possivelmente intensificou o gradiente térmico formado entre a cidade e o rio, formando um

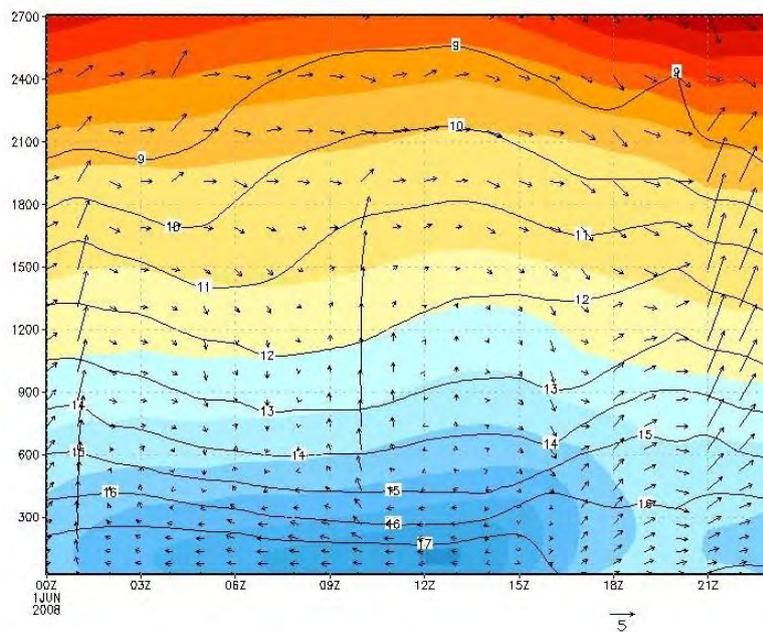
escoamento de brisa fluvial mais intenso do que o observado no cenário atual. Os resultados referentes às comparações entre os dois experimentos, EXPCTRL e EXPFUT, deixam evidente que uma advecção anômala fria é observada na nova fronteira urbana (Figuras 4.55d). Esta advecção anômala possivelmente está associada ao novo gradiente térmico formado entre a nova área urbana e regiões adjacentes, intensificando o gradiente térmico e conseqüentemente criando um escoamento entre a cidade e regiões vizinhas.

A Figura 4.56 mostra o perfil de temperatura potencial e componentes zonal e meridional do vento para o EXPFUT em Manaus. Assim como observado nos demais cenários, existe uma célula de circulação bem definida entre a superfície e 1500m de altitude, mais profunda do que nos demais cenários. Observa-se que o escoamento próximo à superfície é mais intenso no EXPFUT do que nos EXPCTRL e EXPPAS. As mudanças significativas nas dimensões da área urbana de Manaus apresentaram grande influência na intensificação e formação de circulações locais na área de estudo.

O perfil de temperatura potencial e componentes zonal e meridional do vento para o EXPFUT em Belém é mostrado na Figura 4.57. Assim como observado nos demais cenários, no perfil para o escoamento zonal nota-se a presença de um escoamento acima de 500m com sentido de leste para oeste, provavelmente representando o escoamento de grande escala, observado nos demais cenários. É possível observar que o escoamento entre a superfície e 500m apresenta uma inversão de sentido com o decorrer do dia, e este é mais profundo para o cenário do contexto do EXPFUT. O movimento vertical observado no decorrer da tarde é mais intenso para o cenário futuro do que no cenário atual, intensidade esta relacionada com o maior aquecimento da área urbana neste cenário.



a



b

Figura 4.56 – Variação diurna média para o período de análise do perfil vertical médio de temperatura potencial, razão de mistura do vapor d'água e componentes (a) zonal e (b) meridional do vento para o EXPFUT em Manaus.

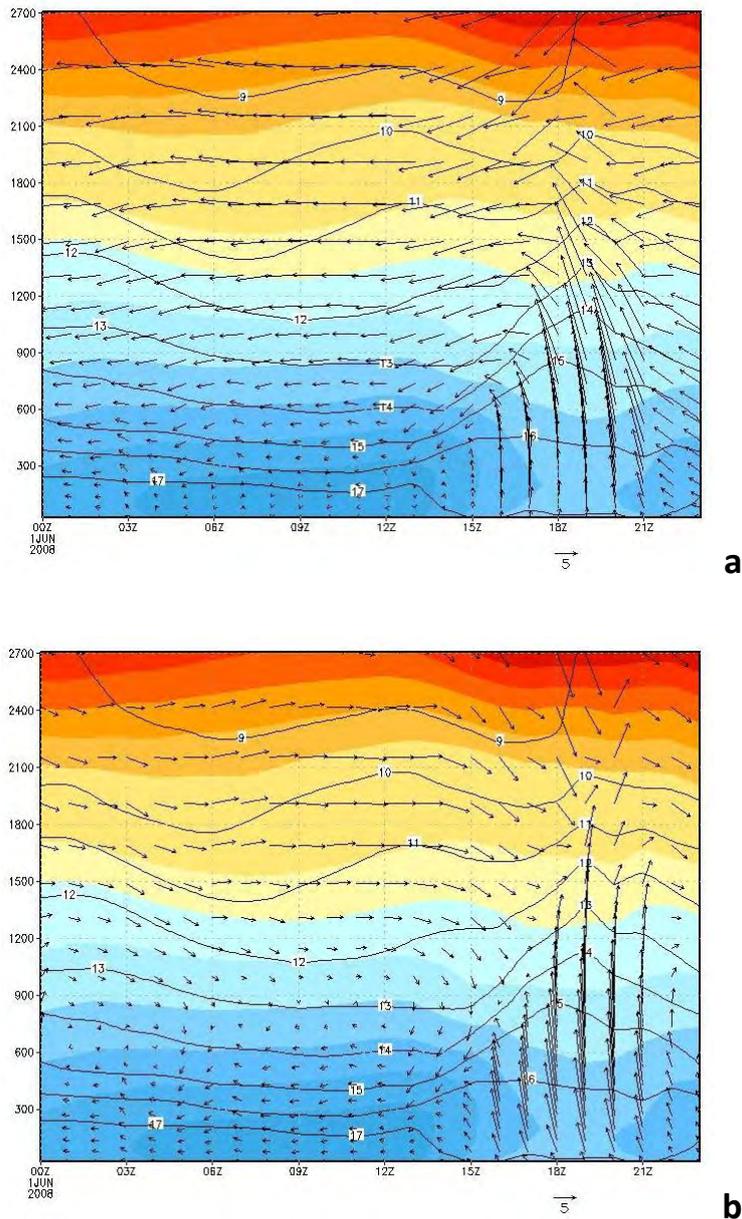


Figura 4.57 – Variação diurna média para o período de análise do perfil vertical médio de temperatura potencial, razão de mistura do vapor d’água e componentes (a) zonal e (b) meridional do vento para o EXPFUT em Belém.

Quando analisado o mesmo perfil, referente ao EXPFUT para Belém, porém para a componente meridional do vento, novamente fica clara a presença de uma célula de circulação como pode ser observado nos demais cenários. Nota-se que esta célula é mais profunda para o EXPFUT, novamente relacionada com modificações na CLP devido ao maior aquecimento da superfície urbana. Outra característica interessante a ser ressaltada é que o movimento vertical tem início mais cedo do que nos demais cenários,

visto que devido às mudanças no BES a cidade começa a se aquecer mais rapidamente do que nos EXPCTRL e EXPPAS.

Assim como observado nas diferenças entre o EXPCTRL e o EXPPAS, o cenário futuro em Manaus (Figura 4.58) e Belém (Figura 4.59) também apresenta grandes modificações no BES sobre a região urbana. Nota-se que há um aumento significativo do fluxo de calor sensível sobre a nova região urbanizada, representando assim a contribuição no aumento dos fluxos antropogênicos e a influência das propriedades da superfície urbana na modificação do BES no cenário futuro. No mesmo sentido, as modificações nas propriedades da superfície urbana e a substituição de área vegetada por área urbana modifica de forma significativa também o fluxo de calor latente, com valores significativos sobre a nova região urbanizada.

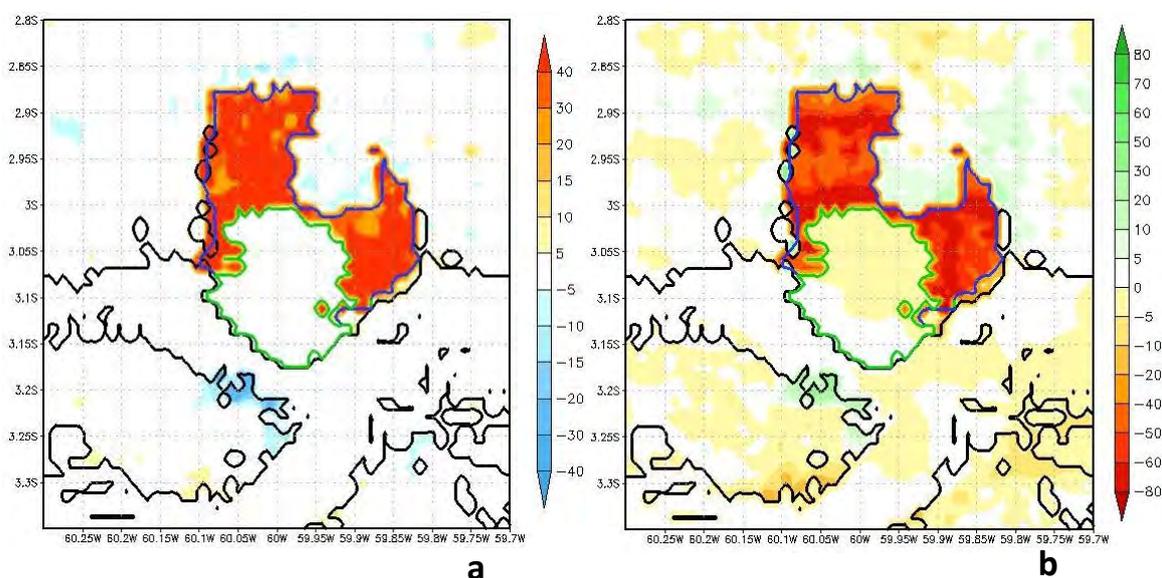


Figura 4.58 – Diferença média para o período de análise entre os EXPFUT e EXPCTRL para as variáveis (a) fluxo de calor sensível (w/m^2) e (b) fluxo de calor latente (w/m^2). Áreas com contorno preto representam os limites continente e corpos de água. Áreas com contorno azul representam a área urbana de Manaus no cenário futuro (EXPFUT) e verde representam a área urbana de Manaus no cenário atual (EXPCTRL).

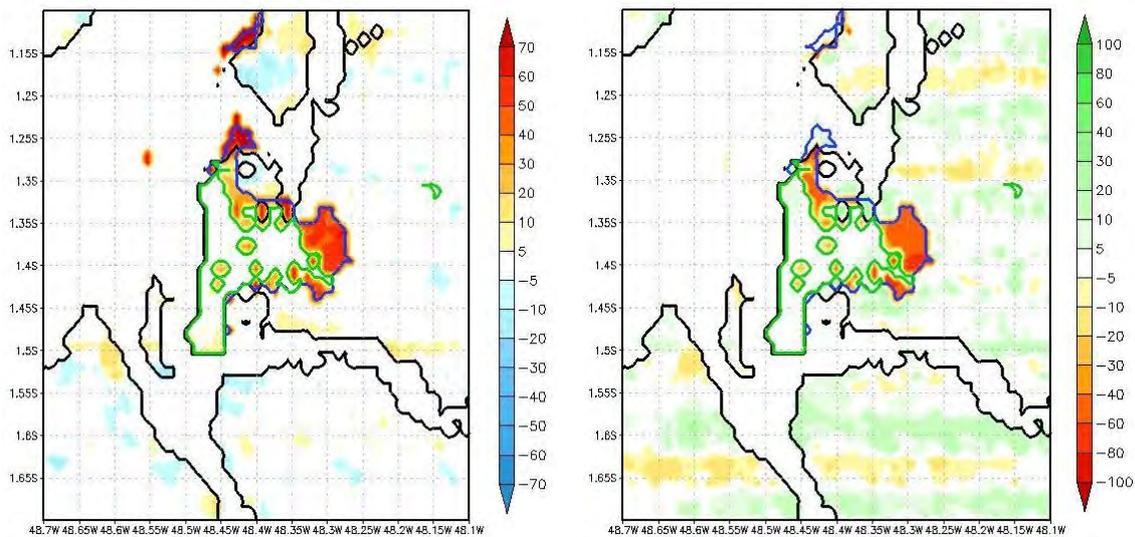


Figura 4.59 – Diferença média para o período de análise entre os EXPFUT e EXPCTRL para as variáveis (a) fluxo de calor sensível (w/m^2) e (b) fluxo de calor latente (w/m^2). Áreas com contorno preto representam os limites continente e corpos de água. Áreas com contorno azul representam a área urbana de Belém no cenário futuro (EXPFUT) e verde representam a área urbana de Belém no cenário atual (EXPCTRL).

Na análise do perfil de THETA e R para o EXPFUT (Figura 4.60), pode-se observar que a altura da CLP sobre a cidade de Manaus varia entre 1500 e 2500m de altitude, com menor altura no período da manhã, ficando mais profunda no decorrer da tarde e noite. Uma característica interessante é que a camada de inversão próxima à superfície é mais espessa do que nos experimentos anteriores, com uma profundidade de aproximadamente 300m. Em Belém, o perfil de THETA e R simulados no contexto do EXPFUT (Figura 4.61) mostra que a CLP é mais profunda do que nos cenários atual e passado, atingindo altura superior a 2200m, evidenciando assim o efeito do crescimento urbano na transferência de propriedades na vertical no interior da CLP. Pode-se observar que existe uma camada de inversão mais próxima à superfície, atingindo níveis superiores a 300m. Esta maior espessura da camada mais superficial reflete de forma direta a influência do crescimento urbano e do maior aquecimento da área urbana devido aos maiores valores de fluxos antropogênicos, mostrando que as modificações no BES em área urbana apresenta influência direta sobre a CLP.

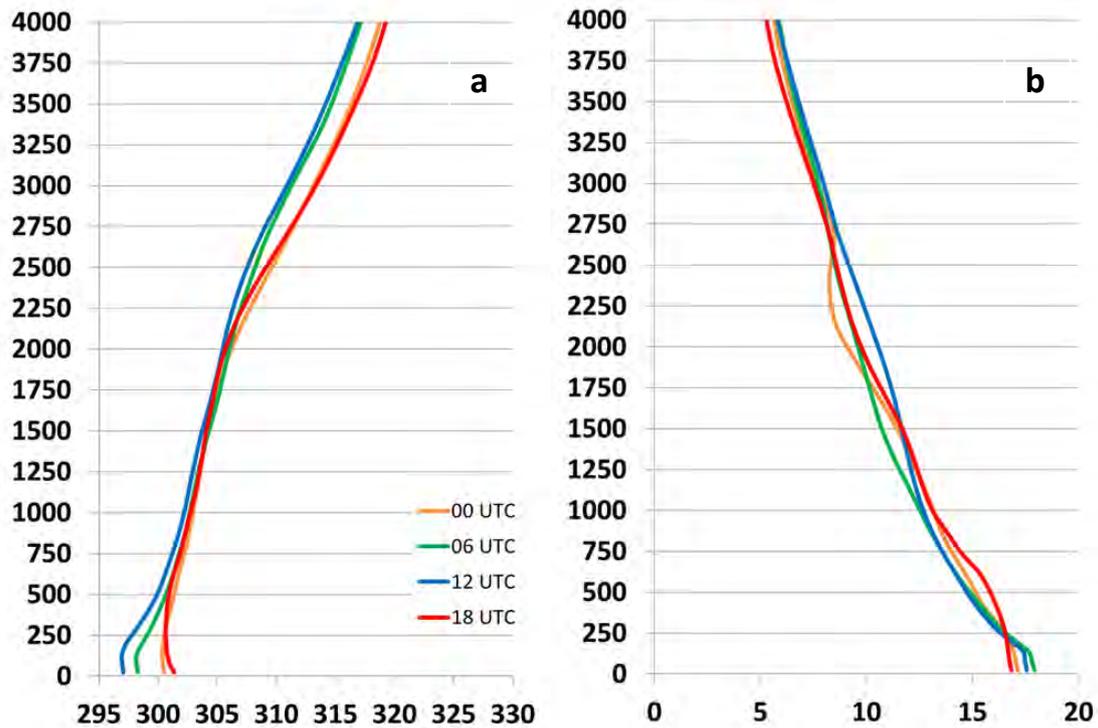


Figura 4.60 – Perfil vertical de (a) temperatura potencial (K) e (b) razão de mistura do vapor d’água simulados pelo EXPFUT em Manaus.

A análise da variação na direção no escoamento em superfície no cenário futuro em Manaus (Figura 4.62) e Belém (Figura 4.63) não mostra mudança significativa com relação ao cenário atual. Para os resultados de Manaus, observa-se um escoamento associado ao contraste térmico entre o continente, neste caso área urbana, e o rio, como discutido anteriormente. Em Belém, o escoamento no cenário futuro é menos intenso do que o observado no cenário passado, mas apresenta maior intensidade do que o cenário atual. Possivelmente a intensificação do gradiente térmico entre área urbana e regiões adjacentes tenha influência direta sobre a intensidade simulada, juntamente com a intensificação do escoamento de grande escala observado anteriormente.

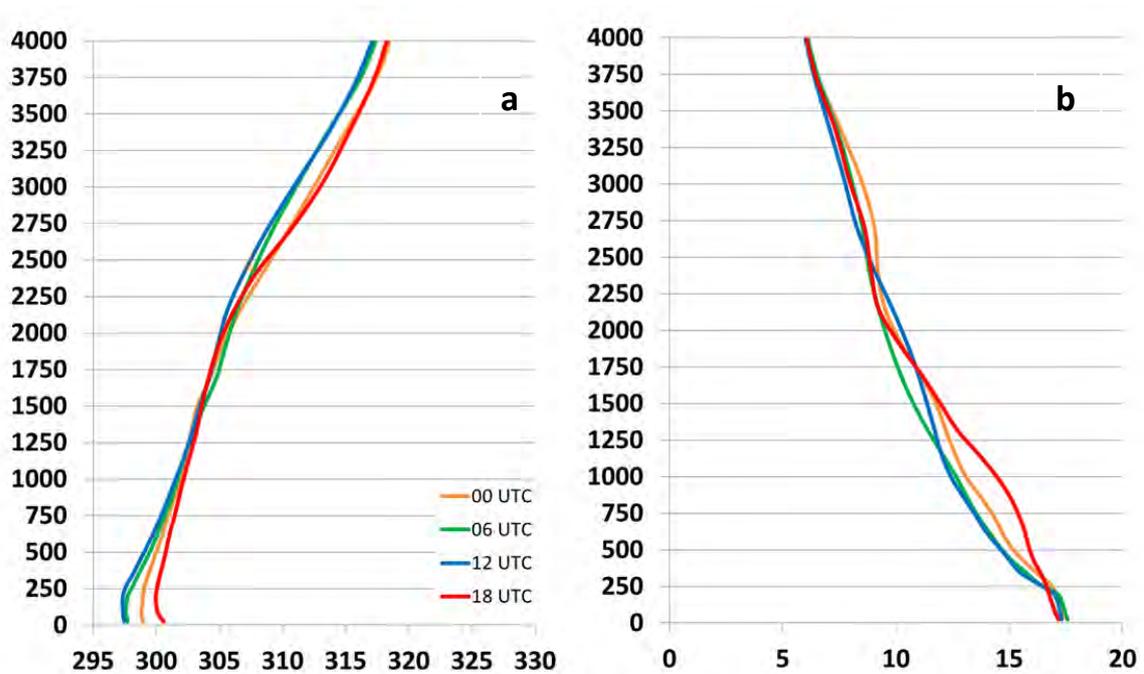


Figura 4.61 – Perfil vertical de (a) temperatura potencial (K) e (b) razão de mistura do vapor d'água simulados pelo EXPFUT em Belém.

Considerando as modificações no BES, nas propriedades da CLP e nas características do escoamento em baixos níveis sobre a área urbana, espera-se que modificações no padrão de precipitação também possam ser observadas. Alguns autores, como Rozoff et al. (2003) e Carrió et al. (2010), mostraram que a presença de áreas urbanas, associadas com a formação da ICU e modificação no escoamento em superfície, representam um aumento e uma intensificação de sistemas precipitantes sobre áreas urbanas.

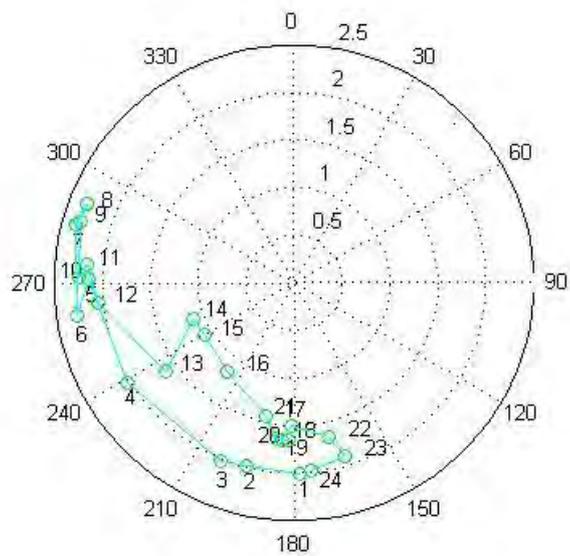


Figura 4.62 – Hodógrafa do vento simulado no EXPFUT em Manaus.

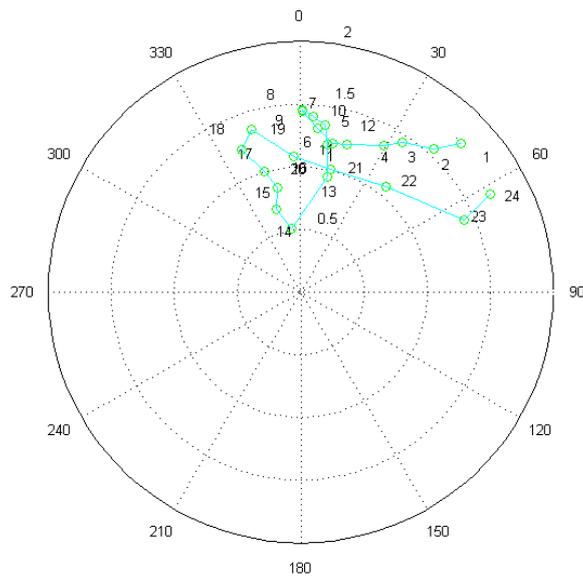


Figura 4.63 – Hodógrafa do vento simulado no EXPFUT em Belém.

Analisando a Figura 4.64a observa-se que as diferenças entre o EXPCTRL e o EXPPAS em Manaus apresentam valores positivos e negativos sobre a área urbana. Nota-se um aumento na taxa de precipitação de aproximadamente 0,15mm/h sobre a região em que foi observado o processo de crescimento urbano, mas uma diminuição de mesma dimensão é observada sobre o oeste da área urbana, região esta já existente no passado.

As diferenças ficam mais significativas quando se analisa a influência do crescimento urbano extrapolado para o futuro (Figura 4.64b). Nota-se uma grande diminuição nas taxas de precipitação, de aproximadamente 0,3mm/h sobre a área urbana já existente no cenário atual.

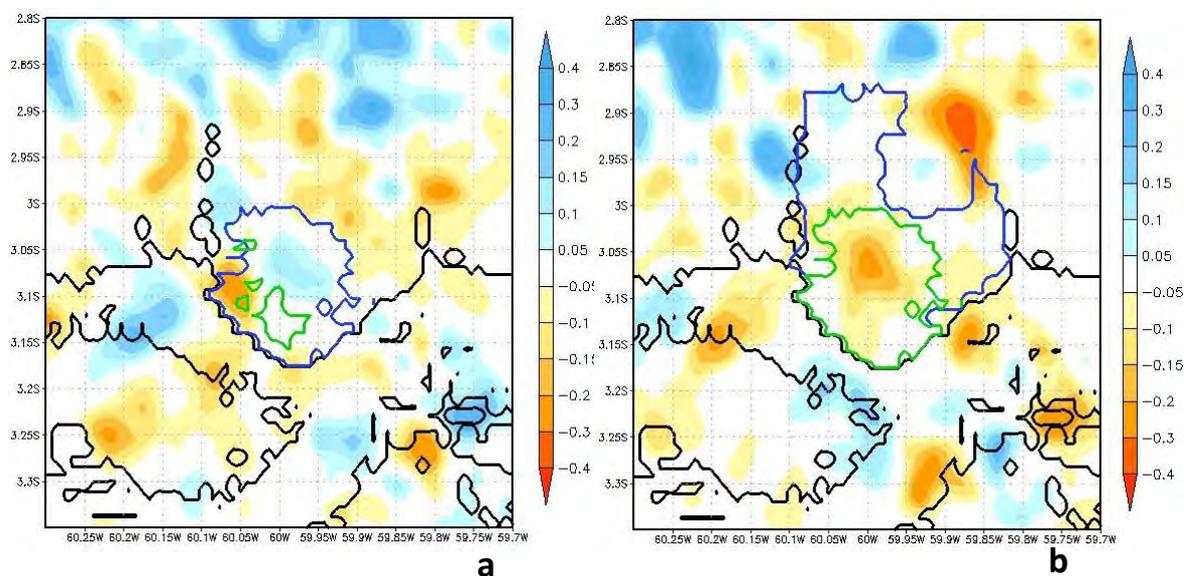


Figura 4.64 – Diferença média para o período de análise para as taxas de precipitação (mm/h) entre os (a) EXPCTRL e EXPPAS e (b) EXPFUT e EXPCTRL. Áreas com contorno preto representam os limites continente e corpos de água. Áreas com contorno azul representam a área urbana de Manaus (a) no cenário atual (EXPCTRL) e (b) no cenário futuro (EXPFUT). Áreas em verde representam a área urbana de Manaus no (a) cenário passado (EXPPAS) e (b) no cenário atual (EXPCTRL).

Estes resultados mostram que o crescimento da área urbana de Manaus apresenta uma relação negativa com o aumento nas taxas de precipitação, assim como observado nas análises observacionais. Possivelmente esta diminuição está associada à formação precoce e mais dispersa de sistemas convectivos sobre a cidade, causados principalmente pelo aumento da rugosidade da superfície urbana, levando a uma diminuição na convergência em superfície. Um padrão de relação negativa entre crescimento urbano e taxas de precipitação também foi observado por Guo et al. (2006).

As diferenças apresentadas na Figura 4.65 deixam claro que com o aumento da área urbana de Belém, entre os cenários passado e atual, há um aumento nas taxas de

precipitação sobre a área urbana em aproximadamente 0,5 mm/h. Estes resultados mostram-se consistentes com as tendências de aumento na precipitação acumulada sobre a área urbana de Belém evidenciadas nos estudos observacionais. A intensificação da atividade convectiva com o aumento da área urbana, clara na análise dos perfís de escoamento, foi um dos principais fatores que influenciaram este aumento da precipitação sobre a área urbana.

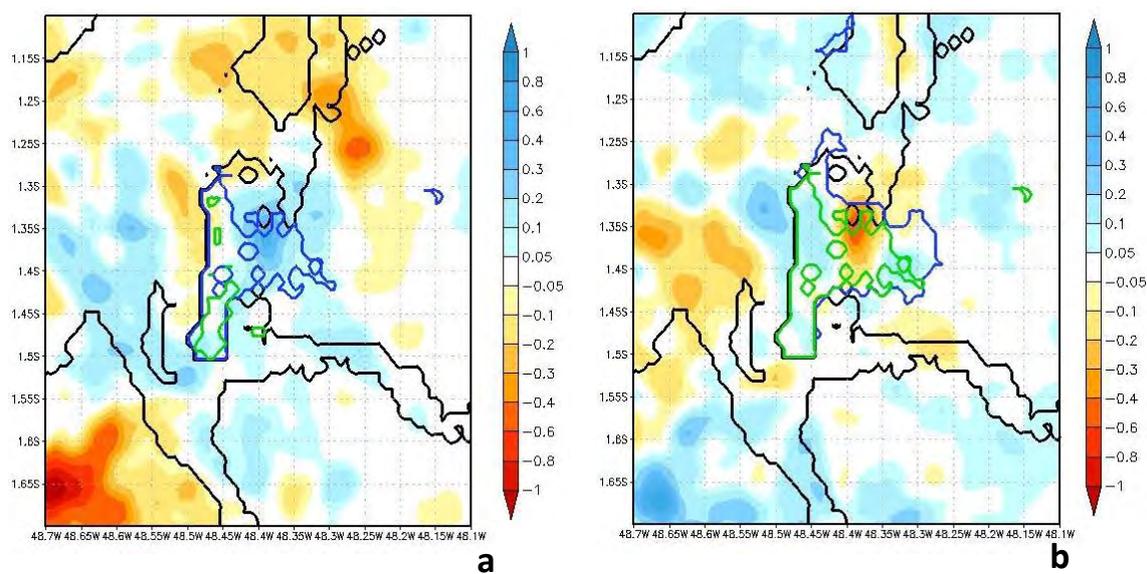


Figura 4.65 – Diferença média para o período de análise para as taxas de precipitação (mm/h) entre os (a) EXPCTRL e EXPPAS e (b) EXPFUT e EXPCTRL. Áreas com contorno preto representam os limites continente e corpos de água. Áreas com contorno azul representam a área urbana de Belém (a) no cenário atual (EXPCTRL) e (b) no cenário futuro (EXPFUT). Áreas em verde representam a área urbana de Belém no (a) cenário passado (EXPPAS) e (b) no cenário atual (EXPCTRL).

Em contraponto, nota-se que com a extrapolação do crescimento urbano em Belém, uma diminuição de aproximadamente 0,3 mm/h nas taxas de precipitação é observada sobre a cidade. Possivelmente esta diminuição está associada à formação precoce e mais dispersa de sistemas convectivos sobre a cidade, assim como observado para Manaus, causados principalmente pelo aumento da rugosidade da superfície urbana o que leva a uma diminuição na convergência em superfície.

4.5.3 Considerações finais sobre as simulações numéricas para as cidades de Manaus e Belém

Os resultados apresentados para as simulações numéricas comprovam que o modelo BRAMS, acoplado com o esquema de dossel urbano TEB, apresenta um ótimo desempenho para a simulação da ICU. Os testes realizados comprovam que a melhor representação do dossel urbano apresenta relação direta com o melhor desempenho do modelo, principalmente com a estimativa dos fluxos de calor antropogênicos.

O ciclo diurno de temperatura simulado para diversos pontos da área urbana de Manaus e também para a área de floresta apresentou valores satisfatórios e representativos dos dados reais observados. As estatísticas apresentadas para as duas cidades estudadas, comprovam que o ciclo diurno de temperatura máxima está em fase com os dados observados, mas também mostra que o modelo possui certa deficiência em representar os mínimos. Os valores de umidade relativa foram bem simulados pelo modelo BRAMS, mas apresentaram uma defasagem de horário em relação aos máximos e mínimos. Assim sendo, observa-se que o modelo BRAMS ainda possui alguns erros sistemáticos na representação de máximos e mínimos, característica presente em praticamente todos os modelos atmosféricos.

Foi possível observar que a presença da área urbana influencia no comportamento do BES, escoamento e características da CLP sobre os dois municípios estudados. Nas simulações representativas do cenário atual de usos e cobertura da terra para Manaus, foi possível observar que o modelo representa de forma satisfatória a formação da ICU. Foi possível observar também que a cidade é mais quente e seca que as áreas adjacentes, concordando assim com a definição de ICU apresentada na literatura.

Os resultados também permitiram concluir que a presença da área urbana de Manaus apresenta grande influência na circulação atmosférica, principalmente nos níveis mais próximos da superfície. Foi possível observar a formação de um escoamento de brisa entre a região de floresta e a área urbana, como também um escoamento de brisa fluvial, entre o continente, neste caso a cidade de Manaus, e o rio. A circulação de brisa fluvial é mais intensa entre a superfície e 300m de altura, com uma corrente de retorno em níveis superiores a 600m, profundidade esta diretamente relacionada com a altura da CLP sobre a cidade de Manaus. Devido ao contraste de temperatura entre o rio e a área

urbana de Manaus, um escoamento com sentido cidade para o rio foi observado durante a noite e início da manhã, invertendo seu sentido no decorrer do dia. Estes resultados mostraram-se de acordo com estudos observacionais realizados para área de estudo.

Em Belém, observou-se que o escoamento de grande escala apresenta uma componente de intensidade moderada a forte sobre a área urbana de Belém, evidenciando assim uma influência direta deste escoamento sobre a formação e intensificação de circulações locais sobre a área de estudo causadas pela presença da área urbana. Outra característica que evidencia o papel da área urbana sobre as propriedades da atmosfera na área de estudo é a formação de uma camada de inversão clara entre a superfície e aproximadamente 250m de altura. Também tornou-se clara a evolução da CLP de acordo com o aquecimento da área urbana, o qual mostrou influência na transferência de propriedades na vertical sobre a cidade de Belém.

Os efeitos do crescimento urbano de Manaus e Belém sobre as características atmosféricas locais foram analisadas através de comparações entre cenários representativos das condições referentes à dimensão da área urbana no passado e uma extrapolação para o futuro.

A análise dos cenários de crescimento urbano deixou clara a influência do processo de urbanização sobre o microclima local. Foi observado que com o aumento da área urbana das duas cidades existe um aumento de temperatura e uma diminuição na umidade relativa, efeitos diretamente relacionados com modificações no BES em área urbana causados pela maior superfície urbana e pelo aumento nos fluxos antropogênicos. Estes resultados dão suporte à hipótese levantada através das análises observacionais.

Também puderam ser observadas modificações no padrão de escoamento sobre a área urbana de Manaus devido ao aumento de suas dimensões. Foi observado que a circulação de brisa aumenta sua intensidade e profundidade, modificações estas diretamente associadas às mudanças no BES. As modificações no BES apresentaram relação direta com mudanças na altura da CLP sobre a cidade de Manaus, assim como mudanças no gradiente térmico entre a floresta/rio e a área urbana.

Em Belém, as modificações no escoamento sobre área urbana devido ao seu crescimento não ficaram muito claras. Foi possível observar que há uma maior profundidade do escoamento em baixos níveis, relacionado principalmente com a maior

profundidade da camada de inversão próxima a superfície e também à maior profundidade da CLP com o decorrer do crescimento urbano. Nota-se também que abaixo do escoamento de grande escala, entre a superfície a aproximadamente 300m de altura existe uma inversão do escoamento, mostrando um sinal, mesmo que fraco, da presença de um escoamento e uma circulação gerada pelo gradiente térmico entre área urbana e regiões adjacentes.

Os resultados também evidenciaram uma relação negativa entre o crescimento urbano de Manaus e as taxas de precipitação, concordando com as análises observacionais realizadas anteriormente. Observou-se que com o aumento da área urbana a precipitação sobre a cidade diminuiu. Possivelmente a modificação no padrão de circulação e convergência em superfície, causados pelo aumento da rugosidade, foram fatores que justificam os padrões observados.

Diferentemente do observado para Manaus e assim como observado nos estudos observacionais para Belém, ficou clara a influência do crescimento urbano no aumento das taxas de precipitação sobre a cidade de Belém. As mudanças nas propriedades de superfície e consequentes modificações já citadas no BES, escoamento e características da CLP, influenciaram de forma direta um incremento de aproximadamente 0,5 mm/h entre o EXPPAS e EXCTRL. Já com a extrapolação do crescimento da área urbana de Belém foi observado uma decréscimo nas taxas de precipitação em aproximadamente 0,3 m/h, o que pode estar relacionado com o aumento da rugosidade e possível formação mais esparsa de sistemas precipitantes sobre a área de estudo.

No contexto geral dos resultados apresentados nesta seção, foi possível observar a influência da área urbana e do crescimento urbano na modificação das características da atmosfera e no microclima local, assim como foi observado a partir de estudos observacionais já discutidos no contexto deste trabalho. Portanto, a utilização da ferramenta de modelagem atmosférica juntamente com uma descrição mais detalhada do BES em áreas urbanas é essencial para o entendimento dos processos atmosféricos relacionados com a urbanização.

5. CONCLUSÕES

Com o objetivo de analisar a influência da Ilha de Calor Urbana (ICU) das cidades de Manaus e Belém e sua influência sobre o microclima local, foram realizados estudos observacionais e simulações numéricas com o modelo de mesoescala BRAMS.

Inicialmente foi realizado estudo observacional do crescimento das dimensões urbanas das cidades em estudo. Observou-se que as duas cidades aumentaram sua área e sua população consideravelmente nos últimos 30 anos, onde foi observado que Manaus aumentou sua área em 153 km² e Belém 190 km².

Da análise dos dados observacionais foi possível observar que existe uma tendência significativa de aumento da temperatura nas cidades de Manaus e Belém nos últimos 50 anos. Manaus apresentou uma tendência de aquecimento de 0,74°C para a temperatura média, enquanto Belém apresentou uma tendência de elevação na temperatura média de 1,51°C. Para as variáveis representativas dos máximos e mínimos diários, foi possível observar para as duas cidades que estas também apresentam uma tendência de elevação da temperatura máxima e mínima. Com relação aos dados de precipitação, foi observada uma tendência de queda nos acumulados em Manaus e tendência de elevação nos valores observados em Belém.

Também foi realizada uma análise de extremos para os dois municípios objetivando entender o papel do crescimento urbano na modificação do microclima. Foi observado que existem mudanças significativas nos extremos diários de temperatura, como, por exemplo, a elevação da temperatura do dia mais quente. Outros extremos apresentaram comportamento inverso para as duas cidades. Enquanto Belém apresentou um aumento no número de noites frias e noites quentes, Manaus apresentou uma queda nos valores para estes dois índices. No contexto da análise destes extremos, não foi possível obter um resultado conclusivo sobre os efeitos diretos do crescimento urbano na modificação do microclima, mas ressalta-se que não pode ser descartada esta hipótese.

É importante salientar que os resultados obtidos através dos testes estatísticos não deixaram clara a influência de mudanças climáticas abruptas nas variáveis analisadas que justifiquem as tendências observadas. Sendo assim, não se pode descartar que além da variabilidade observada, relacionada com fenômenos de escala global como El Niño e

La Nina, mudanças nos usos da terra em escala local podem apresentar influência direta na modificação do microclima local.

Para tentar quantificar a influência do crescimento urbano das cidades de Manaus e Belém sobre o comportamento e tendências de elevação nos valores de temperatura observada, foi utilizada metodologia proposta por Kalnay e Cai (2003). Neste sentido foram então comparados os dados observacionais, coletados nas áreas em estudo, com dados de reanálises atmosféricas, visto que este último conjunto de dados não utiliza em seu processo de assimilação dados observados em superfície, e desta forma este não reflete de forma direta a influência de modificações nos usos da terra.

Aplicando a metodologia descrita acima, foi possível observar que existe uma tendência de elevação nos valores de temperatura para as cidades de Manaus e Belém relacionada com fatores de maior escala. Nesta mesma análise também foi possível quantificar a influência da mudança nos usos da terra, neste caso processo de urbanização na região de estudo, sobre o comportamento da temperatura. Observou-se que existe uma diferença significativa entre estes dois conjuntos, representando mudanças no microclima local, diretamente relacionados ao processo de urbanização. Sendo assim, os registros históricos analisados no contexto das análises observacionais apresentam um sinal claro de mudança, possivelmente relacionada ao crescimento das cidades de Manaus e Belém.

Completando as análises observacionais, foi realizado o estudo da ICU da cidade de Manaus. No contexto geral dos resultados foi possível observar que a cidade é até 2,98°C mais quente que a região de floresta adjacente, mostrando assim a formação e característica básica de ICU. A característica principal da ICU da cidade de Manaus foi a ocorrência de dois picos de maior intensidade, um as 8 HL e outro entre as 15 HL e 17 HL, diferentemente de outros estudos sobre ICU para Manaus como também para outros locais no mundo. Esta diferente característica foi associada às taxas de aquecimento e resfriamento da área urbana e de floresta. Foi observado que a cidade se aquece primeiro e mais lentamente e resfria-se mais tarde e mais rapidamente do que a área de floresta adjacente, justificando assim o comportamento observado. Também não se pode descartar a influência de fluxos de calor antropogênicos no desenvolvimento destes dois máximos de intensidade da ICU, mas este fator não foi investigado.

Complementando os resultados sobre a influência da ICU das cidades de Manaus e Belém sobre o microclima local, foram realizadas simulações numéricas para diferentes cenários de crescimento urbano, contemplando um cenário atual, um cenário passado, referente ao ano de 1973, e um cenário futuro, onde a área urbana das duas cidades foi duplicada seguindo a tendência de crescimento observado através das análises observacionais.

Uma primeira análise dos resultados mostrou que o modelo BRAMS acoplado com o esquema de dossel TEB possui um excelente desempenho em representar os valores e o ciclo diurno de temperatura e umidade em área urbana para as duas cidades analisadas, apresentando apenas alguns erros relacionados aos máximos e mínimos diários.

Em Manaus foi possível observar que a presença da área urbana modifica de forma significativa o BES, gerando um gradiente térmico entre a cidade de regiões adjacentes, favorecendo a formação e intensificação de circulações atmosféricas locais. Os resultados deixaram clara a formação de um escoamento de brisa entre a área urbana e o rio, com sentido cidade para o rio entre as 21HL e 09 HL, invertendo o sentido entre 10HL e 20HL. Este escoamento em baixos níveis caracteriza a brisa fluvial sobre a área de estudo, criando uma célula de circulação bem definida entre a superfície e níveis superiores a 2000m.

O crescimento da área urbana de Manaus apresentou direta influência no BES, onde foi possível observar que com aumento da área da cidade de Manaus existe um aumento na temperatura, uma diminuição na umidade e conteúdo de água na atmosfera e modificações significativas no escoamento em baixos níveis. Mudanças significativas devido ao processo de urbanização também foram observados na estrutura e característica da CLP sobre a região urbana. Foi possível observar que o escoamento em baixos níveis, relacionado com as circulações de brisa descritas acima, apresenta maior intensidade, principalmente devido à intensificação do gradiente térmico. Observou-se também uma correlação negativa entre aumento da dimensão urbana e aumento da precipitação, onde ficou claro que as taxas de precipitação sobre a área urbana tendem a diminuir com o aumento da cidade. Os resultados apresentados sobre o efeito do crescimento urbano em Manaus concordam com as tendências de elevação de temperatura e queda nas taxas de precipitação observadas nos dados observacionais, suportando assim a hipótese de que com o aumento das dimensões urbanas, da

população e dos fluxos de calor de fontes antropogênicas, o microclima da cidade pode ser modificado significativamente.

Os resultados de modelagem atmosférica obtidos para Belém também deixam clara a influência do dossel urbano no BES, na formação da ICU e nas características da atmosfera sobre a área de estudo. Foi possível observar que a cidade é mais quente e seca do que regiões adjacentes, gerando um gradiente térmico que dá suporte a formação de um escoamento de brisa em baixos níveis. Observou-se que a presença de um escoamento de grande escala, possivelmente representativo da brisa marítima, influencia de forma direta a formação de uma célula de circulação local sobre a cidade de Belém. Também se mostrou clara a formação de um intenso movimento vertical sobre a área urbana, diretamente relacionado com o aquecimento diurno, o qual apresenta-se como característica essencial para o transporte de propriedades na vertical e modificações na CLP sobre a área de estudo.

As análises referentes aos efeitos do crescimento urbano de Belém também evidenciaram uma relação direta entre crescimento da área urbana e aumento nos valores de temperatura em superfície, diminuição na umidade relativa e conteúdo de água na atmosfera e modificações no escoamento em baixos níveis, apresentando mudanças no sentido e aumento na intensidade. O crescimento da área urbana de Belém também apresentou influência sobre as taxas de precipitação, com uma relação direta entre aumento das dimensões urbanas e aumento nas taxas de precipitação. Assim como para Manaus, os resultados apresentados através da modelagem suportam as hipóteses apresentadas nas análises observacionais, onde foi observado que as tendências de aumento na temperatura e precipitação em Belém estão diretamente relacionadas com o processo de urbanização.

No contexto geral dos resultados foi possível observar que o crescimento da área urbana, aumento da população e conseqüentemente dos fluxos de calor antropogênicos, apresenta relação direta com modificações no microclima local das cidades de Manaus e Belém. Salienta-se assim que políticas públicas que tenham como objetivo um crescimento organizado de áreas urbanas e o conforto da população são necessárias para que os efeitos das mudanças climáticas não sejam potencializados por efeitos já existentes no microclima local relacionados com o processo de urbanização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREAE, M.O. et al. Biogeochemical cycling of carbon, water, energy, trace gases and aerosols in Amazonia: The LBA-EUSTACH experiments. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, pp. 8066 - 8091. 2002.

ANTHES, R. A. A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model. **Monthly Weather Review**, v. 105, 270 – 286. 1977.

ANTHES, R. A., SEAMAN, N. L., WARNER, T. T. Comparisons of numerical simulations of the planetary boundary layer by a mixed-layer model. **Monthly Weather Review**, 108, 365-376. 1980.

ARYA, S. P. **Introduction to Micrometeorology**. Academic Press. 2001. 420 p.

ATKINSON, B. W. **Mesoscale Atmospheric Circulations**. Academic Press London. 495 p. 1981.

AVISSAR, R., SILVA DIAS, P. L., SILVA DIAS, M. A. F., NOBRE, C. A. The Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia (LBA): Insights and future research needs. **Journal of Geophysical Research**, v. 07, pp. 54.1-54.6. 2002.

BETTS, A. K. Understanding land-surface-atmosphere coupling in observations and models. In: MERRA Workshop, AMS Conference, 2009. **Proceedings of MERRA Workshop**. Phoenix: AMS, 2009.

BORNSTEIN, R., LIN, Q. Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: three case studies. **Atmosphere Environment**, v. 34, pp. 507-516. 2000.

CARVALHO, A.M.G. **Conexões entre a circulação em altitude e a convecção sobre a América do Sul**. Dissertação de Mestrado (PI INPE 4923 - TDL 283) - INPE. São José dos Campos, 121 p. 1989.

CHEN, C. E COTTON, W. R. A One Dimensional Simulation of The Stratocumulus Capped Mixed Layer. **Boundary-Layer Meteorology** 25, pp 289-321. 1983.

CIVEROLO, K., HOGREFE, C., LYNN, B., ROSENTHAL, J., KU, J.Y., SOLECKI, W. Estimating the effects of increased urbanization on surface meteorology and ozone concentrations in the New York City metropolitan region. **Atmospheric Environment**, 41, pp. 1803–1818. 2007.

CHOW, W., ROTH, M. Temporal dynamics of the urban heat island of Singapore. **International Journal of Climatology** 26: 2243–2260, 2006.

COUTTS, A. M., BERINGER, J., TAPPER, N. J. Impact of increasing urban density on local Climate: spatial and temporal variations in the surface energy balance in Melbourne, Australia. **Journal of Applied Meteorology**, 46, 477–493. 2007.

COHEN, J. C. P., SILVA DIAS, M. A. F., NOBRE, C. A. Environmental conditions associated with Amazonian squall lines: a case study. **Monthly Weather Review**, 123, 11, 3163-3174. 1995.

COMARAZAMY, D. E., GONZÁLES, J. E., LUVALL, J. C. The Urban Heat Island Phenomenon in a Coastal Tropical City: Case Study of the Metropolitan Area of San Juan, Puerto Rico. **Urbanization, Global Environmental Change, and Sustainable Development in Latin America**. pp 59-75. 2007.

CORREIA, F. W. S., ALVALÁ, R. C. S., MANZI, A. O. Modeling the Impacts of Land Cover Change in Amazonian: A Regional Climate Model (RCM) Simulation Study. **Theoretical and Applied Climatology**. 2007.

COSTA, A. C. L. Variações sazonais a ilha de calor urbana na cidade de Belém-PA. In: IX Congresso Latina Americano e Ibérico de Meteorologia. **Anais do IX Congresso Latina Americano e Ibérico de Meteorologia**. 2001.

CUTRIM, E.; MARTIN, D.W.; RABIN, R. Enhancement of cumulus clouds over deforested lands in Amazonia. **Bulletin of American Meteorological Society**, 76(10), 1801-1805. 1995.

DEARDORFF, J. W. Closure of second and third-moment rate equations for diffusion in homogeneous turbulence. **Physic Fluids**, 21: 525-530. 1978.

DEFRIES, R. S., TOWNSHEND, J. R. G. NDVI derived land cover classification at global scales. **International Journal of Remote Sensing**, v. 15, pp. 3567-3586. 1994.

DICKINSON, R. E., HENDERSON-SELLERS, A., KENNEDY, P. J., WILSON, M. F. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme for the NCAR Community Climate Model. **NCAR Technical Note**, 275+STR. 1986.

DUPONT, S., OTTE, T. L., CHING, K. S. Simulation of meteorological fields within and above urban and rural canopies with a mesoscale model. **Boundary-Layer Meteorology**, 113, 111–158. 2004.

DURIEUX, L, MACHADO, L. A. T., LAURENT, H. The impact of deforestation on cloud cover over the Amazon arc of deforestation. **Remote Sensing of Environment**, V. 86, pp. 132-140. 2003.

EZBER, Y., LUTFI SEN, O., KINDAP, T., KARACA, M. Climatic effects of urbanization in istanbul: a statistical and modeling analysis. **International Journal of Climatology**, 27: 667–679. 2007.

FISCH, G., TÓTA J., MACHADO, L.A.T., SILVA DIAS, M.A.F., LYRA, R. F. da F., NOBRE, C. A., DOLMAN, A. J., GASH, J. H. C. The convective boundary layer over pasture and forest in Amazonia. **Theoretical and Applied Climatology**, v.78, n.1-3, p. 47-59. 2004.

- FISCH, G., TOTA, J., MACHADO, L., SILVA DIAS, M., DOLMAN, A.J. The convective boundary layer growth in the Amazônia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, pp. 47-60. 2004.
- FREITAS, E.D. **Circulações Locais em São Paulo e sua Influência na Dispersão de Poluentes**. Tese de Doutorado do Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, 176p. 2003.
- FREITAS E. D., MARTINS, L. D., SILVA DIAS, P. L., ANDRADE, M. F. A simple photochemical module implemented in RAMS for tropospheric ozone concentration forecast in the Metropolitan Area of São Paulo – Brazil: Coupling and validation. **Atmospheric Environment**, v.39, n.34, p.6352-61, 2005.
- FREITAS, E. D., ROZOFF, C. M., COTTON, W. R., SILVA DIAS, P. L. Interactions of an urban heat island and sea-breeze circulations during winter over the metropolitan area of São Paulo, Brazil. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 122, pp 43-65. 2007.
- FUJIBE F. Urban warming in Japanese cities and its relation to climate change monitoring. **International Journal of Climatology**. 2010.
- GALLO, K. P., OWEN, T. W., EASTERLING, D. R., JAMASON, P. E. Temperature trends of the U.S. Historical Climatology Network based on satellite-designated land use-land cover. **Journal of Climate**, v 12, pp 1344–1348. 1999.
- GANDU, A. W., COHEN, J. C. P., SOUZA, J. R. S. Simulation of deforestation in eastern Amazonia using a high-resolution model. **Theoretical And Applied Climatology**, v. 78, pp 123-135. 2004.
- GILBERT, R. O. **Statistical methods for environmental pollution monitoring**. New York: Van Nostrand Reinhold, 320 p. 1983.
- GOOSSENS, C. **Etude de l'homogénéité et de la stabilité des séries climatiques. Louvain-la-Neuve**. Institut d'Astronomie et Géophysique, G. Lemaitre, Université Catholique de Louvain. 40 p. 1983.
- GOOSSENS, C; BERGER, A. Annual and seasonal climatic variations over the Northern Hemisphere and Europe during the last century. **Annales Geophysicae**, v. 4, n. B4, pp. 385-399. 1986.
- GRIMMOND, C. S. B., OKE, T. R., STEYN, D. G. Urban water balance. 1. A model for daily totals. **Water Resource Research**, v. 22, pp.1397–1403. 1986.
- GRIMMOND, C. S. B, OKE, T. R. Urban water balance. 2.results from a suburb of Vancouver, British Columbia. **Water Resource Research**, v. 22, pp. 1404–1412. 1986.
- GRIMMOND, C. S. B., KING, T. S., ROTH, M., OKE, T. R. Aerodynamic roughness of urban areas derived from wind observations. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 89, pp. 1-24. 1998.

- GOH, K.C., CHANG, C.H. The relationship between height to width ratios and the heat island intensity at 22 : 00 h for Singapore. **International Journal of Climatology**, v. 19: 1011–1023. 1999.
- GUO, X., FU, D., WANG, J. Mesoscale convective precipitation system modified by urbanization in Beijing City. **Atmospheric Research**, v. 82 (1-2), pp. 112-126. 2006.
- HAGE, K.D. Urban–rural humidity differences, **Journal of Applied Meteorology**, v. 14, pp. 1277–1283. 1975.
- HAN, J., BAIK, J. A Theoretical and Numerical Study of Urban Heat Island–Induced Circulation and Convection. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 65, pp. 1859-1877. 2008.
- HARTMANN, D.L. **Global Physical Climatology**. Academic Press, 411 pp. 1994.
- HASTENRATH, S., HELLER, L. Dynamics of climatic hazards in northeast Brazil. **Quartely Journal of the royal Meteorological Society**, v. 103(435), pp. 77-92. 1997.
- HERDIES, D. L., KOUSKY, V., EBISUZAKI, W. The Impact of High-resolution SALLJEX Data on a Global NCEP Analysis. **Journal of Climate**, v. 20, pp. 5765-5783. 2007.
- HERDIES, D.L.; SILVA, A. da; SILVA DIAS, M.A.F.; FERREIRA, R. N. The moisture budget of the bi-modal pattern of the summer circulation over South America. **Journal of Geophysical Research**, v. 107(D20), pp. 42.1-42.13, 2002
- HOLMER, B., ELIASSON, I. Urban-rural vapour pressure differences and their role in the development of urban heat island. **Int. J. Climatol.**, v. 19, pp. 989-1009. 1999.
- HUA, L. J., MA, G. G., GUO, W. D. The impact of urbanization on air temperature across China. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 93, pp. 179–194. 2008.
- KALNAY, E., CAI, M. Impact of urbanization and land-use change on climate. **Nature**, v. 423, pp. 528-531. 2003.
- KARL, T. R., DIAZ, H. F., KUKLA, G. Urbanization: its detection and effect in the United States climate record. **Journal of Climate**, v. 1, pp. 1099–1123. 1988.
- KAYANO, M. T. **Um estudo climatológico e sinótico utilizando dados de radiossondagem (1968-1976) de Manaus e Belém**. Dissertação de mestrado em meteorologia do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 112 pp. 1979.
- KIM, Y., BAIK, J. Maximum urban heat island intensity in Seoul. **Journal of Applied Meteorology**, v. 41(6), pp. 651–659. 2002.
- KIM, Y., BAIK, J. Spatial and Temporal Structure of the Urban Heat Island in Seoul. **Journal of Applied Meteorology**, v. 44, pp. 591–605 2004.

KOSOVIC, B. Subgrid-scale modeling for high Reynolds number boundary layer flows. **J. Fluid Mech.**, v. 336, pp. 151–182. 1997.

KOUSKY, V. E. Diurnal Rainfall Variation in Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 108, pp. 488–498. 1980.

KUKLA, G., GAVIN, J., KARL T. R. Urban warming. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v. 25, pp. 1265–1270. 1986.

KUO, H. L. On formation and intensification of tropical cyclones through latent heat release by cumulus convection. **Journal of Atmospheric Science**, v. 22, pp. 40 – 63. 1965.

KUO, H. L. Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large-scale flow. **Journal of Atmospheric Science**, v. 31, pp. 1232 – 1240. 1974.

KUSAKA, H., KONDO, H., KIKEGAWA, Y., KIMURA, F. A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models. **Bound-Layer Meteorology**, v. 101, pp. 329–358. 2001.

LAURANCE, W. F., M. A., COCHRANE, S., BERGEN, P. M. P., FEARNSIDE, C., DELAMÓNICA, S. D'ANGELO, BARBER, T., FERNANDES. **The Future of the Brazilian Amazon. Science**, v. 291, pp. 438-439. 2001.

LEE, T. J., PIELKE, R. A. Estimating the soil surface specific humidity. **Journal of Applied Meteorology**, v. 31, pp. 480-484. 1992.

LI, Q., ZHANG, H., LIU, X., HUANG, J. Urban heat island effect on annual mean temperature during the last 50 years in China. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 79(3–4), pp. 165–174. 2004.

LIU, Y., CHEN, F., WARNER, T., BASARA, J. Verification of a mesoscale data assimilation and forecasting system for the Oklahoma City area during the Joint Urban 2003 field project. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 45, pp. 912–929. 2006.

LIU, W., YOU, H., DOU, J. Urban-rural humidity and temperature differences in the Beijing area. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 96, pp. 201-207, 2008.

LIVADA, I., SANTAMOURIS, M., NIACHOU, K., PAPANIKOLAOU, N., MIHALAKAKOU, G. Determination of places in the great Athens area where the heat island effect is observed. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 71, pp. 219–230. 2002.

LOUIS, J. F. A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. **Bound-layer Meteorology**, v. 17, pp. 187-202. 1979.

LU, L., DENNING, A. S., SILVA DIAS, M. A. F., SILVA DIAS, P. L., LONGO, M., FREITAS, S. R., SAATCHI, S. Mesoscale circulations and atmospheric CO₂ variations in the Tapajós region, Pará, Brazil. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, 2005.

MAHRER, Y. E PIELKE, R.A. The Effects of Topography on Sea and Land Breezes in a Two-Dimensional Numerical Model. **Monthly Weather Review**, v. 105, pp. 1151–1162. 1977.

MAITELLI, G. T. ; WRIGHT, I. R. The climate of a riverside city in the Amazon Basin: urban-rural differences in temperature and humidity. In: John H C Gash; Carlos NOBRE, A., ROBERTS, J. M., VICTORIA, R. L. **Amazoniam, Deforestation and Climate**. Londres: John Wiley & Sons, v. 1, p. 193-206. 1996.

MANTUA NJ, HARE Y, ZHANG JM, WALLACE & FRANCIS RC. A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, pp. 1069–1079. 1997.

MANLEY, G. On the frequency of snowfall in metropolitan England. **Quarterly Journal of Royal Meteorological Society**, v. 84, pp. 70–72. 1958.

MARENGO, J. A.; SOARES, W.; SAULO, C.; NICOLINI, M. Climatology of the Low-Level Jet east of the Andes as derived from the NCEP/NCAR reanalyses: characteristics and temporal variability. **Journal of Climate**, v. 17, n. 12, pp. 2261–2280, 2004.

MARENGO, J.A., NOBRE, C.A., TOMASELLA, J., OYAMA, M. D., SAMPAIO DE OLIVEIRA, G., DE OLIVEIRA, R., CAMARGO, H., ALVES, L. M., BROWN, I. F. The Drought of Amazonia in 2005. **Journal of Climate**, v. 21, pp. 495–516. 2008.

MARTILLI, A., CLAPPIER, A., ROTACH, M. W. An urban surface exchange parameterization for mesoscale models. **Bound.-Layer Meteorology**, v. 104, pp. 261–304. 2002.

MARTILLI, A., ROULET, Y., JUNIER, M., KIRCHNER, F. On the impact of urban surface exchange parameterisations on air quality simulations: the Athens case. **Atmospheric Environment**, v. 37, pp. 4217 – 4231. 2003.

MASSON, V. Aphysically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 94, pp. 357-397. 2000.

MASSON, V. Urban surface modeling and the meso-scale impact of cities. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 84, pp. 35-45. 2006.

MATTHEWS, E. Global vegetation and land use: new high resolution data bases for climate studies. **Journal of Applied Meteorology**, v. 22, pp. 474-487. 1983.

MATTHEWS, E. Global vegetation and land use: new high resolution data bases for climate studies. **Journal of Applied Meteorology**, v. 22, pp. 474-487. 1983.

- MELLOR, G. L., YAMADA, T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. **Rev. Geophys Space Phys**, v. 20, pp. 851 - 875. 1982.
- MIAO, S., CHEN, F., LEMORE, M. A., TEWARI, K., LI, Q., WANG, Y. An observation and Modeling Study of Characteristics of Urban Heat Island and Boundary Layer Structures in Beijing. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 48, pp.484–501. 2008.
- MOLION, L. C. B. Climate Variability and its Effects on Amazonian Hydrology. In: BRAGA Jr. BPF & FERNANDEZ-JAUREGUI CA. **Water Management of the Amazon basin**, UNESCO/ABRH, pp. 261–274. 1991.
- MOLION, L. C. B. **Amazonia rainfall and its variability**. Hydrology and water management in the humid tropics. Bonnel, M. Hufschmidt, M.M. Gladwell, J.(Eds) international Hydrology series, Cambridge university Press, pp. 99-111. 1993.
- MOLION, L. C. B. **Aquecimento Global, Manchas Solares, El Niño e Oscilação Decadal do Pacífico**. Disponível em:
<http://www.geofiscal.eng.br/aquecimentoglobal.htm>. Acesso em: 23 mar. 2005.
- MONTÁVEZ, J. P., RODRÍGUEZ, A., JIMÉNEZ, J. I. A study of the Urban Heat Island of Granada. **International Journal of Climatology**, v. 20, Issue 8, pp.899-911. 2000.
- MURPHY, D. J., HALL, M. H., HALL, C. A. S., HEISLER, G. M., STEHMAN, S. V. AND ANSELMÍ-MOLINA, C. The relationship between land cover and the urban heat island in northeastern Puerto Rico. **International Journal of Climatology**, v. 31, pp. 1222–1239. 2011.
- NASCIMENTO, M. G. Análise dos impactos dos Jatos de Baixos Níveis no ciclo diurno da precipitação sobre a Bacia do Prata. 2008. 208p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**, São José dos Campos, 2008.
- NEGRI, A. J., ADLER, R. F., XU, L., SURRATT, J. The impact of Amazonian deforestation on dry season rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, pp. 1306– 1319. 2004.
- NEPSTAD, D. C., VERISSIMO, A., ALENCAR, A., NOBRE, C.A., LIMA, E., LEFEBVRE, P., SCHLESINGER, P., POTTER, C., MOUTINHO, P., MENDONZA, E., COCHRANE, M. BROOKS, V. Large scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. **Nature**, v.398, pp. 505-508. 1999.
- NEPSTAD, D. C., CARVALHO, G., BARROS, A.C., ALENCAR, A., CAPOBIANCO, J. P., BISHOP, J., MOUTINHO, P., LEFEBVRE, P., SILVA, U. L., PRINS, JR. & E. Road paving, fire regime feedbacks, and the future of Amazon forests. **Forest Ecology and Management**, v. 154, pp. 395-407. 2001.
- NOBRE, P., MALAGUTTI, M., URBANO, D. F., DE ALMEIDA, R. A. F., GIAROLLA, E. Amazon Deforestation and Climate Change in a Coupled Model Simulation. **Journal of Climate**, v. 22, pp. 5686–5697. 2009.

OBREGON, G. O., NOBRE, C. A. Rainfall trends in Brazil. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 84(8), pp. 1008-1009. 2003.

OKE, T.R. The urban energy balance. **Progress in Physical Geography**, v. 12(4), pp. 471-508. 1988.

OKE, T.R. The energetic basis of the urban heat-island. **Quarterly journal of the royal meteorological society**, v. 108(455), pp. 1–24. 1982.

OKE, T. R. City size and the urban heat island. **Atmospheric Environment**, v. 7, pp. 769–779. 1973.

OLIVEIRA, A.P., FITZJARRALD, D.R. The Amazon River Breeze and the Local Boundary Layer: I. Observations. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 63, pp. 141-162. 1993.

OLIVEIRA, F.N.M., ARAÚJO, R.L.C., CARVALHO, J.S., SILVA, C.L. Inferência de Mudanças Microclimáticas na Região de Manaus (AM) Usando dados Geotérmicos e Meteorológicos. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24(2), pp. 169-187. 2006.

OLIVEIRA, F.N.M., ARAÚJO, R.L.C., CARVALHO, J.S., COSTA, S.S. Determinação da variação no microclima de Manaus-AM por atividades antropogênicas e modulações climáticas naturais. **Acta Amazônica**, v. 38(4), pp. 687-700. 2008.

PATZ, J.A., CAMPBELL-LENDRUM, D., HOLLOWAY, T., FOLEY, J.A. Impact of regional climate change on human health, **Nature**, V. 438, PP. 310-317. 2005.

PIELKE, R. A. **Mesoscale Meteorological Modeling**. Academic Press. 676 p. 2002.

PORTMAN, D. A. Identifying and correction urban bias in regional time series: surface temperature in China's Northern Plains. **Journal of Climate**, v. 6, pp. 2298–2308. 1993.

PRODES - **Programa de desmatamento da Amazônia – Monitoramento da Floresta amazônica por satélite**, INPE/IBAMA, 2005.

IPCC. **Relatório do painel intergovernamental sobre mudanças climáticas**. Disponível em www.ipcc.ch. Acessado em março de 2010.

RODRIGUES DA SILVA, V. P., DE AZEVEDO, P. V., BRITO, R. S., CAMPOS, J. H. B. C. Evaluating the Urban Climate of a Tropicallly Tropical City of Northeastern Brazil. **Environmental Monitoring Assesment**, v. 161, pp. 45-49. 2009.

ROCHA, E. J. P., ROLIM, P. A. M. Contribuição para o conhecimento do clima da Amazônia: O clima de Manaus-AM. **Anais do II Congresso Brasileiro de Meteorologia**. Pp. 161-172. 1984.

ROTH, M. Review of atmospheric turbulence over cities. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 126, pp. 941-990. 2000.

ROZOFF, C.M., COTTON, W.R., ADEGOKE, J.O. Simulation of St. Louis, Missouri, Land Use Impacts on Thunderstorms. **Journal of Applied Meteorology**, v. 42, pp. 716-738. 2003.

SAJANI, S. Z., TIBALDI, S., SCOTTO, F., LAURIOLA, P. Bioclimatic characterisation of an urban area: a case study in Bologna (Italy). **Journal of Biometeorology**, v. 52(8), pp. 779-785, 2008.

SALMOND, J. A., OKE, T. R., GRIMMOND, C. S. B., ROBERTS, S., OFFERLE, B. Wavelet analysis of carbon dioxide fluxes in the urban boundary layer at night. **Journal of Applied Meteorology**, v. 44, pp. 1180–1194. 2005a.

SALMOND, J. A., OKE, T. R., GRIMMOND, C. S. B., ROBERTS, S., OFFERLE, B. Venting urban canyons of heat, CO₂ at night. **Bulletin of American Meteorological Society**, v. 86, pp. 1546–1547. 2005b.

SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. **Journal of the American Statistical Association**, v. 63, pp. 1379-1389. 1968.

SESTINI, M. F., ALVALA, R. C. S., MELLO, E. K., VALERIANO, D. M., CHAN, C. S., NOBRE, C. A., PAIVA, J. A. C., REIMER, E. S. **Elaboração de Mapas de Vegetação para Utilização em Modelos Meteorológicos e Hidrológicos**. São José Campos. INPE, 74 p. 2002.

SILVA DIAS, M. A. F., RUTLEDGE, S., KABAT, P., SILVA DIAS, P. L., NOBRE, C., FISCH, G., DOLMAN, A. J., ZIPSER, E., GARSTANG, M., MANZI, A., FUENTES, J. D., ROCHA, H., MARENGO, J., PLANA-FATTORI, A., SÁ, L., ALVALÁ, R. C. S., ANDREAE, M. O., ARTAXO, P., GIELOW, R., GATTI, L. V. Clouds and rain processes in a biosphere atmosphere interaction context in the Amazon Region. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, pp. 8072-8092. 2002.

SAMPAIO, G.; NOBRE, C.; COSTA, M. H.; SATYAMURTY, P.; SOARES-FILHO, B. S.; CARDOSO, M. Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. **Geophysical Research Letters**, v. 34, L17709. 2007.

SILVA DIAS, M.A.F., PETERSEN, W., SILVA DIAS, P. L., CIFELLI, R., BETTS, A. K., GOMES, A. M., FISCH, G., LIMA, M. A., LONGO, M., ANTONIO, M. A., ALBRECHT, R. I. A case study of the organization of convection into precipitating convective lines in the Southwest Amazon. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, pp. 39.1-39.20. 2002.

SILVA DIAS, M.A. F., SILVA DIAS, P. L., LONGO, M., FITZJARRALD, D. R., DENNING, A. S. River breeze circulation in eastern Amazon: observations and modeling results. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78(1-3), pp. 111-121, 2004.

SILVA DIAS, M. A. F., FERREIRA R. N. Application of a linear spectral model to the study of Amazonian squall lines during GTE/ABLE 2B. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, pp. 405-419. 1992.

SMAGORINSKY, J. General circulation experiments with the primitive equations. I. The basic experiment. **Monthly Weather Review**, v. 91, pp. 99-164. 1963.

SMALL, R. D. Environmental impact of Fires in Kuwait. **Nature**, v. 350, pp. 11-12. 1991.

SOUZA, E. P. **Estudo Teórico e Numérico da Relação entre Convecção e Superfícies Heterogêneas na Região Amazônica**. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de São Paulo, 1999.

SOUZA, E.P., RENNÓ, N.O., SILVA DIAS, M.A.F. Convective Circulations Induced by Surface Heterogeneities. **Journal of Atmospheric Science**, v. 57, pp. 2915–2922. 2000.

SOUZA, D.O. **Simulação de Alta Resolução das Circulações Atmosféricas Locais na Região da Foz do Rio Amazonas**. Dissertação de mestrado do curso de Pós-graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica da Fundação Universidade Federal do Rio Grande, 190 p. 2007.

STULL, R. B. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology**. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers. 666 p. 1988.

TAHA, H. Modifying a mesoscale meteorological model to better incorporate urban heat storage: a bulk parameterization approach. **Journal of Applied Meteorology**, v. 38, pp. 466–473. 1999.

TOON, O. B., MCKAY, C. P., ACKERMAN, T. P., SANTHANAM, K. Rapid calculation of radiative heating rates and photodissociation rates in inhomogeneous multiple scattering atmospheres. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, pp. 16287-16301. 1989.

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. J. Coupled atmosphere-biophysicshydrology models for environmental modeling. **Journal of Applied Meteorology**, v. 39, pp. 931–944. 2000.

WILSON, M. F., HENDERSON-SELLERS. A global archive of land cover and soils data for use in general circulation climate models. **Journal of Climate**, v. 5, pp. 119-143. 1985.

WIENERT, U., KUTTLER, W. The dependence of the urban heat island intensity on latitude – a statistical approach. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 14, pp. 677–686. 2005.

WOOD, F. B. Comment: on the need for validation of the Jones et al. temperature trends with respect to urban warming. **Climatic Change**, v. 12, pp. 297–312. 1988.

VON RANDOW, C., MANZI, A. O., KRUIJT, B., OLIVEIRA, P. J., ZANCHI, F. B., SILVA, R. L., HODNETT, M., GASH, J., ELBERS, J. A., WATERLOO, M. Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, pp. 5-26. 2004.

VU, T. C., ASAEDA, T., ASHIE, Y. Development of a numerical model for the evaluation of the urban thermal environment. **Journal of Wind Engineering**, v. 81, pp. 181–196. 1999.