



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – UFCG  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS – CTRN  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS – UACA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

**ANÁLISE NUMÉRICA DE VARIÁVEIS ATMOSFÉRICAS INFLUENCIADAS PELO  
ESPAÇO URBANO DE CAMPINA GRANDE - PB**

**THAÍS REGINA BENEVIDES TRIGUEIRO ARANHA**

Orientador:

**Prof. Dr. ENIO PEREIRA DE SOUZA**

**Campina Grande - PB  
Março/2016**

**THAÍS REGINA BENEVIDES TRIGUEIRO ARANHA**

**ANÁLISE NUMÉRICA DE VARIÁVEIS ATMOSFÉRICAS INFLUENCIADAS PELO  
ESPAÇO URBANO DE CAMPINA GRANDE - PB**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento às exigências para obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

**Área de concentração:** Meteorologia de Meso e Grande Escalas

**Sub-Área:** Modelagem Numérica da Atmosférica

**Orientador:** Prof. Dr. Enio Pereira de Souza

**Campina Grande – PB  
Março/2016**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- A662a Aranha, Thaís Regina Benevides Trigueiro.  
Análise numérica de variáveis atmosféricas influenciadas pelo espaço urbano de Campina Grande – PB / Thaís Regina Benevides Trigueiro Aranha. – Campina Grande, 2016.  
73 f.: il. color.
- Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2016.  
"Orientação: Prof. Dr. Enio Pereira de Souza".  
Referências.
1. Urbanização. 2. *Town Energy Budget*. 3. *Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modeling System*. I. Souza, Enio Pereira de. III. Título.

CDU 551.51 (043.3)

THAÍS REGINA BENEVIDES TRIGUEIRO ARANHA

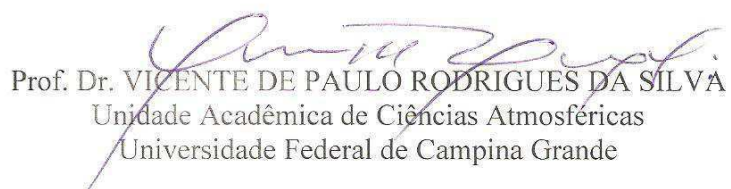
ANÁLISE NUMÉRICA DE VARIÁVEIS ATMOSFÉRICAS INFLUENCIADAS  
PELO ESPAÇO URBANO DE CAMPINA GRANDE - PB

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 04/03/2016

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. ENIO PEREIRA DE SOUZA  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



Prof.ª. Dra. MARIA LUCIENE DIAS DE MELO  
Instituto de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Alagoas

Ao meu amado marido dedico.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus por TUDO o que contribuiu para que eu alcançasse esta conquista, pois sei que Ele esteve comigo em cada passo desta caminhada! “Porque eu bem sei que tudo podes, e nenhum dos teus planos pode ser frustrado” (Jó 42:2).

Ao meu orientador, professor Dr. Enio Pereira de Souza, por ter acreditado em mim, por todo o incentivo, compreensão, ajuda e pela amizade construída.

Ao meu marido, Julius Caesar Aranha, por todo amor, incentivo, enorme paciência e compreensão por tantas vezes que precisei me ausentar de casa na busca desta conquista.

Aos meus pais, Hugo Trigueiro e Mércia Benevides, por toda a base, amor, incentivo e amparo sempre que precisei.

Ao meu irmão, Victor Hugo Benevides, aos cunhados Roque, Shirley e Amanda, à minha sogrinha, Andaluza Aranha, e sua irmã, Marta Izabel, por todo apoio e por tantas hospedagens nas minhas idas e vindas.

Aos amados sobrinhos, João Guilherme Benevides, Levi Ramos e Roque Neto, por todo amor, alegria e descontração necessária.

Aos muitos familiares que sempre se alegraram e torceram por mim, em especial à minha prima e psicóloga Rebeca Felizardo que me encorajou de forma efetiva, o que me levou a decidir enfrentar o mestrado em Campina Grande.

Às queridas amigas e parceiras Alzira Gabrielle, Anna Raquel e Renata Rafael por todo incentivo que me levaram a fazer este mestrado, apoio, ajuda e por estarem ao meu lado sempre.

À querida Maura Cassimiro por ter me dado abrigo de forma tão receptiva durante todo o período que precisei estar em Campina Grande, por todo incentivo e amizade construída ao longo desta jornada.

Aos meus queridos professores da graduação, Eugênio Pacelli e Thyago Silveira (meu orientador), pelo incentivo que foi crucial para minha decisão de fazer o mestrado.

À Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia pela oportunidade, e a todos os professores pelos ensinamentos transmitidos no decorrer do curso.

Ao CNPq (Conselho Nacional para o Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo suporte financeiro.

Ao INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) pelo fornecimento dos dados observados de Campina Grande.

Ao ECMWF (*European Center for Medium-Range Weather Forecast*) pelos dados de reanálises.

Aos funcionários da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, em especial às secretárias Divanete Farias e Arilene Lucena, por estarem sempre dispostas a ajudar.

À Banca Examinadora, nas pessoas do Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva e da Profa. Dra. Maria Luciene Dias de Melo, por terem aceitado ao convite e pelas contribuições que sei que irão engrandecer meu trabalho.

Aos amigos e colegas deste Programa de Pós-graduação, por tantos momentos juntos de crescimento, luta e descontração. Em especial à Elloise Rackel, um presente que recebi neste mestrado, Alécio Pereira, José Ricardo, Valneli Mello, Milla Costa, Júlio Diniz e Raimundo Mainar pela amizade e parceria construída.

Enfim, a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a conclusão deste mestrado. **Meu muito obrigada!!!**

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	I
<b>ABSTRACT</b> .....	II
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	III
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	VI
<b>LISTA DE SIGLAS</b> .....	VII
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	15
1.1 OBJETIVO GERAL.....	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	18
2.1 MODELAGEM NUMÉRICA APLICADA A SUPERFÍCIES URBANIZADAS .....	18
2.1.1 Radiação .....	19
2.1.2 Microfísica de nuvens.....	19
2.1.3 Difusão turbulenta .....	20
2.1.4 Esquema TEB .....	21
2.2 MORFOLOGIA E CLIMA URBANO .....	26
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	29
3.1 ÁREA DE ESTUDO .....	29
3.2 DADOS .....	31
3.3 CONFIGURAÇÕES DO MODELO.....	32
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	37
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE URBANA DE CAMPINA GRANDE .....	37
4.2 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS .....	38
4.3 DISCUSSÃO CICLO DIÁRIO DOS EXPERIMENTOS .....	40
4.4 ANÁLISE ESPACIAL PARA ALGUNS HORÁRIOS.....	53
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	65
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	67



## RESUMO

Neste estudo utilizou-se o esquema TEB - *Town Energy Budget* acoplado ao modelo numérico BRAMS - *Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modeling System* para analisar as variáveis atmosféricas influenciadas pela urbanização da cidade de Campina Grande - PB no período seco. Esta região, no que diz respeito ao contexto econômico-político, embora seja compreendida como uma cidade média apresenta indicadores semelhantes aos que caracterizam as metrópoles. Foram realizados dois experimentos, um com o TEB ativado para a representação das superfícies urbanizadas e outro com o TEB desativado, denominado de STEB, em que desconsidera a dinâmica urbana, para atestar a influência da cidade nas variáveis meteorológicas. Os resultados mostraram que a cidade de Campina Grande é grande o suficiente para influenciar o próprio microclima. A urbanização aumenta a temperatura durante a tarde e início da noite. O albedo da superfície é fortemente influenciado pela dinâmica da cidade, com impacto no saldo de radiação. O fluxo de calor sensível aumenta e o de calor latente diminui devido ao efeito da cidade. Observa-se algum impacto na temperatura, umidade e fluxos nos arredores da cidade.

**Palavras-chave:** urbanização, BRAMS, TEB.

**ABSTRACT****NUMERICAL ANALYSIS OF ATMOSPHERIC VARIABLES INFLUENCED BY  
THE URBAN SPACE OF CAMPINA GRANDE – PB**

In this study we used the TEB scheme - Town Energy Budget coupled to the numerical model BRAMS - Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modeling System to analyze atmospheric variables influenced by the urbanization of the city of Campina Grande - PB in the dry season. This city presents indicators similar to those that characterize the metropolis in economic and political context, although it is considered as an average city. Two experiments were conducted, one with the TEB activated for the representation of urban surfaces and other with the TEB disabled, namely STEB, which disregards the urban dynamics, in order to attest to the influence of the city in weather variables. The results showed the city of Campina Grande is large enough to influence its own microclimate. Urbanization increases the temperature during the afternoon and early evening. The surface albedo is strongly influenced by the dynamics of the city, with impact on the radiation balance. The sensible heat flux increases and the latent heat decreases due to the effect of the city. We also observed an impact on temperature, humidity and flows around the city.

**Keywords:** Urbanization, BRAMS, TEB.

---

**LISTA DE FIGURAS**

<b>Figura 01</b> – Esquematização da geometria de cânion, utilizada no esquema TEB. As setas azuis representam as múltiplas reflexões a que estão sujeitos os raios solares incidentes no cânion (GOUVÊA, 2007).....	22
<b>Figura 02</b> - Cânion formado por dois prédios considerando 3 camadas para cada elemento. $T_r$ , $T_w$ e $T_R$ indicam temperaturas para as camadas da rua, paredes e telhados, respectivamente. $W_r$ e $W_R$ indicam o conteúdo de água na superfície e telhados e $W_{snow\ r}$ e $W_{snow\ R}$ o conteúdo de neve na superfície e telhados. $\delta R$ e $\delta r$ correspondem as frações de água para os telhados e as ruas, $\delta_{snow\ R}$ e $\delta_{snow\ r}$ às frações de neve para os telhados e as ruas. $T_{i\ bld}$ é a temperatura interna dos prédios (MASSON 2000). ....	23
<b>Figura 03</b> - Esquema da radiação solar recebida no cânion (Adaptado de Masson, 2000).....	24
<b>Figura 04</b> - Determinação da Camada Limite Urbana e Camada de Cobertura Urbana ou Camada do Dossel Urbano segundo Oke (1976). Fonte: Araújo, 2010. ....	27
<b>Figura 05</b> – Fator de Visão do Céu ( <i>Sky View Factor</i> ). Fonte: Araújo, 2010. ....	28
<b>Figura 06</b> – Mapa de localização da cidade de Campina Grande – PB.....	29
<b>Figura 07</b> – Domínio das duas grades aninhadas, sendo G1 a grade de 4 km e G2 a de 1 km, em que se encontra destacada a cidade de Campina Grande (CG). ....	33
<b>Figura 08</b> – Mapa de superfície para as simulações no modelo BRAMS.....	37
<b>Figura 09</b> – Ciclo diário médio de temperatura do ar para os primeiros 15 dias de outubro de 2014. A linha azul representa os valores observados, a linha vermelha o experimento TEB e a linha verde o STEB. ....	39
<b>Figura 10</b> – Ciclo diário médio da velocidade do vento para os primeiros 15 dias de outubro de 2014. A linha azul representa os valores observados, a linha vermelha o experimento TEB e a linha verde o STEB. ....	40
<b>Figura 11</b> - Perfil vertical médio do conteúdo de água líquida das nuvens para o experimento TEB.....	41

---

<b>Figura 12</b> – Perfil vertical médio da diferença do conteúdo de água líquida nas nuvens entre os experimentos TEB e STEB. ....	42
<b>Figura 13</b> – Comportamento diário médio da razão de mistura para os dias 01 a 15 de outubro de 2014. A linha azul representa os valores observados, a linha vermelha o experimento TEB e a linha verde o STEB. ....	43
<b>Figura 14</b> – Representa a média diária do fluxo de calor sensível para os dois experimentos, sendo a linha vermelha a representação do experimento TEB e a linha verde do STEB. ....	44
<b>Figura 15</b> – Representa a média diária do fluxo de calor latente, em que a linha vermelha demonstra os fluxos no experimento TEB e a linha verde no STEB. ....	45
<b>Figura 16</b> – Curva média da radiação de onda curta para os dois experimentos, sendo a linha vermelha a representação do experimento TEB e a linha verde a do STEB. ....	46
<b>Figura 17</b> – Perfil dos valores médios diários de albedo entre o experimento TEB (linha vermelha) e o experimento STEB (linha verde). ....	47
<b>Figura 18</b> – Apresenta o ciclo do fluxo médio da ROL (Radiação de Onda Longa) ascendente para os experimentos TEB (linha vermelha) e para o experimento STEB (linha verde). ....	48
<b>Figura 19</b> – Apresenta o ciclo médio diário do fluxo da ROL descendente para os experimentos TEB, representado pela linha vermelha, e STEB, representado pela linha verde. ....	49
<b>Figura 20</b> – Perfil médio diário do Saldo de Radiação da Superfície, sendo a linha vermelha a representação do experimento TEB e a linha verde do experimento STEB. ....	50
<b>Figura 21</b> – Representa o forçamento da superfície pela diferença do Saldo de Radiação da Superfície entre os experimentos TEB e STEB. ....	51
<b>Figura 22</b> – Representa o perfil médio diário da energia cinética turbulenta nos experimentos TEB e STEB. ....	52
<b>Figura 23</b> – Mostra o perfil diário médio da diferença de energia cinética turbulenta entre os experimentos TEB e STEB. ....	53

---

<b>Figura 24</b> – Representa o vento médio, próximo à superfície, em uma região que apresenta a zona urbana de Campina Grande no centro. ....	54
<b>Figura 25a</b> – Mostra a diferença de temperatura entre os experimentos TEB e STEB para as 15 UTC (12 hl) do dia 04 de outubro de 2014. ....	55
<b>Figura 25b</b> – Mostra a diferença de temperatura entre os experimentos TEB e STEB para as 3 UTC (0 hl) do dia 05 de outubro de 2014.	
<b>Figura 26a</b> – Mostra a diferença de radiação de onda longa emitida nas simulações para as 15 UTC (12 hl). ....	57
<b>Figura 26b</b> – Mostra a diferença de radiação de onda longa emitida nas simulações para meia-noite local (3 UTC).	
<b>Figura 27a</b> – Mostra a diferença do fluxo de calor sensível entre os experimentos TEB e STEB para as 15 UTC (12 hl). ....	59
<b>Figura 27b</b> – Mostra a diferença do fluxo de calor sensível entre os experimentos TEB e STEB no período noturno (00 hl).	
<b>Figura 28a</b> – Mostra a diferença do fluxo de calor latente para os dois experimentos as 15 UTC (12 hl). ....	61
<b>Figura 28b</b> – Mostra a diferença do fluxo de calor latente para os dois experimentos as 3 UTC (00 hl).	
<b>Figura 29a</b> – Apresenta a diferença de razão de mistura para as 15 UTC (12 hl) nos experimentos TEB e STEB. ....	63
<b>Figura 29b</b> – Apresenta a diferença de razão de mistura para as 3 UTC (00 hl) nos experimentos TEB e STEB.	

---

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 01</b> – Demografia da população de Campina Grande - PB entre os anos de 1970 a 2010.....	31
<b>Tabela 02</b> – Configurações do modelo BRAMS utilizadas nas simulações.....	34
<b>Tabela 03</b> – Parâmetros característicos dos tipos urbanos.....	36

---

## LISTA DE SIGLAS

ATMET	- Atmospheric, Meteorological and Environmental Technologies
BRAMS	- Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modeling System
CDU	- Camada do Dossel Urbano
CLA	- Camada Limite da Atmosfera
CLP	- Camada Limite Planetária
CLU	- Camada Limite Urbana
CPTEC	- Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CSU	- Colorado State University
ECMWF	- European Center for Medium-Range Weather Forecast
EMBRAPA	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FINEP	- empresa Financiadora de Estudos e Projetos
IAG-USP	- Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGBP	- International Geosphere Biosphere Programme
INMET	- Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	- Intergovernmental Panel on Climate Change
LEAF	- Land Ecosystem-Atmosphere Feedback model
MCT	- Ministério da Ciência e Tecnologia
ONU	- Organização das Nações Unidas
RAMS	- Regional Atmospheric Modeling System
ROL	- Radiação de Onda Longa
SVAT	- Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer scheme
TEB	- Town Energy Budget
UFMG	- Universidade Federal de Campina Grande
USGS	- United States Geological Survey
UTC	- Universal Coordinated Time

---

## 1 INTRODUÇÃO

A partir da revolução industrial, o processo de urbanização se acelerou pela necessidade de mão de obra nas indústrias e consequente redução do número de trabalhadores no campo. Em meados do século XIX a população mundial superou o primeiro bilhão de pessoas, entretanto, menos de 2% habitavam em áreas urbanas. Em 1940, aproximadamente cem anos depois, a população mundial já era de 2,3 bilhões de habitantes, dentre os quais 20% residiam em áreas urbanas. Na Europa e nos Estados Unidos este percentual já ultrapassava os 50% (BARBOSA, 2005).

De acordo com a ONU (Organização das Nações Unidas), 54% da população mundial vive em áreas urbanas, uma proporção que se espera aumentar para 66% em 2050. As projeções mostram que a urbanização associada ao crescimento da população mundial poderá trazer mais 2,5 milhões de pessoas para as populações urbanizadas em 2050 (ONU, 2014). Constata-se que o panorama brasileiro segue a tendência mundial. O censo de 2010 do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) apontou um total de aproximadamente 161 milhões de pessoas vivendo em áreas urbanas, isso equivale a 84,35% da população brasileira. Em comparação com o censo anterior, em 10 anos a população urbana cresceu mais de 3% (IBGE, 2010).

Essas estimativas evidenciam a direção do mundo cada vez mais urbano, no qual deve ser reconhecida a importância de estudos sobre as cidades e os impactos provenientes da expansão urbana, pois todo esse crescimento vem marcado pela enorme modificação da paisagem natural. Isso implica na retirada da cobertura vegetal para a concentração de edifícios, equipamentos e pessoas, impermeabilização do solo, trânsito intenso, grandes áreas industriais e produção artificial de calor associada à concentração de poluentes que criam mudanças na camada limite da atmosfera (CLA). Assim, a rápida urbanização tem provocado uma série de problemas ambientais em várias escalas. As cidades produzem seus próprios microclimas, mas são ligados ao clima regional e global através dos efeitos atmosféricos no balanço de radiação e das emissões de gases de efeito estufa (ROTH, 2007).

Em escala planetária as mudanças climáticas destacam-se pelo aumento de temperatura do ar, independente da sua magnitude, causas e, sobretudo, da variabilidade regional e singularidades locais. Além de afetar a precipitação nos seus valores quantitativos, distribuição espacial e regime. Estas mudanças podem interferir também na subida do nível do mar, afetando assim as áreas litorâneas e estuarinas (LOMBARDO, 2009). Conforme o



---

quinto relatório do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), a média global de temperatura da terra e do oceano calculada por uma tendência linear mostra aumento de 0,85 °C no período 1880–2012 (JURAS, 2013).

Da mesma forma, as transformações advindas do crescimento urbano também têm alterado o clima local das cidades, e este está diretamente relacionado com a diminuição da vegetação, o tamanho das cidades, população, geometria das ruas, altura dos edifícios e materiais utilizados. As alterações no relevo e a impermeabilização do solo são capazes de converter e armazenar a radiação solar incidente em maior grau do que em áreas vegetadas (ARAUJO, 2010). Essas alterações formam ilhas de calor urbanas, que consistem no aumento da temperatura do ar em centros urbanizados se comparados com a temperatura de ambientes mais amenos no seu entorno, alteram a precipitação da região, a direção e velocidade dos ventos, bem como o balanço de energia havendo uma maior emissão de ondas longas pelas superfícies urbanas (LOMBARDO, 2011). A falta de planejamento ambiental urbano tem comprometido cada vez mais as condições de conforto térmico desses ambientes.

Neste contexto, é interessante estudar os efeitos da urbanização em Campina Grande, que é considerada uma das maiores e mais importantes cidades do interior do Nordeste do Brasil. E muito embora, no que diz respeito ao contexto econômico-político seja compreendida como uma cidade média, apresenta indicadores semelhantes aos que tanto caracterizam as metrópoles, entre esses, a descentralização, a verticalização, a criação de loteamentos e condomínios fechados, a transformação de espaços rurais em áreas urbanas, o rearranjo de usos de bairro e a estratificação do uso do espaço urbano (MAIA, 2006).

Diante desta problemática, o uso de modelos numéricos é prática cada vez mais comum para estudar a atmosfera em pesquisas que vão desde a representação de fenômenos de micro até a grande escala. ARAUJO (2010) cita que recentemente estudos relacionados aos efeitos da urbanização sobre os principais elementos do clima vêm recebendo muito destaque entre os pesquisadores que trabalham com modelagem numérica. Essa ferramenta permite, além de representações em diferentes escalas, a análise de condições hipotéticas, assim como a obtenção de resultados quase em tempo real, sem a necessidade de longos períodos para a coleta de dados. Tal tipo de pesquisa tem implicações para a previsão do tempo, planejamento urbano, recursos hídricos e uma melhor compreensão do impacto humano sobre o ambiente e o clima local e regional.

---

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Para um melhor entendimento do papel da superfície urbana na dinâmica e termodinâmica local, tem-se como objetivo geral analisar numericamente as variáveis atmosféricas influenciadas pelo espaço urbano da cidade de Campina Grande – PB utilizando a parametrização de superfície TEB (*Town Energy Budget*) acoplada ao modelo BRAMS (*Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modeling System*) por meio de uma grade de alta resolução espacial que possibilite um refino nas respostas dos comportamentos atmosféricos locais.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Introduzir as condições iniciais de superfície no BRAMS, para uma representação realista das características da cidade de Campina Grande - PB.

- Realizar dois experimentos comparativos alternando a presença da parametrização da dinâmica urbana com o uso do esquema TEB ativado, o qual representa as superfícies urbanizadas e, desativado, denominado de STEB, em que desconsidera a presença de áreas urbanas.

- Comparar e validar os dados de temperatura do ar e velocidade do vento observado, com os resultados das simulações geradas pelo modelo BRAMS por meio dos experimentos TEB e STEB.

- Analisar as variáveis atmosféricas geradas por meio dos experimentos TEB e STEB para a cidade de Campina Grande – PB. São elas: temperatura do ar, velocidade do vento, conteúdo de água líquida das nuvens, razão de mistura, fluxos de calor sensível e latente, fluxos de radiação de onda curta e de onda longa emitida e incidente, albedo, saldo de radiação, forçamento radiativo da superfície e a energia cinética turbulenta.

Esta dissertação está organizada da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica acerca de estudos relacionados à descrição da modelagem numérica aplicada a superfícies urbanizadas e à morfologia e clima urbano. No Capítulo 3 são descritos a área de estudo e suas principais características, bem como o procedimento metodológico utilizado para a realização deste estudo. O Capítulo 4 descreve os resultados e discussão encontrados com desenvolvimento deste trabalho. E, por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas neste estudo, além de sugestões para trabalhos futuros.

---

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MODELAGEM NUMÉRICA APLICADA A SUPERFÍCIES URBANIZADAS

O modelo atmosférico RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*) foi desenvolvido na Universidade do Estado do Colorado (*CSU – Colorado State University*), EUA, na década de 1980, para unificar vários códigos existentes de simulação numérica de tempo (TRIPOLI & COTTON, 1982; TREMBACK et al., 1985; PIELKE et al., 1992; COTTON et al., 2003), sendo aprimorado ao longo dos anos (TREMBACK & WALKO, 1997) e amplamente utilizado hoje em dia, tanto para o intuito operacional, como previsão/simulação do tempo/clima, quanto para à pesquisa científica. É um modelo numérico de grande versatilidade, podendo ser utilizado desde a microescala até simulações de grandes turbilhões e fenômenos climáticos, desde que se façam os ajustes pertinentes ao estudo de interesse, sendo mais frequentemente aplicado a simulações de mesoescala (VILHENA, 2010). Uma das suas vantagens é a possibilidade de modificação do código de acordo com a necessidade do usuário.

O modelo utilizado neste estudo é o BRAMS que é a versão brasileira do RAMS, desenvolvido como parte de um projeto de parceria entre instituições nacionais e internacionais com financiamento da FINEP (empresa Financiadora de Estudos e Projetos), vinculada ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), com participação da ATMET (*Atmospheric, Meteorological and Environmental Technologies – EUA*), CPTEC-INPE (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), IAG-USP (Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo) e da UFCG (Universidade Federal de Campina Grande), o qual objetiva a correta simulação de fenômenos típicos das regiões tropicais e atenda os centros regionais de previsão do tempo no Brasil (CARVALHO, 2010).

O BRAMS possui um esquema de aninhamento múltiplo de grades, baseado no método de grades iterativas de CLARK & FARLEY (1984), permitindo que as equações do modelo sejam resolvidas simultaneamente sob qualquer número de grades computacionais com diferentes resoluções espaciais. Grades de maior resolução são utilizadas para modelar detalhes dos sistemas atmosféricos de menor escala, tais como escoamento sobre terrenos complexos e circulações termicamente induzidas pela superfície. As grades maiores, de menor resolução, são utilizadas para modelar os fenômenos atmosféricos de larga escala que

---

interagem com o ambiente destes sistemas menores, fornecendo assim as condições de fronteira para as grades com menor espaçamento (FREITAS & DIAS, 2005).

O modelo possui um grande número de parametrizações físicas para a radiação, convecção, microfísica de nuvens e turbulência, além de um avançado esquema de interação entre solo-vegetação-atmosfera, conhecido como SVAT - *Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer scheme*, através do módulo LEAF - *Land Ecosystem-Atmosphere Feedback model* (WALKO et al., 2000), o qual trata os efeitos de diferentes tipos de uso do solo, e também para áreas urbanizadas, através do módulo TEB (MASSON, 2000; FREITAS, 2003; FREITAS et al., 2007), foco do presente estudo. A seguir serão apresentadas as parametrizações utilizadas nas rodadas do modelo para este trabalho.

### 2.1.1 Radiação

Segundo SOUZA (2012), a radiação é o processo mais importante da atmosfera, responsável por todo balanço de energia que alimenta os demais processos atmosféricos. Os esquemas de parametrização de radiação adotados no modelo BRAMS são baseados em modelos de transferência radiativa, assim, os efeitos produzidos na atmosfera (onda curta) levam em consideração o aquecimento devido à absorção pelo ozônio, e, espalhamento e absorção por nuvens. Na radiação terrestre (onda longa) são parametrizados alguns efeitos, como o aquecimento devido à absorção de radiação por vapor d'água, CO<sub>2</sub>, nuvens, etc.

No modelo BRAMS existem quatro esquemas de parametrização para a radiação: o esquema de MAHRER & PIELKE (1977), o esquema *two-stream* de CHEN & COTTON (1983), o esquema *new two-stream* denominado HARRINGTON e proposto por MEYERS et al. (1997) e o esquema CARMA (TOON et al., 1989).

O esquema de parametrização proposto por CHEN & COTTON (1983), o qual foi utilizado neste estudo, engloba a quantidade de material condensado presente para a simulação atmosférica, o que é uma solução satisfatória para a equação de transferência radiativa usando uma aproximação de emissividade (VILHENA, 2010). Para a radiação de onda longa, este esquema considera 3 bandas de absorção parametrizando o efeito de nuvens, o que torna este esquema mais completo e com o custo operacional mais alto.

### 2.1.2 Microfísica de nuvens

---

Nas grades maiores, ou seja, de menor resolução, o modelo utiliza a parametrização de cumulus ou parametrização convectiva para representar os processos convectivos. Porém, nos casos de grade com maior resolução, que o caso das grades utilizadas neste estudo, a parametrização de microfísica pode ser ativada.

O esquema de microfísica de nuvens trata de forma explícita a formação dos hidrometeoros constituintes de uma nuvem. Assim, a microfísica no BRAMS, descrita por WALKO et al. (1995), utiliza o código microfísico para representar vapor d'água, gotículas de nuvem e gotas de chuva, gelo primário, neve e agregados, e granizo na forma de uma distribuição gama generalizada (CARVALHO, 2010). Dessa forma, são considerados por este esquema processos de mudança de fase que ocorrem com a água nos estados líquido, sólido e gasoso incluindo também as trocas de calor envolvidas durante as mudanças de fase (BIAZETO, 2007).

Conforme VILHENA (2010), esta parametrização garante que o usuário do modelo tenha certa versatilidade, permitindo que o experimento numérico seja conduzido dentro de certas restrições estabelecidas por ele. É possível, por exemplo, que o diâmetro médio de uma das categorias de hidrometeoros seja determinado a partir de um valor padrão encontrado no código do modelo ou sugerido pelo usuário.

### 2.1.3 Difusão turbulenta

A turbulência está associada ao movimento aparentemente caótico que se manifesta de forma irregular em flutuações aleatórias na velocidade, temperatura e concentração de escalares em torno de um valor médio (VILHENA, 2010). Os movimentos na Camada Limite Planetária (CLP) são essencialmente turbulentos, sendo originados de duas formas: a) origem mecânica devido à presença de grandes cisalhamentos necessários para satisfazer a condição de não-deslizamento, sendo a mais pronunciada próximo à superfície; b) origem térmica, associada ao aquecimento da superfície terrestre e posterior transferência de calor para a atmosfera, dessa forma a energia é transferida pelos processos convectivos e/ou de mistura. Como esses processos ocorrem em escalas muito pequenas para serem resolvidas por modelos de mesoescala devem ser parametrizados (BARBOSA, 2007).

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 três diferentes opções de esquemas de parametrização da CLP, são eles:

---

SMAGORINSKY (1963) para o cálculo dos coeficientes de difusão horizontal e vertical, MELLOR & YAMADA (1974) e DEARDORFF (1980).

A difusão vertical parametrizada seguindo o esquema de MELLOR & YAMADA (1982), usada neste estudo, é a opção apropriada para o caso em que o espaçamento de grade na horizontal é muito maior que na vertical, tal que os movimentos convectivos dominantes não sejam resolvidos. Segundo GOUVÊA (2007), neste esquema a energia cinética turbulenta é gerada por meio dos processos de cisalhamento e empuxo e um termo pressão-trabalho parametrizado. Essa energia é destruída por esses mesmos processos e também por um termo de dissipação. Existe também a advecção e difusão de energia cinética turbulenta. O resultado desses processos permite a geração de um campo de energia cinética turbulenta do qual os coeficientes de difusão são localmente diagnosticados.

#### 2.1.4 Esquema TEB

Para a representação das áreas urbanizadas no modelo, MASSON (2000) propôs o esquema TEB introduzido no RAMS por FREITAS (2003). Este esquema é um modelo de dossel urbano, de apenas uma camada, em que é utilizada uma geometria de cânion local, proposta inicialmente por Oke e colaboradores na década de 1970, permitindo o refinamento do balanço de energia urbano, incluindo o aprisionamento de radiação de onda longa e de onda curta, o fluxo de momento, os fluxos turbulentos de calor latente e sensível, o armazenamento de calor e a interceptação de água e neve (quando houver) através de um tratamento fisicamente apropriado (MASSON et al., 2002).

Antes dessas parametrizações urbanas serem implementadas era necessário adaptar a vegetação para simular áreas urbanas, como por exemplo, SEAMAN et al. (1989) e MENUT (1997), que usaram um modelo de interação vegetação-atmosfera, com seus parâmetros modificados na tentativa de representar os efeitos observados nas regiões urbanas. Entretanto, como mostram FREITAS et al. (2007), esse procedimento tem limitações e não reproduz as observações tão bem quanto no caso dos modelos de dossel urbano.

A geometria de cânion considera três superfícies distintas: telhados, paredes e ruas, para representar o efeito das construções. Nesta geometria, uma rua é margeada por duas faces de paredes, sendo o espaço entre elas denominado cânion. A Figura 01 apresenta uma esquematização desta geometria (GOUVÊA, 2007).

Assim, o esquema TEB faz as seguintes considerações (MASSON, 2000):

- 1) Todas as construções (prédios) têm as mesmas alturas e larguras (dimensões);
- 2) As construções estão localizadas ao longo de ruas idênticas, das quais o comprimento é considerado bem maior que a largura, sendo o espaço entre as faces de duas construções definido como cânion;
- 3) Qualquer orientação das ruas é possível e todas existem com a mesma probabilidade.

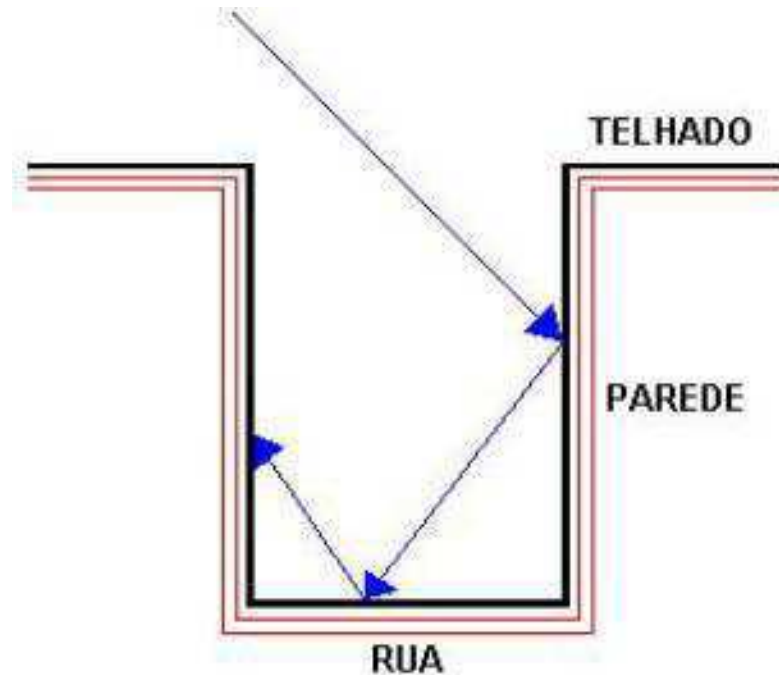


Figura 01 – Esquemática da geometria de cânion, utilizada no esquema TEB. As setas azuis representam as múltiplas reflexões a que estão sujeitos os raios solares incidentes no cânion (GOUVÊA, 2007).

Devido à forma complexa da malha urbana das cidades, o balanço de energia é dividido em três partes, levando-se em consideração a temperatura da superfície dos telhados (TR), ruas (Tr) e paredes (Tw), ao invés de aproximar uma única temperatura representativa de toda a superfície urbana (MASSON, 2000). Para o tratamento dos fluxos de condução para/do interior das construções (telhados e paredes) ou do solo (ruas), cada tipo de superfície é discretizada em várias camadas, sendo as equações que descrevem a evolução da temperatura das camadas baseadas em considerações do balanço de energia (Figura 02).

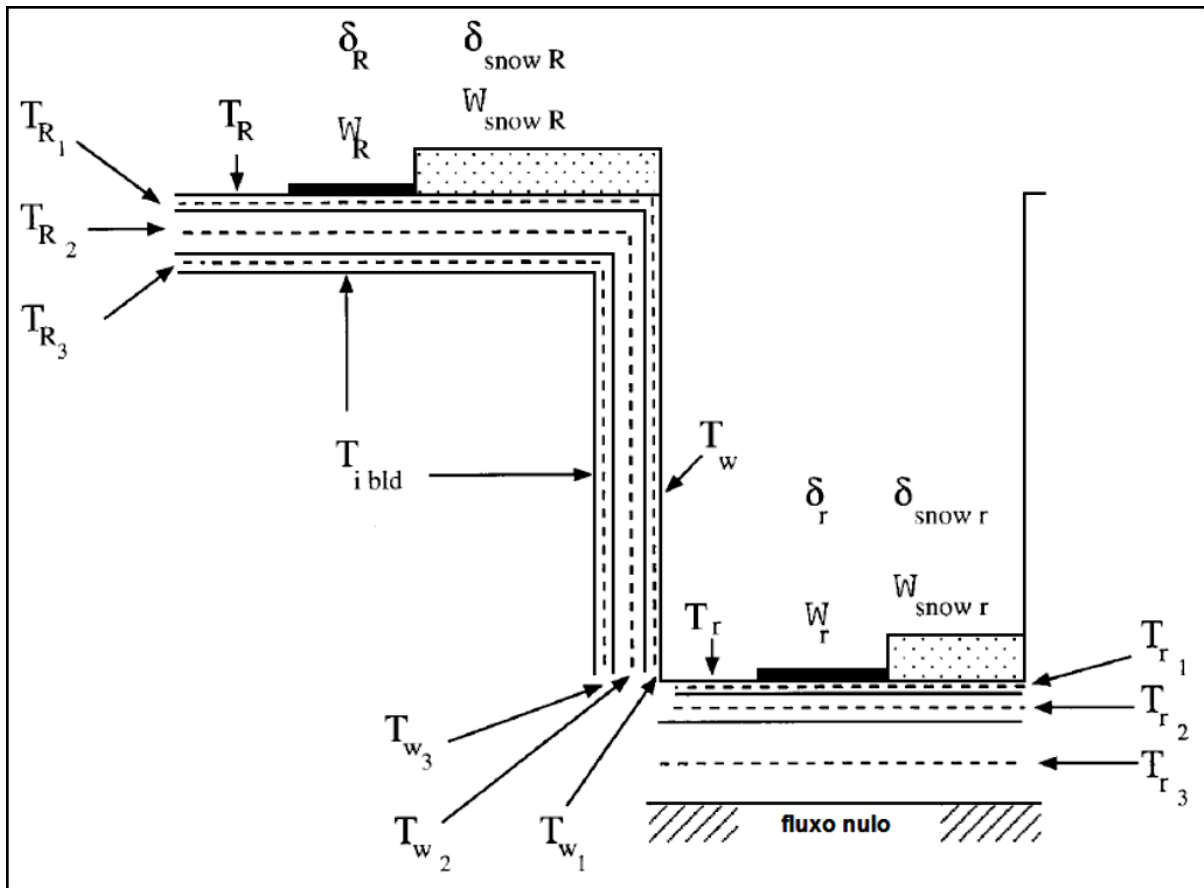


Figura 02 - Cânion formado por dois prédios considerando 3 camadas para cada elemento.  $T_r$ ,  $T_w$  e  $T_R$  indicam temperaturas para as camadas da rua, paredes e telhados, respectivamente.  $W_r$  e  $W_R$  indicam o conteúdo de água na superfície e telhados e  $W_{snow\ r}$  e  $W_{snow\ R}$  o conteúdo de neve na superfície e telhados.  $\delta_R$  e  $\delta_r$  correspondem as frações de água para os telhados e as ruas,  $\delta_{snow\ R}$  e  $\delta_{snow\ r}$  às frações de neve para os telhados e as ruas.  $T_{i\ bld}$  é a temperatura interna dos prédios (MASSON 2000).

O balanço de radiação de onda longa para o sistema de cânion é calculado como uma reemissão. 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, conforme Figura 3 (SOUZA, 2012).



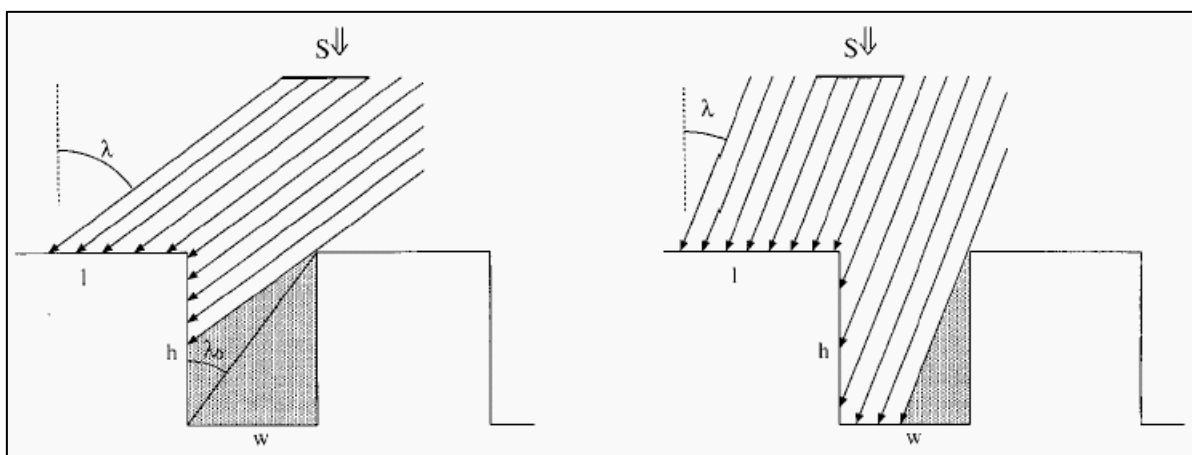


Figura 03 - Esquema da radiação solar recebida no cânion (Adaptado de Masson, 2000).

Os fluxos antropogênicos, veicular e industrial, também são considerados no esquema. Os fluxos de calor e umidade associados à combustão são especificados pelo usuário dependendo da região de estudo. Pois os fluxos associados ao tráfego veicular modificarão o balanço de ar dentro do cânion, enquanto que os fluxos associados à atividade industrial influenciarão a atmosfera diretamente (GUERRERO, 2010). Assim, a partir destas informações, o esquema TEB retorna para o modelo atmosférico os fluxos de energia sobre as regiões urbanizadas, além de outras variáveis referentes às características urbanas.

Com o esquema TEB também é permitido distinguir se uma determinada área é formada por edifícios altos ou baixos, como também o tipo de atividade exercida (residencial, comercial ou industrial), além de 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.

Os parâmetros do esquema TEB dependem diretamente da forma e material das construções, o que torna fácil a sua inicialização (MASSON, 2000), sendo dados de entrada parâmetros geométricos (como altura das construções, fator de visão do céu e comprimento de rugosidade), radiativos (albedo e emissividade das superfícies) e térmicos (capacidade térmica e condutividade das camadas de cada superfície).

O conjunto completo das equações, bem como a descrição detalhada dos processos radiativos, cálculo dos fluxos turbulentos e evolução de reservatórios de água, podem ser encontrados em MASSON (2000) e FREITAS (2003).

Assim, levando em consideração o aumento da urbanização em todo o mundo e a necessidade de ter a colaboração da sociedade para reduzir as emissões de gases de efeito estufa que geram impactos negativos do aquecimento global sobre a população, a economia e

---

o meio ambiente, MASSON et al. (2014) em sua recente pesquisa estudaram a melhor forma das cidades se adaptarem, especialmente as áreas urbanas, com a evolução das alterações climáticas. Desta forma, analisaram que as estratégias de adaptação para as cidades requerem uma abordagem interdisciplinar, envolvendo fortes planejadores urbanos, arquitetos, engenheiros, meteorologistas, economistas e cientistas sociais. Dentro desta interdisciplinaridade, sua metodologia sugere que um dos modos de estudar essa adaptação é calcular os impactos com modelos físicos, tais como o TEB.

PIGEON et al. (2014) estudaram as considerações sobre o clima urbano com o objetivo de completar a avaliação do Modelo de Energia Building implementado no TEB comparando-o ao modelo energético EnergyPlus, para um conjunto de cinco edifícios representativos encontrados na área urbana da cidade de Paris. O resultado da primeira etapa que consistiu em verificar as principais premissas adotadas no TEB, mostrou que, em média, o modelo simplificado foi capaz de avaliar o aquecimento e as necessidades de refrigeração com uma precisão de cerca de  $1,5 \text{ kWh} / \text{m}^2 / \text{ano}$  para cada procura de energia do edifício, o que é menos do que 10% da procura de energia. Já na segunda etapa, que foi a comparação direta entre os resultados do TEB e as simulações no EnergyPlus, o TEB foi capaz de estimar o aquecimento e as necessidades de refrigeração com uma precisão de 5 e 3  $\text{kWh} / \text{m}^2 / \text{ano}$ , respectivamente. Estes níveis de precisão apresentaram resultados mais precisos comparados com a realidade de energia encontrados nos edifícios analisados.

O trabalho desenvolvido por SUN & AUGENBROE (2014) realizaram uma série de estudos computacionais que exploram o efeito da ilha de calor urbano (ICU), em duas aplicações de rotina de simulação de construção de energia: (1) prevenção da magnitude do uso de energia e (2) prevenção da contenção de energia. Dentre os modelos computacionais para entender e quantificar a ICU em várias condições climáticas e de uso da terra, o TEB fez parte deste estudo. Foram apresentados os resultados com base em estudos de caso de edifícios de escritórios em 15 cidades representativas em diferentes zonas climáticas dos EUA. Os resultados mostram que a ICU modifica consideravelmente o clima urbano medido pelo arrefecimento e graus-dias de aquecimento. Em zonas de clima ameno, o efeito ICU tem apenas um efeito moderado. Quando a construção de simulação é usada para avaliar a contenção de energia o efeito ICU é menos de um fator.

CANTELLI et al. (2015) investigaram como a orientação do cânion urbano e a modelagem dos efeitos de borda (ou seja, cânions urbanos de comprimento finito) são importantes na simulação numérica da estimativa de energia de superfície em áreas urbanas.

---

Assim, a análise de sensibilidade do papel desempenhado pela hipótese e parametrizações escolhidas foi realizada pelo acoplamento do esquema TEB com o modelo de previsão numérica de tempo RAMS. Os resultados sugerem que uma descrição detalhada da geometria urbana poderia produzir diferenças não negligenciáveis dos balanços energéticos e dos campos de temperatura com relação ao que ocorre usando esquematizações mais simples, em especial durante o verão.

## 2.2 MORFOLOGIA E CLIMA URBANO

O clima urbano é um sistema complexo, singular à cidade. Lugar de profundas alterações nos parâmetros atmosféricos, abrangendo circulação, turbulência e dispersão do ar, albedo e estocagem de calor, evapotranspiração e balanço de energia na superfície (TAHA, 1997; ARNFIELD, 2003; KANDA, 2006).

O processo de urbanização define o clima característico deste ecossistema artificial. As principais alterações climáticas se resumem na substituição da cobertura natural por diversos tipos de pavimentações, bem como a inserção de um sistema de drenagem artificial que permite escoamento rápido das águas pluviais e provoca redução da evaporação e, conseqüentemente, da umidade das superfícies e do ar. Outro importante fator refere-se aos materiais de construção utilizados no meio urbano. Estes possuem propriedades físicas distintas do solo natural, apresentando menor valor de albedo, maior capacidade calorífica e valor mais elevado de condutividade térmica (BARBIRATO et al., 2012).

O estudo de OKE (1976) é uma das obras mais citadas na climatologia urbana, pois classifica dois níveis de escalas para o estudo do clima nessas áreas, que correspondem à zona das camadas inferiores da atmosfera, tipicamente abaixo dos 300 metros (onde o homem desenvolve as suas construções). São elas a Camada Limite Urbana - CLU (*Urban Boundary Layer*), que envolve toda a cidade e a atmosfera por ela alterada, e a Camada do Dossel Urbano - CDU (*Urban Canopy Layer*), que compreende a atmosfera intraurbana, sendo definida a partir de processos microclimáticos (Figura 04).

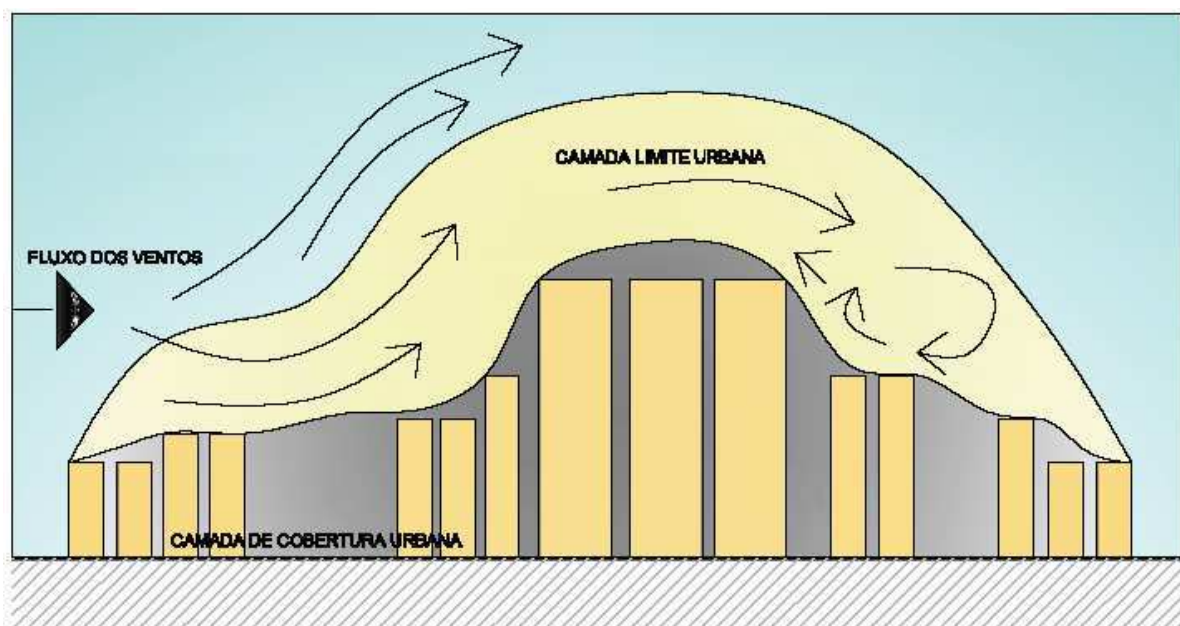


Figura 04 - Determinação da Camada Limite Urbana e Camada de Cobertura Urbana ou Camada do Dossel Urbano segundo OKE (1976). Fonte: ARAUJO, 2010.

A CLU corresponde a mesoescala e estende-se acima do nível dos telhados com características produzidas pela natureza da superfície urbana, cuja rugosidade, proporcionada pela presença de prédios relativamente altos, provoca uma aerodinâmica particular. A velocidade do vento reduz-se, mas ocorre um aumento da turbulência no arrasto produzido pela fricção do ar. A CDU que se localiza abaixo da CLU, apresenta-se na perspectiva da microescala, definida como a camada que inclui uma variedade de edifícios e árvores, até o nível das coberturas, localizada nas ruas entre os edifícios (OKE, 1997; GRIMMOND, 2006).

Um produto gerado ou identificado na CDU são os vales urbanos (cânion urbanos), que incluem as paredes dos edifícios que criam corredores entre edificações altas e concentradas separadas por ruas. Considera-se, para tal, a relação entre a altura, largura e comprimento das construções urbanas e as propriedades térmicas dos materiais que as constituem, como cobertura do solo e materiais de construção, entre outros. No interior do cânion, a radiação sofre múltiplas reflexões entre as ruas e as paredes dos edifícios com diferentes absorções (OKE, 1981; OKE, 1988; GRIMMOND, 2006).

OKE (1981) destaca, dentro da CDU, o que vem sendo designado como Fator de Visão do céu (*Sky View Factor*), importante na entrada de energia (insolação) no sistema, e que é definido pela fração do hemisfério ocupado pelo céu, correspondendo ao ângulo formado por duas retas procedentes do centro da rua em direção ao ponto mais alto das paredes dos edifícios adjacentes. A Figura 05 ilustra essa relação.

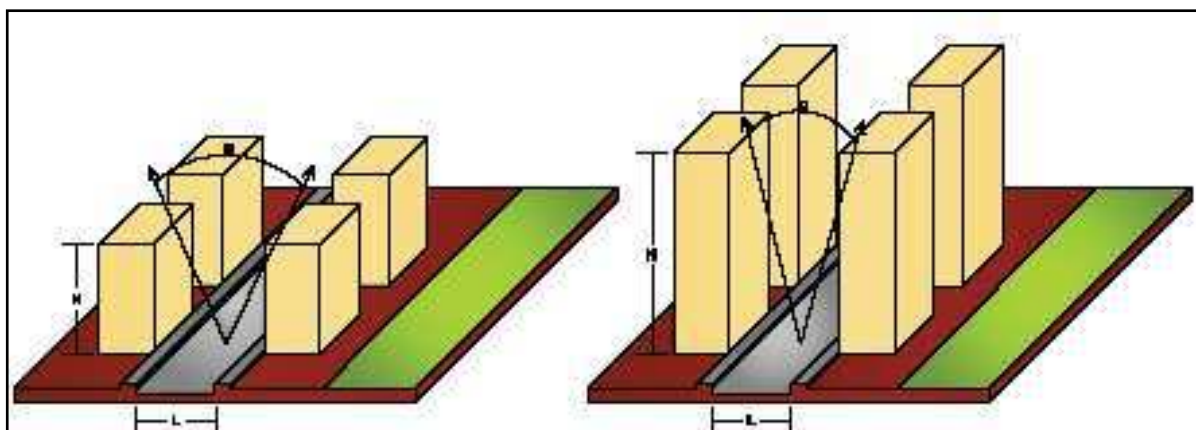


Figura 05 – Fator de Visão do Céu (*Sky View Factor*). Fonte: ARAUJO, 2010.

Segundo OKE (1981), a intensidade da radiação de onda longa e a capacidade de armazenamento de calor nas superfícies são efetivamente as variáveis que determinam as diferenças no balanço de energia e nas taxas de resfriamento entre os meios urbano e rural. Assim, a geometria da malha urbana, avaliada pelo Fator de Visão do Céu, e as propriedades térmicas das superfícies, vão aparecer como as propriedades mais relevantes.

Pode-se ainda destacar o calor gerado pelas diversas atividades humanas na cidade. Este também constitui fator significativo na modificação do balanço de energia. O calor antropogênico, somado aos efeitos já descritos, provoca aumento nos valores de temperatura do ar em relação aos ambientes vizinhos, denominado de ilha de calor urbana, concorrendo para o surgimento de características climáticas peculiares ao ecossistema urbano (BARBIRATO et al., 2012). Esse fenômeno é o grande responsável pelo desconforto térmico enfrentado pelos moradores das médias e grandes cidades, tendo um grande potencial de ocasionar grandes danos à saúde pública além de provocar aumento do consumo energético.

SILVA et al. (2010) estudaram o clima urbano da cidade de Campina Grande em que procurou avaliar um índice bioclimático e a ocorrência de uma ilha de calor urbana na cidade. Os resultados indicaram que houve um aumento de 1,5 °C na temperatura do ar e uma redução de 7,2% na umidade relativa ao longo da série de tempo analisado. O índice de desconforto de Thom mostrou uma tendência estatisticamente significativa de aumento (teste de Mann-Kendall,  $p < 0,01$ ) para as estações seca e chuvosa no período anual de cerca de 1 °C nos últimos 41 anos na cidade de Campina Grande.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

O presente trabalho tem como foco a cidade de Campina Grande situada no interior do Estado da Paraíba, na região oriental do Planalto da Borborema. Ocupa o trecho mais alto do Planalto com altitude de 520 metros acima do nível do mar (SOUSA et al., 2011), tendo o seu centro situado nas coordenadas 7°13' latitude Sul e 35°52' longitude Oeste de Greenwich (Figura 06). Encontra-se cerca de 120 km de distância da Capital do Estado - João Pessoa.

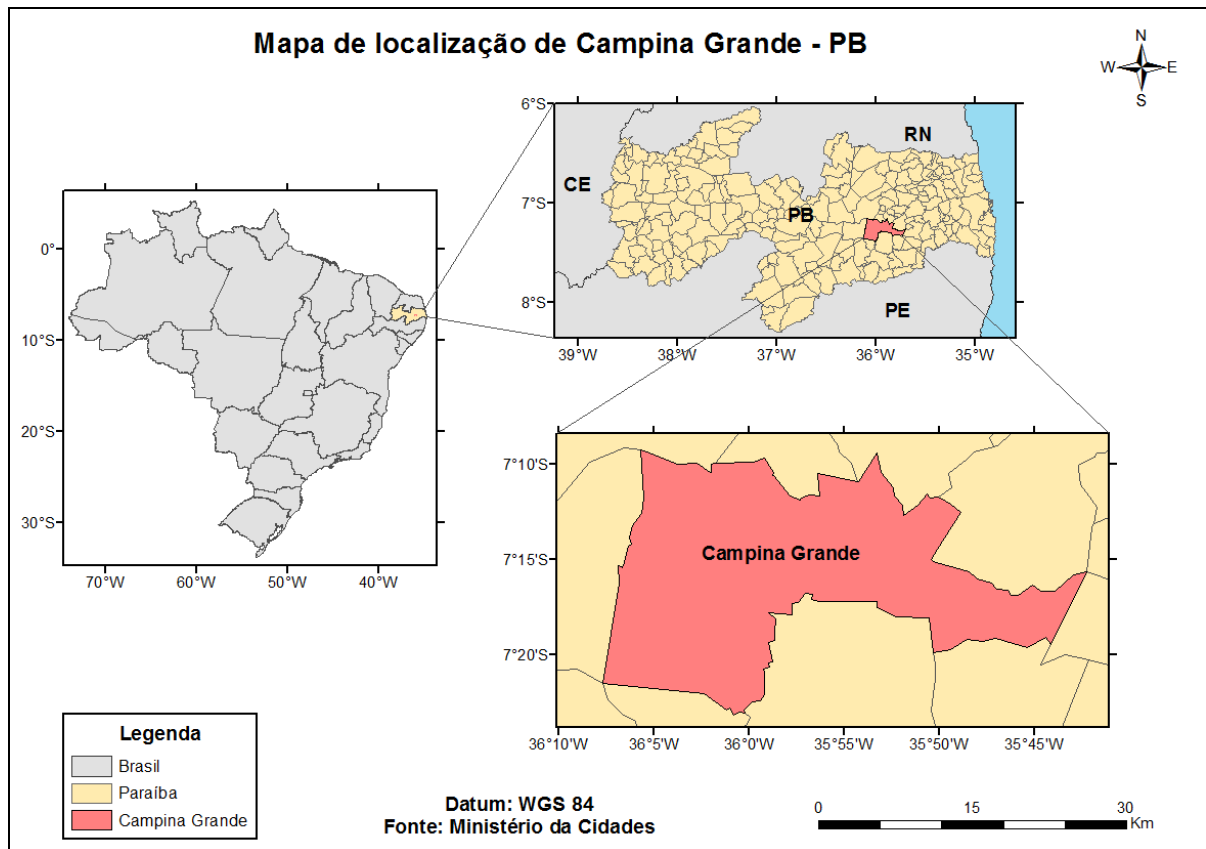


Figura 06 – Mapa de localização da cidade de Campina Grande – PB.

O município possui um relevo forte e ondulado com curvas de nível variando entre 325m e 670m acima do nível médio do mar. Por se encontrar na mesorregião do agreste paraibano, entre o litoral e o sertão, usufrui de um clima mais ameno. A cidade situa-se na fronteira entre microrregiões de clima e vegetação diferentes. Ao nordeste, a paisagem é verde e arborizada, típica do brejo presente nas partes mais altas do planalto. Ao sudeste, encontra-se uma paisagem típica do agreste, com árvores e pastagens. As regiões oeste e sul do

---

município são dominadas pelo clima e vegetação do Cariri, com vastas áreas de vegetação rasteira tipo caatinga e clima seco.

A temperatura média anual gira em torno dos 22 °C, podendo atingir 30 °C nos dias mais quentes e 15 °C nas noites mais frias do ano. A umidade relativa do ar, na área urbana, varia normalmente entre 75 a 83% (LIMA et al., 2008). De acordo com a classificação de Köppen, o clima predominante é do tipo As' – quente e úmido com chuvas de outono-inverno (KÖPPEN & GEIGER, 1928). O período de estiagem varia de cinco a seis meses começando em setembro e prolonga-se até fevereiro, sendo mais acentuado no trimestre da primavera, salientando-se o mês de novembro como o mais seco. Já a estação chuvosa começa em março/abril e encerra em agosto, sendo o mês de julho o de maior precipitação (CUNHA et al., 2009). Tem-se a precipitação média anual de 824 mm.

A cidade de Campina Grande conta com uma área total de 594,182 quilômetros quadrado (km<sup>2</sup>) e é considerada o centro de polarização de maior importância econômica da Mesorregião. Representa o segundo maior centro urbano e a segunda maior população do Estado, exercendo grande influência política e econômica sobre as cidades circunvizinhas. Segundo o IBGE (2014), a população de Campina Grande estimada para 2015 está em torno de 405.072 habitantes (hab), tendo uma densidade demográfica de 648,31 hab/km<sup>2</sup>. Sua população é praticamente toda urbana com um total 367.209 habitantes vivendo na área urbana, o que equivale a aproximadamente 95% de toda a população do município (IBGE, 2010).

A dinamização e o crescimento da cidade de Campina Grande deram-se, sobretudo com a produção algodoeira que foi, por vários anos, o carro chefe da economia campinense, dando-lhe respaldo nacional e internacional. Nas décadas de 1940-1950 registraram-se os maiores índices de crescimento da cidade, tanto em população como em área urbana, período que marcou a consolidação do centro regional mais importante de todo o interior do Nordeste, resultado da acumulação do capital oriundo da produção e comercialização do algodão. Este foi, também, o período de maior crescimento populacional (SÁ, 2000).

Nos tempos atuais, segundo Cordão (2009), o crescimento populacional urbano de Campina Grande tem sido marcado pela forte influência exercida por sua função de polo regional, em razão da posição geográfica estratégica, e enquanto centro universitário e tecnológico de destaque. Esse crescimento urbano tem apresentado um caráter misto, com a expansão da malha urbana caracterizada pelo crescimento horizontal e, cada vez mais, um maior número de edificações verticais.

Na Tabela 01 é possível observar o crescimento urbano na cidade de Campina Grande nos últimos 40 anos.

Tabela 01 – Demografia da população de Campina Grande - PB entre os anos de 1970 a 2010.

	<b>1970</b>	<b>1980</b>	<b>1991</b>	<b>2000</b>	<b>2010</b>
População total (hab)	195.303	247.820	326.307	355.331	385.213
Urbana (hab)	167.335	228.171	307.468	337.484	367.209
Rural (hab)	27.968	19.649	18.839	17.847	18.004
Taxa de urbanização	85,68%	92,07%	94,23%	94,98%	95,33%

Fonte: LIMA, 2010 (anos de 1970 a 2000) e IBGE, 2010 (ano de 2010).

De acordo com a demografia da população de Campina Grande, demonstrada na Tabela 01, se observa que população urbana do município em 2010 cresceu 119,45% em relação ao ano de 1970, o que reflete o processo de urbanização pela qual a referida cidade vem passando nos últimos 40 anos. Não se pode assegurar o destino da população que deixou a área rural do município de Campina Grande, mas o fato concreto é que ao mesmo tempo em que ocorreu a redução da população rural, houve o aumento da população urbana.

SILVA (1986) atribui três fatores para o processo migratório: o aumento do número de migrações, causado por um período de estiagem, o incremento do parque industrial e a oferta de vagas na rede educacional, pública e privada, no ensino médio e superior. A fácil acessibilidade proporcionou o crescimento urbano da cidade de Campina Grande na década de 1970.

### 3.2 DADOS

Foram utilizados dados de temperatura do ar e velocidade do vento diário observados, referente aos dias 01 a 15 de outubro de 2014, oriundos da estação meteorológica automática do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) localizada na EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) na cidade de Campina Grande, com coordenadas 7,22 de latitude Sul e 35,90 de longitude Oeste, e calculados os valores médios horários para comparar e validar com a simulação feita no modelo.

A inicialização no BRAMS, que é o processo de preparação dos dados para a entrada no modelo, foi realizada a partir dos dados de reanálise, que consiste em séries meteorológicas obtidas através da assimilação e reanálise de dados observados em todo o



---

planeta, e foram disponibilizados pelo ECMWF – *European Center for Medium-Range Weather Forecast* (UPPALA et al., 2011), que dispõe de séries históricas de reanálise desde 1979 (confiáveis para o hemisfério sul) até a atualidade com 0,5 x 0,5 grau de resolução espacial. Esse esforço envolve a recuperação de dados de superfície terrestre, navio, radiossonda, aviões, satélites e outros dados, controle e assimilação. Igualmente aos dados observados, foram utilizados dados de reanálise das 00 UTC (*Universal Coordinated Time*) às 23 UTC referente aos dias 01 a 15 de outubro de 2014. Esse horário UTC é equivalente a três horas a mais do horário local (hl) de Campina Grande.

Os modelos recebem como dados de entrada, a temperatura do ar, geopotencial, umidade do ar (temperatura do ponto de orvalho ou razão de mistura ou umidade relativa do ar ou, ainda, diferença psicrométrica) e vento (componentes zonal – u e meridional – v ou direção e intensidade) em diversos níveis da atmosfera.

### 3.3 CONFIGURAÇÕES DO MODELO

O modelo numérico de mesoescala utilizado neste trabalho é a versão brasileira do RAMS, no caso o BRAMS, conforme descrito no tópico 2.1, na versão 5.02, o qual possui um completo e sofisticado conjunto de parametrizações físicas para simular os processos que causam os fenômenos ocorridos na atmosfera.

A fim de analisar a melhor representação das variáveis atmosféricas influenciadas pelo espaço urbano, foram realizados dois experimentos comparativos utilizando o TEB ativado e o TEB desativado, de acordo com a descrição do tópico 2.1.4. A simulação com cidade consiste numa representação realista, considerando as características da região urbana de Campina Grande e sua interação com a atmosfera mediante a utilização do TEB. Na simulação sem cidade, com o TEB desativado, esta região foi substituída pelo tipo de vegetação característico do entorno, a fim de poder avaliar o impacto nas variáveis meteorológicas.

Estas simulações foram realizadas para 15 dias (01 a 15 de outubro de 2014), calculadas com base na média do retângulo que envolve a região urbana da cidade de Campina Grande, o qual foi pré-determinado antes da rodada, com saídas de 1 em 1 hora (00 UTC às 23 UTC), de modo a avaliar tanto a evolução diurna das variáveis de interesse quanto os padrões no período noturno. Os dias do experimento se referem ao período seco na cidade

de Campina Grande, e o critério para a escolha deste período se deu pela disponibilidade de dados observacionais para a validação dos experimentos.

Foram utilizadas duas grades aninhadas, a primeira com espaçamento na horizontal de 4 km (grade 1) centrada nas coordenadas 7,21 de Latitude Sul e 34,88 Longitude Oeste, tendo 120 pontos de grade em  $x$  e 100 pontos em  $y$ , e a grade 2 com a resolução mais refinada de 1 km de espaçamento horizontal, centrada nas coordenadas 7,21 de Latitude Sul e 35,88 Longitude Oeste, tendo 102 pontos de grade em  $x$  e  $y$ . O domínio da grade 1 abrange tanto o interior como o litoral do estado da Paraíba, bem como os estados vizinhos de Pernambuco e Rio Grande do Norte. Já a grade 2 abrange a região da cidade de Campina Grande e seu entorno, conforme demonstrado na Figura 07.

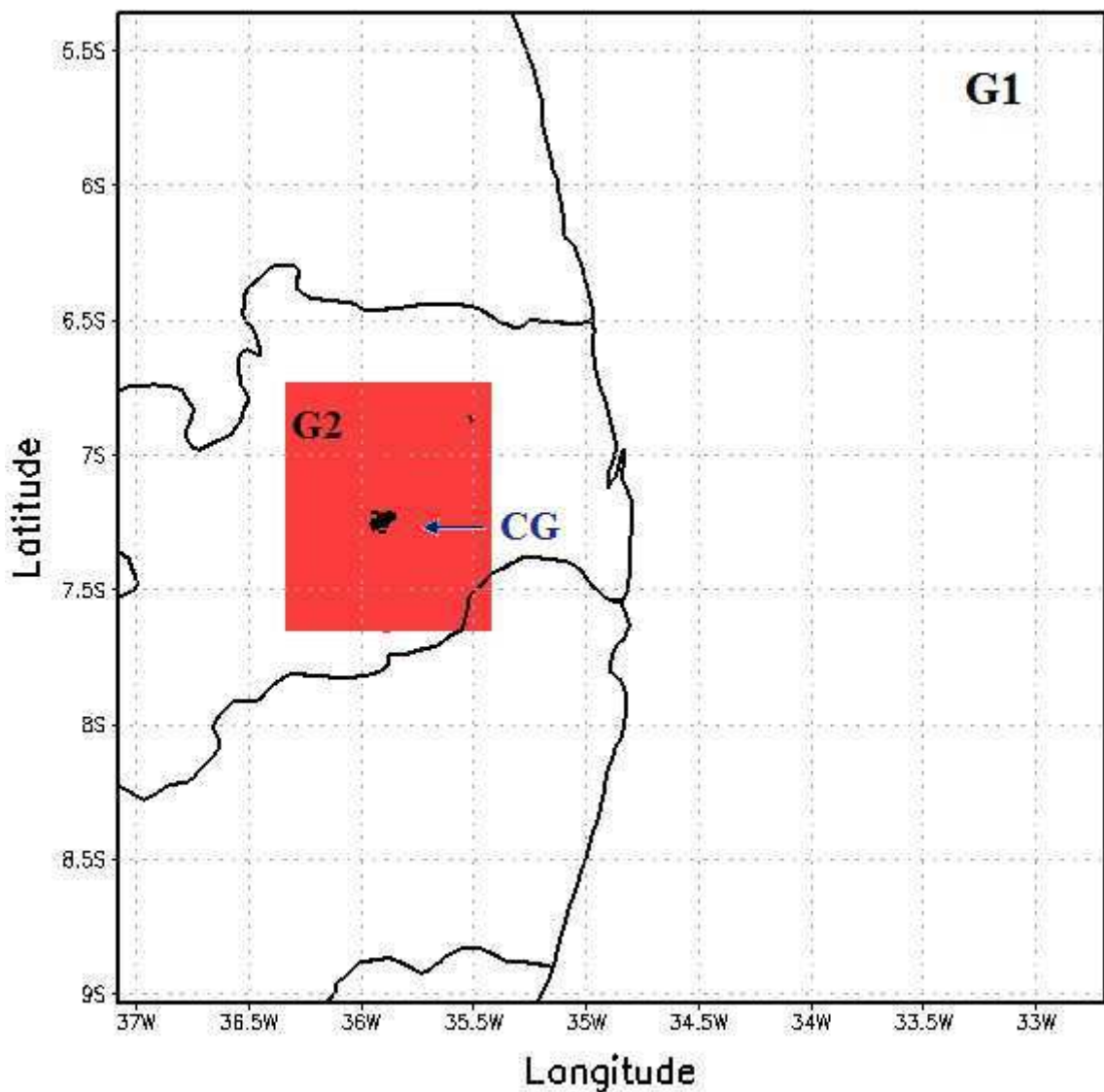


Figura 07 – Domínio das duas grades aninhadas, sendo G1 a grade de 4 km e G2 a de 1 km, em que se encontra destacada a cidade de Campina Grande (CG).

A projeção horizontal utilizada para a definição das coordenadas da grade foi à estereográfica, cujo polo de projeção fica próximo do centro da área de domínio. Este tipo de projeção diminui distorções da área de interesse. Quando se trabalha com modelos atmosféricos é muito comum não utilizar coordenadas cartesianas para representar o terreno, tendo em vista que o domínio de um modelo de mesoescala pode ser extenso (CAVALCANTI, 2001; BARBOSA, 2007; PICCILLI, 2007; TEICHRIEB, 2008; OLIVEIRA, 2009).

A estrutura vertical é tão importante na definição do comportamento do modelo como a configuração horizontal. Na vertical, foi utilizado o sistema *sigma Z* ( $\sigma_z$ ), o qual contorna a topografia do terreno, descrito por TRIPOLI & COTTON (1982), entre outros. Neste sistema de coordenadas ( $\sigma_z$ ), o topo do domínio do modelo é exatamente plano e a base segue as ondulações do terreno. Na vertical foram utilizados 42 níveis, com espaçamento inicial com 18 m próximo a superfície e aumento a uma taxa de 1,2 a cada nível até atingir 1 km de altitude, acima do qual o espaçamento foi mantido constante e igual a 1 km. Esta configuração de níveis verticais, denominada de grade telescópica, permite um maior detalhamento dos processos na Camada Limite Planetária.

As configurações gerais do modelo BRAMS utilizadas nas simulações são mostradas na Tabela 02.

Tabela 02 – Configurações do modelo BRAMS utilizadas nas simulações.

Número de pontos na região de fronteira lateral utilizados para <i>nudging</i>	5
Escala de tempo de <i>nudging</i> nas fronteiras laterais	1800 s
Escala de tempo de <i>nudging</i> no topo do domínio	10800 s
Escala de tempo de <i>nudging</i> no centro do domínio	Desativada
Condição de Fronteira lateral	KLEMP & WILHELMSON (1978)
Frequência de atualização na tendência da radiação	1200 s
Número e níveis das camadas no solo	9 camadas (m): -2.0, -1.75, -1.50, -1.25, -1.00, -0.75, -0.50, -0.25, -0.05
Grau de saturação nas camadas de solo	0.50, 0.50, 0.50, 0.45, 0.45, 0.50, 0.50, 0.50, 0.50

Os processos que ocorrem ente a superfície e a atmosfera são representados numericamente de forma bem detalhada através das chamadas parametrizações físicas, das

---

quais foram utilizadas neste estudo, as parametrizações de radiação de onda longa e de onda curta propostas por CHEN & COTTON (1983), a de difusão turbulenta na camada limite planetária calculada segundo MELLOR & YAMADA (1982), a da microfísica que segue o esquema descrito por WALKO et al. (1995) e da superfície com o uso do esquema TEB proposto por MASSON (2000). Todas as parametrizações utilizadas neste trabalho estão detalhadas nos subitens do item 2.1.

Tem-se utilizado como condição de superfície, o mapa de ocupação do solo fornecido pelo programa IGBP (*International Geosphere Biosphere Programme*) do USGS (*United States Geological Survey*), com resolução de 30 segundos de arco (aproximadamente 1 km na região equatorial), o qual possui uma classificação com 17 tipos de superfícies, como diferentes tipos de vegetação, plantações, corpos d'água, entre outros. A partir deste mapa o modelo numérico faz uma conversão para a sua própria codificação de tipos de ocupação do solo (GOUVÊA, 2007). Neste trabalho, foi utilizado como base um refinamento deste mapa, elaborado por FREITAS (2003), em que é utilizado o esquema TEB acoplado ao modelo BRAMS, onde são incluídos dois tipos de superfície urbana, denominados de urbano 1 e 2. O tipo chamado urbano 1 é representativo de grandes centros, com construções altas e avenidas largas, enquanto que o tipo urbano 2 representa áreas mais residenciais, com construções baixas e ruas estreitas. Note-se, porém, que nesta classificação não há nenhum tipo de vegetação no interior das áreas identificadas como urbanas.

Os parâmetros característicos destes tipos urbanos são apresentados na Tabela 03 e durante as simulações foram mantidos conforme ajuste padrão. No entanto, vale salientar que, provavelmente o modelo tenha utilizado apenas o tipo urbano 2 nas suas rodadas, por Campina Grande não representar um grande centro urbano.

Para a validação do esquema TEB acoplado ao modelo BRAMS, foram necessários vários conjuntos de simulações buscando-se um melhor ajuste às condições da cidade de Campina Grande. Foi feita uma primeira simulação com a grade de menor resolução horizontal abrangendo a região do interior da Paraíba, porém os resultados apresentaram pouco impacto na temperatura da cidade. Uma segunda simulação foi realizada modificando o *nudging* e, da mesma forma que a rodada anterior, os resultados não apresentaram uma resposta coerente com relação ao impacto da cidade na temperatura. Após analisar as possíveis causas para a deficiência na resposta do modelo, chegou-se à conclusão que ao localizar a grade de 4 km numa posição que abrangesse a costa e as cidades litorâneas próximas a Campina Grande, ter-se-ia o impacto do efeito da advecção de massa advinda do

oceano interferindo na temperatura da cidade, apresentando assim uma resposta mais coerente com as condições da cidade.

Tabela 03 – Parâmetros característicos dos tipos urbanos.

<b>Variável</b>	<b>Urbano 1</b>	<b>Urbano 2</b>
Comprimento de rugosidade	3 m	0,5 m
Fração ocupada por prédios em cada grade	0,5	0,7
Altura das construções	50 m	5 m
Taxa vertical/horizontal das construções	4,4	2,4
Valor máximo de calor sensível associado à fonte veicular	90 W m <sup>2</sup>	60 W m <sup>2</sup>
Valor máximo de calor latente associado à fonte veicular	10 W m <sup>2</sup>	5 W m <sup>2</sup>
Valor máximo de calor sensível associado à fonte industrial	10 W m <sup>2</sup>	14 W m <sup>2</sup>
Valor máximo de calor latente associado à fonte industrial	30 W m <sup>2</sup>	50 W m <sup>2</sup>

Os dados oriundos do processamento, assim como o processo de validação do modelo utilizado, possibilitaram a realização da análise meteorológica, em que foram analisados a temperatura na superfície, velocidade do vento, água líquida das nuvens, razão de mistura, fluxo de calor sensível e latente, radiação de onda curta, albedo, radiação de onda longa incidentes e emitidos na superfície, saldo de radiação e energia cinética turbulenta.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE URBANA DE CAMPINA GRANDE

Para que o modelo possa simular a superfície urbana, foi necessário modificar o mapa de superfície para caracterizar o tipo de cobertura urbana da cidade de Campina Grande. Essa modificação foi feita com base em imagem de satélite de alta resolução espacial disponibilizada no Google Earth®, em que foi delimitado o polígono da área através de interpretação visual da imagem. A Figura 08 exibe o resultado final do mapa de superfície. Embora a cidade já conte com um número apreciável de construções altas, para uma resolução de 1 km prevalece o tipo suburbano, que é de unidades residenciais.

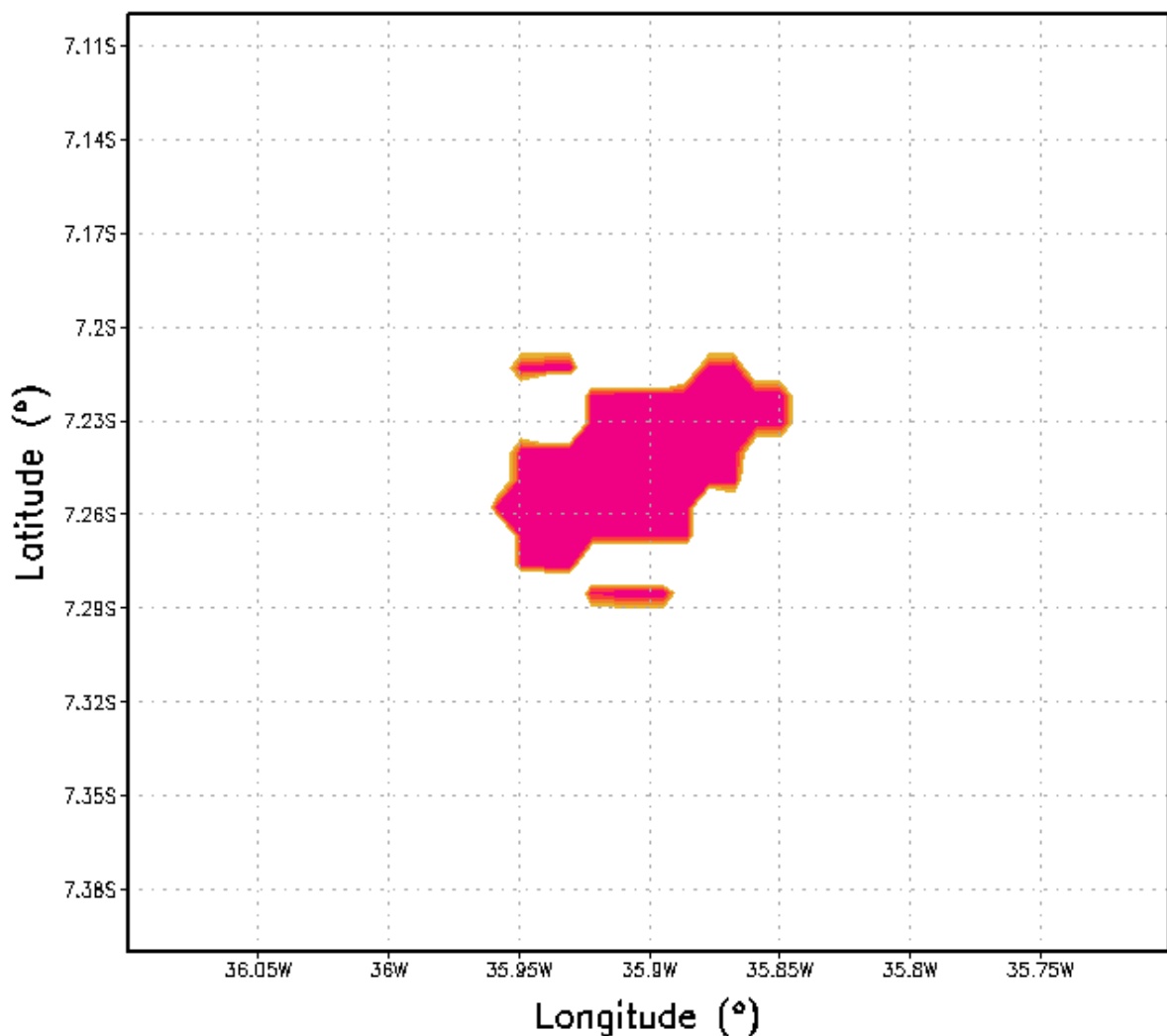


Figura 08 – Mapa de superfície para as simulações no modelo BRAMS.

---

## 4.2 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

As variáveis descritas a seguir representam um ciclo diário médio para os 15 dias de simulação, calculadas com base na média do retângulo envolvente da região urbana de Campina Grande, e validadas de acordo com os valores observados.

A Figura 09 apresenta o ciclo diário médio da temperatura do ar com os valores das simulações (TEB e STEB), bem como os valores observados para os dias 01 a 15 de outubro de 2014. Durante o período noturno, as temperaturas das duas simulações são aproximadas devido à cidade de Campina Grande se esfriar bem mais se comparada a cidades litorâneas que, por ter mais umidade advinda do oceano conserva a temperatura, como, por exemplo, no caso da capital do estado João Pessoa, como é possível observar no trabalho desenvolvido por BADIRU (2014).

É possível verificar que as temperaturas das duas simulações entre as 0 e 7 UTC (21 e 4 hl) são um pouco maiores se comparado aos valores observados. Será mostrado adiante que isso se deve à cobertura de nuvens, gerada no modelo, mais intensa nestes horários, que aumenta a radiação de onda longa emitida para a superfície, aumentando assim a temperatura.

Entre 8 e 13 UTC (5 e 10 hl), as duas simulações mostram comportamento similar. Após 13 UTC (10 hl), a curva do experimento TEB mostra uma tendência de aumento, atingindo o valor médio máximo de 27,7 °C por volta das 15 UTC (12 hl). Já a do STEB mostra um aumento menor, atingindo o valor médio máximo de 27,1 °C, por volta das 15 UTC (12 hl). Após 12 hl ambas as temperaturas começam a diminuir. Contudo a do experimento TEB diminui mais lentamente, pois os materiais que constituem o meio urbano concentram uma maior reserva de energia para ser transferida para a atmosfera. Ambos os experimentos antecipam o máximo observado, que ocorre entre 16 e 17 UTC (13 e 14 hl).

No período da tarde, após as 17 UTC (14 hl), o experimento TEB tende a representar a temperatura observada de forma mais realista.

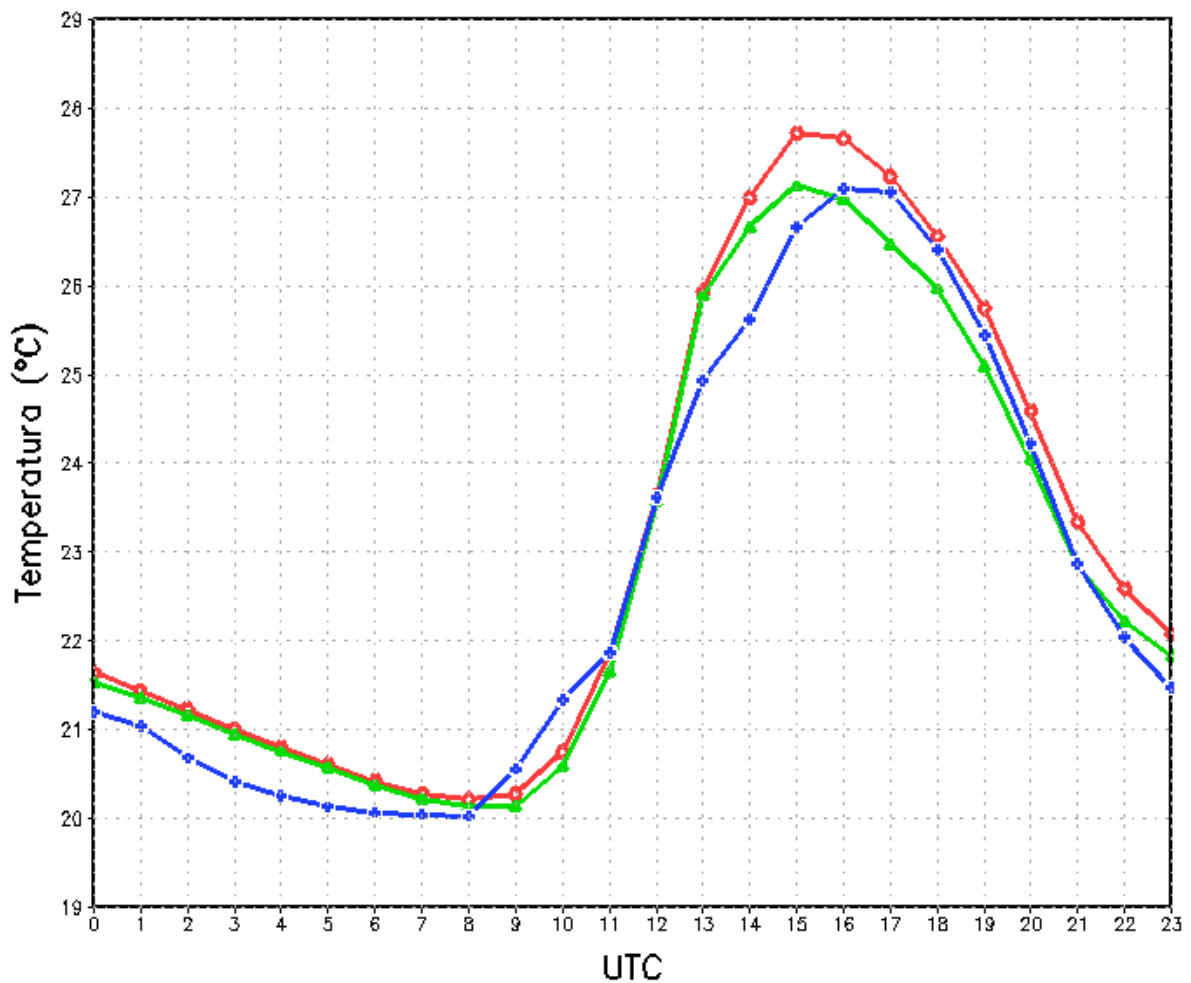


Figura 09 – Ciclo diário médio de temperatura do ar para os primeiros 15 dias de outubro de 2014. A linha azul representa os valores observados, a linha vermelha o experimento TEB e a linha verde o STEB.

A Figura 10 apresenta o ciclo diário médio da velocidade do vento para os 15 dias das simulações e dos valores observados. Durante o período noturno no horário local (considerando 3 horas a menos do UTC), o modelo superestima as observações de forma pouco realista. Os valores do experimento TEB são sempre superiores ao experimento STEB. Após 10 UTC (7 hl) o aumento do valor observado é refletido nas simulações. Pode-se especular que a deficiência no período noturno se deve a pouca habilidade do modelo em lidar com a turbulência noturna, que atua como um freio no vento observado.



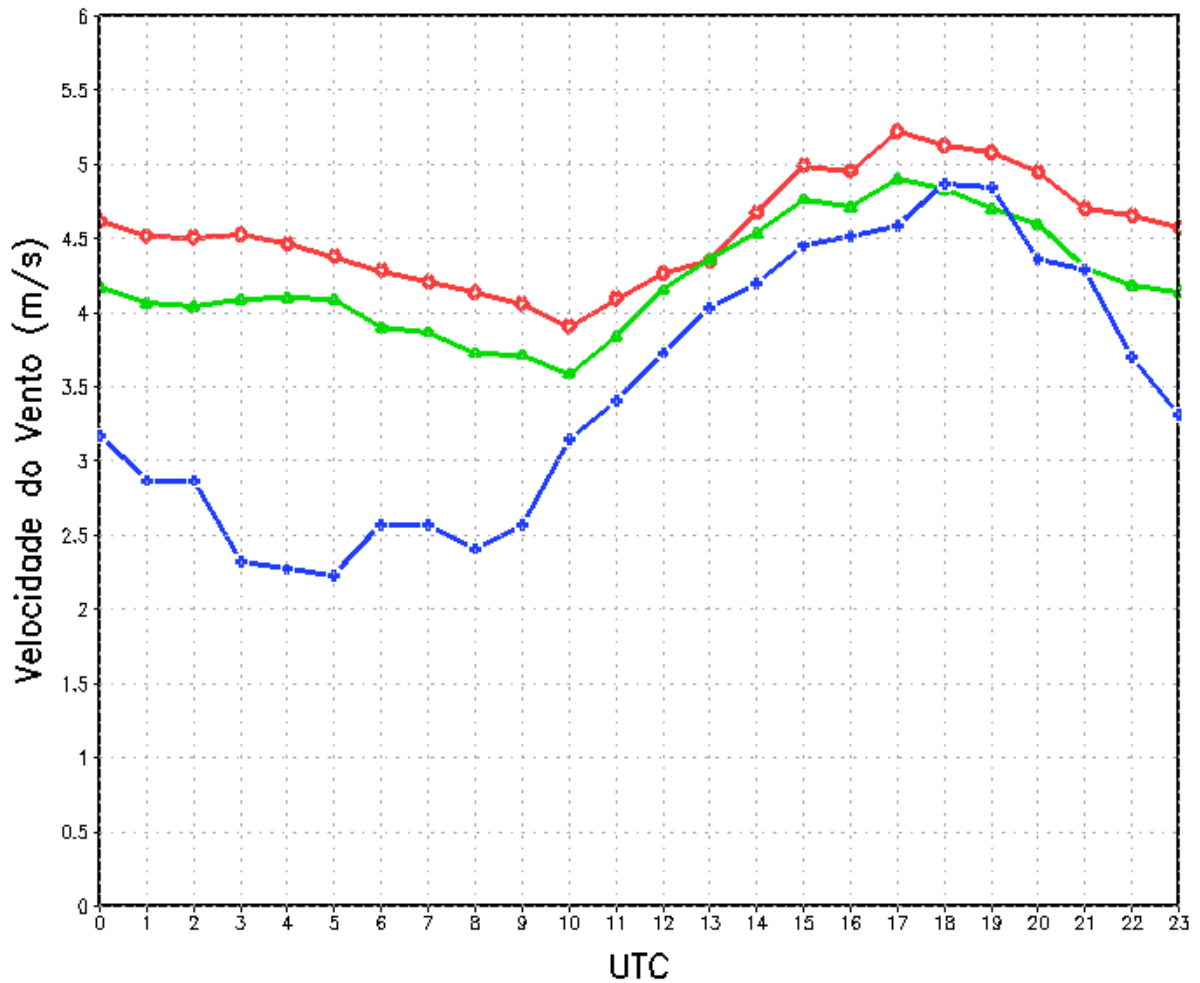


Figura 10 – Ciclo diário médio da velocidade do vento para os primeiros 15 dias de outubro de 2014. A linha azul representa os valores observados, a linha vermelha o experimento TEB e a linha verde o STEB.

Vale salientar que a estação meteorológica onde foram coletados os dados observados se encontra numa área menos densa da cidade, caso os experimentos fossem comparados com valores coletados na região mais urbanizada de Campina Grande, a tendência é que os resultados do experimento TEB fossem mais próximos aos observados. Porém, mesmo com esta condição, é válida a comparação realizada destes dados observados com o experimento TEB, já que o modelo faz a média da área e, de certa forma, os valores dos dados observados estão representados nessa média.

#### 4.3 DISCUSSÃO DO CICLO DIÁRIO DOS EXPERIMENTOS

Será discutido, inicialmente, o perfil vertical médio do conteúdo de água líquida das nuvens para o experimento TEB, conforme a Figura 11. Essa variável é central no balanço de

radiação, com reflexo na configuração dos campos de superfície. O modelo mostra a presença de nuvens baixas e rasas, com baixo conteúdo de água líquida. O máximo ocorre entre 4 e 5 UTC (1 e 2 hl) com valor de  $0,16 \text{ gkg}^{-1}$ . Para se ter uma ideia, o valor típico em nuvens oceânicas é de  $0,50 \text{ gkg}^{-1}$  e de  $0,35 \text{ gkg}^{-1}$  em nuvens continentais (SQUIRES, 1958). Para nuvens precipitantes, esse valor supera  $1,0 \text{ gkg}^{-1}$  (ROGERS & YAU, 1988). Embora durante o período diurno a espessura média da nuvem seja semelhante à do período noturno, pode-se ver que a base da nuvem se encontra mais elevada, em resposta ao forçamento térmico durante o período diurno. Percebe-se, nitidamente uma transição das nuvens com características noturnas para as diurnas entre 12 e 14 UTC (9 e 11 hl).

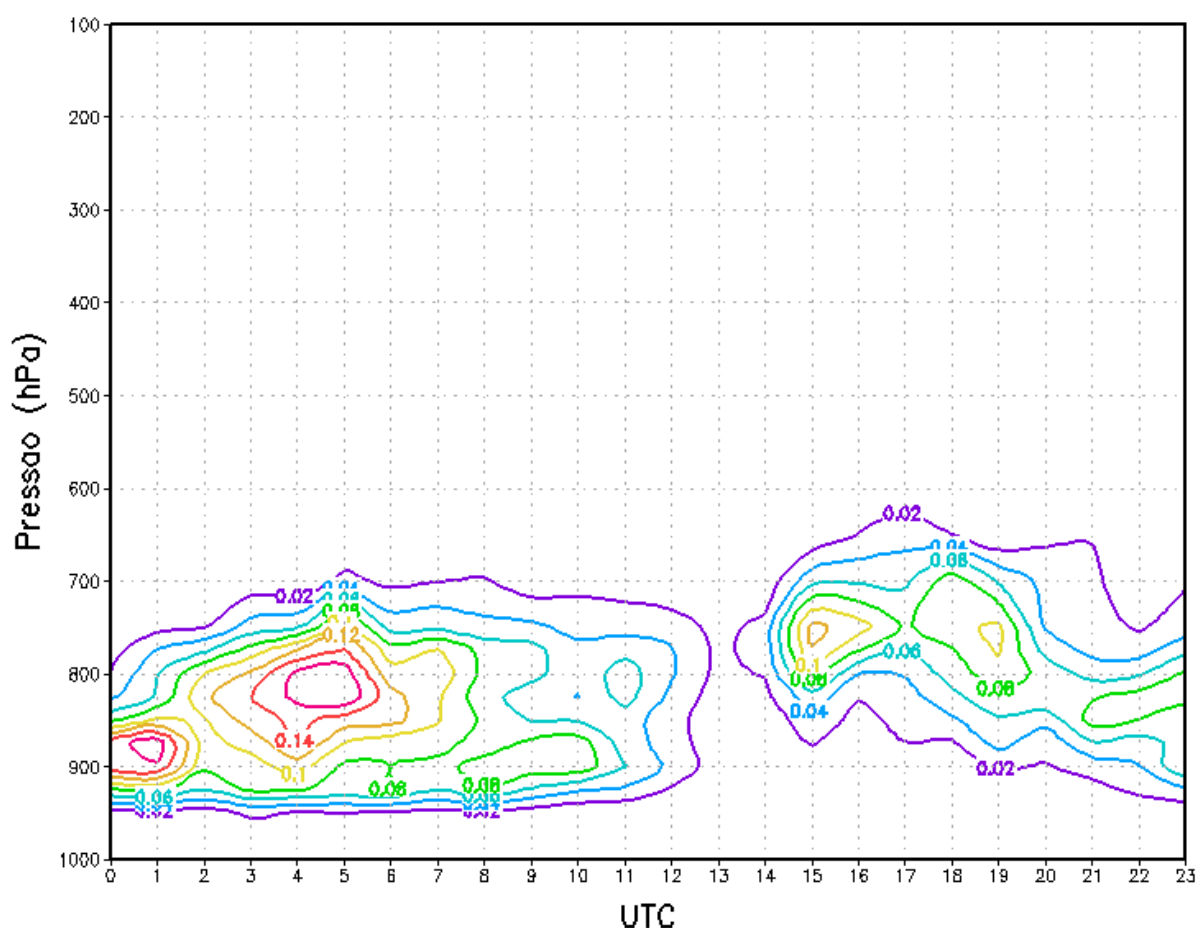


Figura 11 - Perfil vertical médio do conteúdo de água líquida das nuvens para o experimento TEB.

A Figura 12 representa a diferença do conteúdo de água líquida nas nuvens entre os experimentos TEB e STEB. É possível observar, se comparada à figura anterior, que de um modo geral os horários em que existe uma maior concentração de água líquida nas nuvens são os que o conteúdo se destaca positivamente com o experimento TEB na Figura 12. Portanto,

entre 2 e 6 UTC (23 e 3 hl), 11 e 13 UTC (8 e 10 hl), e, 14 e 15 UTC (11 e 12 hl) esse conteúdo é positivo no experimento TEB variando entre 0,01 e 0,02  $\text{gkg}^{-1}$ . Já nos demais horários a concentração de água líquida se apresenta de forma negativa, dando destaque ao experimento STEB, em que os valores variam entre -0,03 a -0,01  $\text{gkg}^{-1}$ .

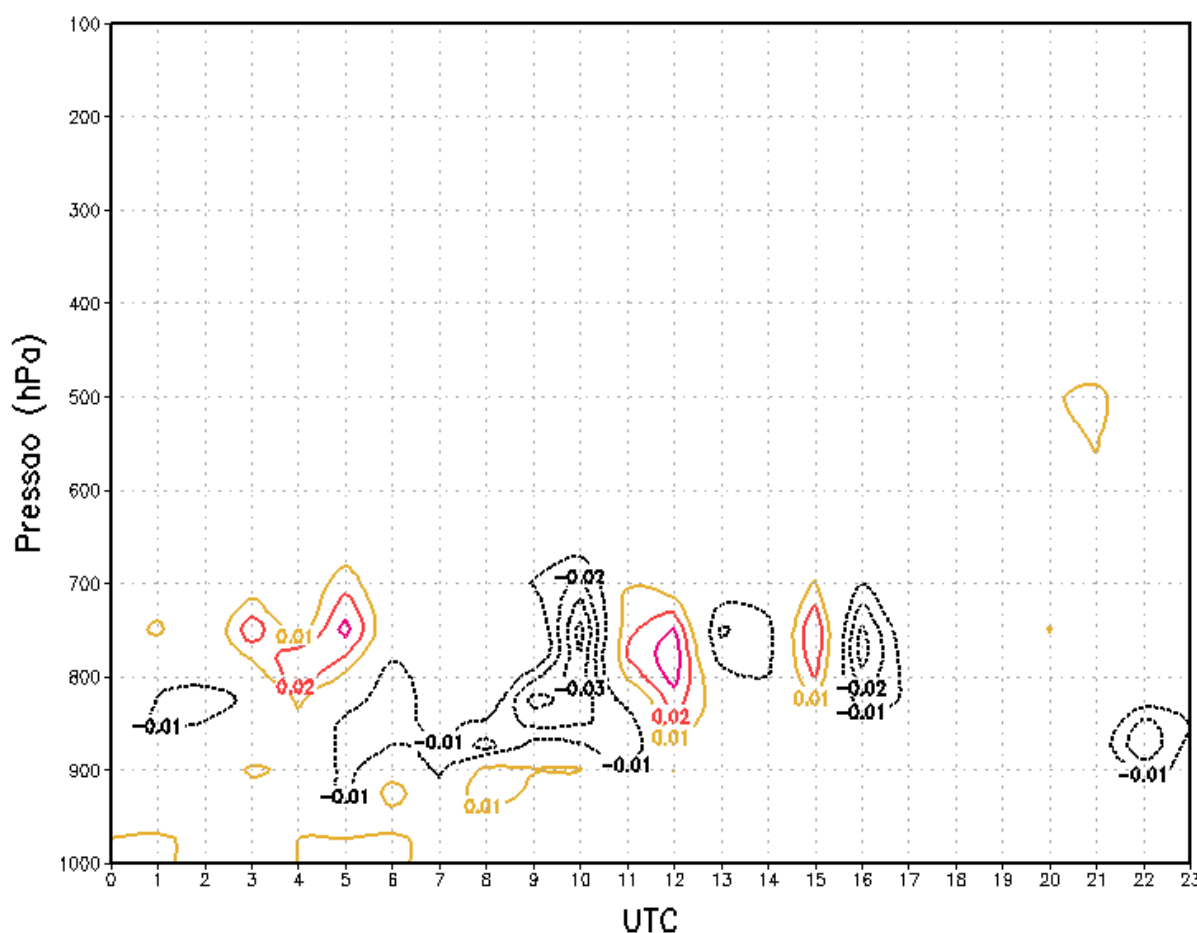


Figura 12 – Perfil vertical médio da diferença do conteúdo de água líquida nas nuvens entre os experimentos TEB e STEB.

O comportamento médio da razão de mistura, apresentado na Figura 13, é similar nos dois experimentos. Durante o período noturno, a razão de mistura do experimento TEB é maior que a do STEB. A diferença nunca é superior a 0,5  $\text{gkg}^{-1}$ . Esse comportamento se inverte durante o dia, com a razão de mistura do experimento STEB sendo superior à do TEB. Isso se deve ao fato de que durante o dia o modelo se apresenta mais úmido no experimento STEB, com a ausência da dinâmica urbana, e é resultado do maior fluxo de calor latente neste experimento, como será mostrado adiante.

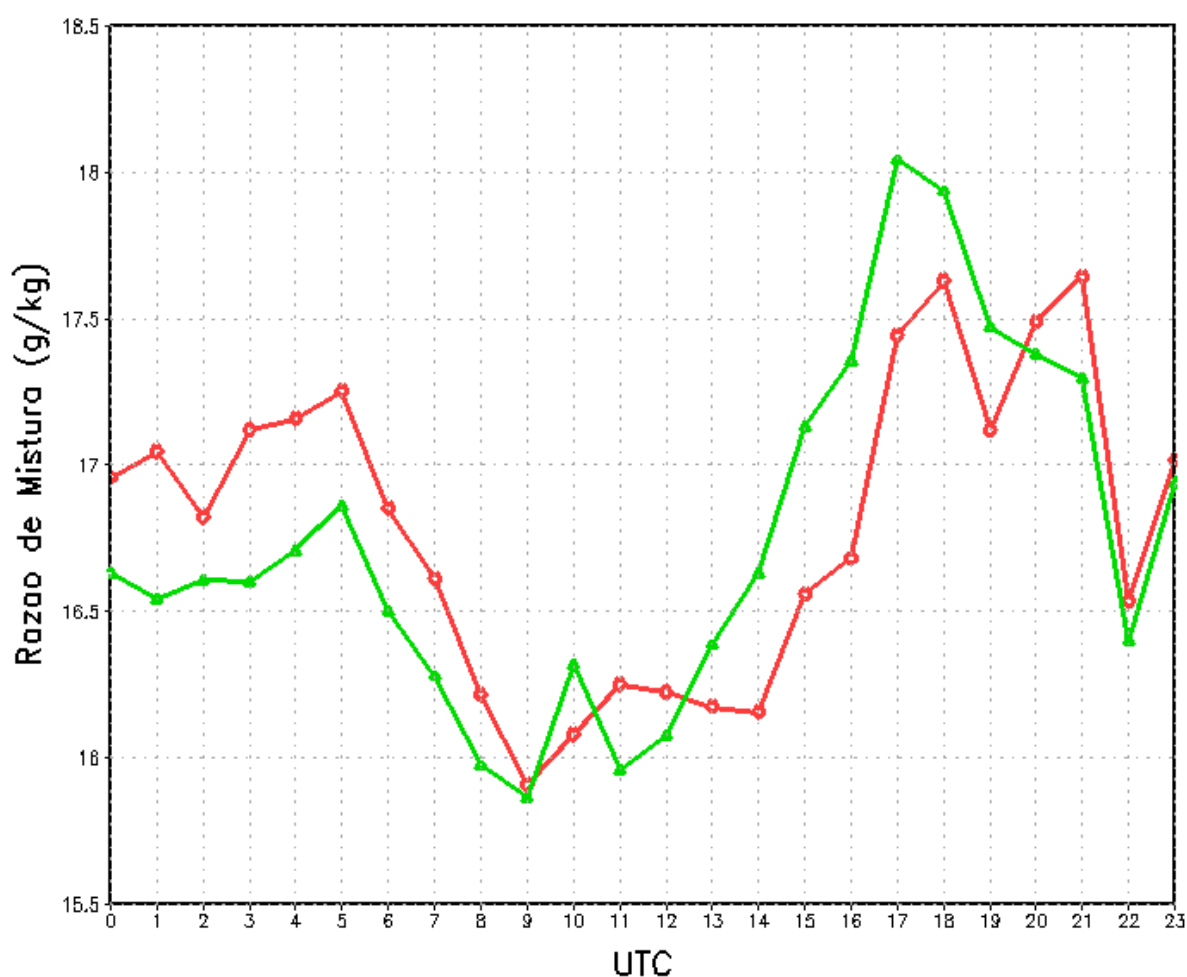


Figura 13 – Comportamento diário médio da razão de mistura para os dias 01 a 15 de outubro de 2014. A linha vermelha o experimento TEB e a linha verde o STEB.

A Figura 14 mostra o fluxo de calor sensível para os dois experimentos. É possível observar que o referido fluxo é maior, na média, no experimento TEB durante todo o ciclo diário. Esse resultado é coerente com o padrão de temperatura mostrado na Figura 09. A diferença é mais marcante por volta do meio-dia local (15 UTC), e é da ordem de  $150 \text{ Wm}^{-2}$ . Após o meio-dia local, o efeito da cidade sobre o fluxo de calor sensível começa a diminuir.

Um maior fluxo de calor sensível no TEB é um resultado coerente, pois a dinâmica urbana, devido à impermeabilização da superfície e aos sistemas de drenagem, faz com que haja uma maior reserva de energia para ser transferida para a atmosfera, o que favorece o aumento do fluxo de calor sensível e a diminuição do fluxo de calor latente, como será mostrado a seguir.

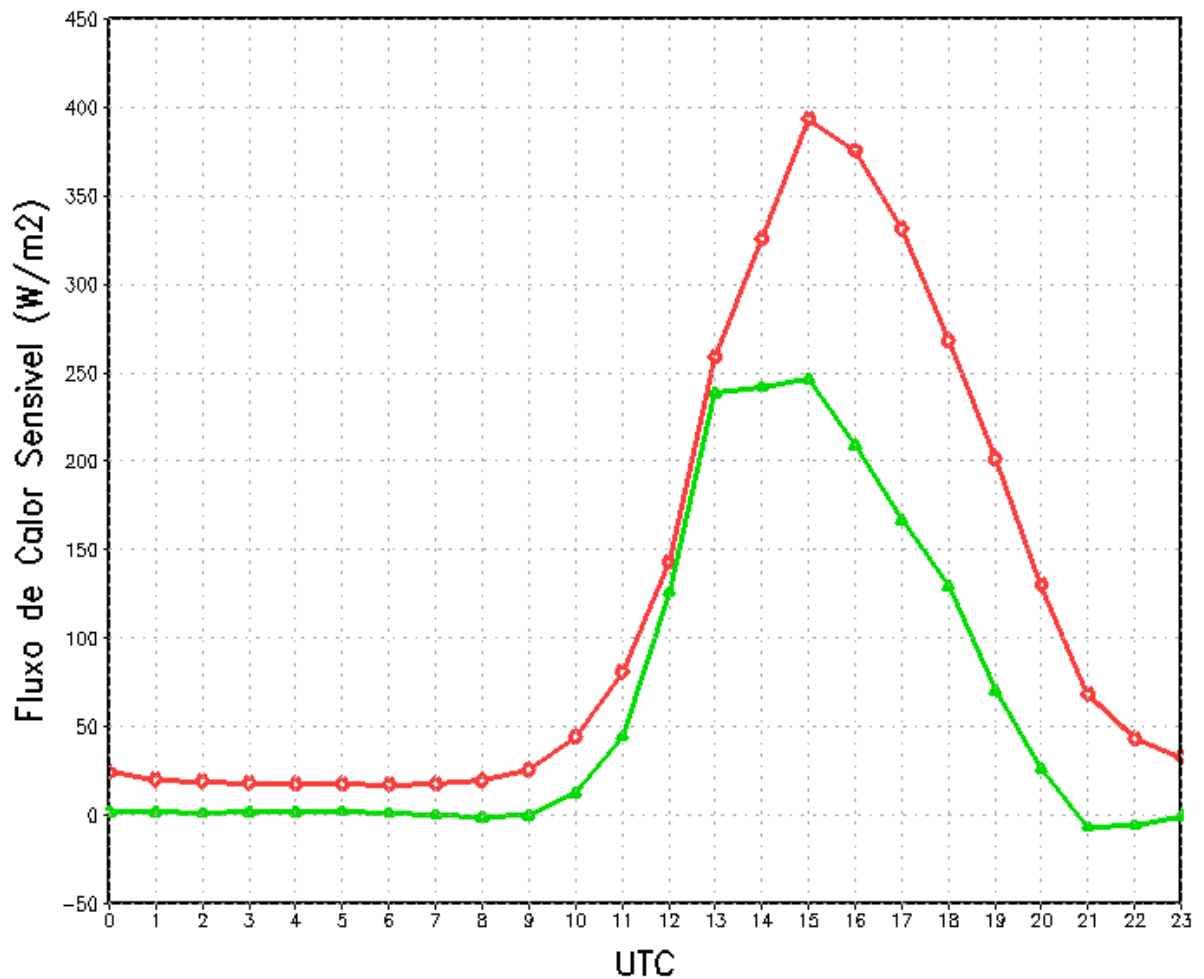


Figura 14 – Representa a média diária do fluxo de calor sensível para os dois experimentos, sendo a linha vermelha a representação do experimento TEB e a linha verde do STEB.

A análise do fluxo de calor latente, demonstrado na Figura 15, mostra valores médios do experimento TEB ligeiramente superiores durante o período noturno e bastante inferiores no período diurno, principalmente durante a tarde. A diferença entre os experimentos chega a ser superior a  $200 \text{ Wm}^{-2}$  às 15 UTC (12 hl) no STEB. Esta diferença nos dois experimentos entre o período noturno e o diurno é totalmente coerente com o observado na Figura 13, em que também no período da tarde a razão de mistura, que é influenciada pelo fluxo de calor latente, se apresentou superior no STEB em relação ao experimento TEB.

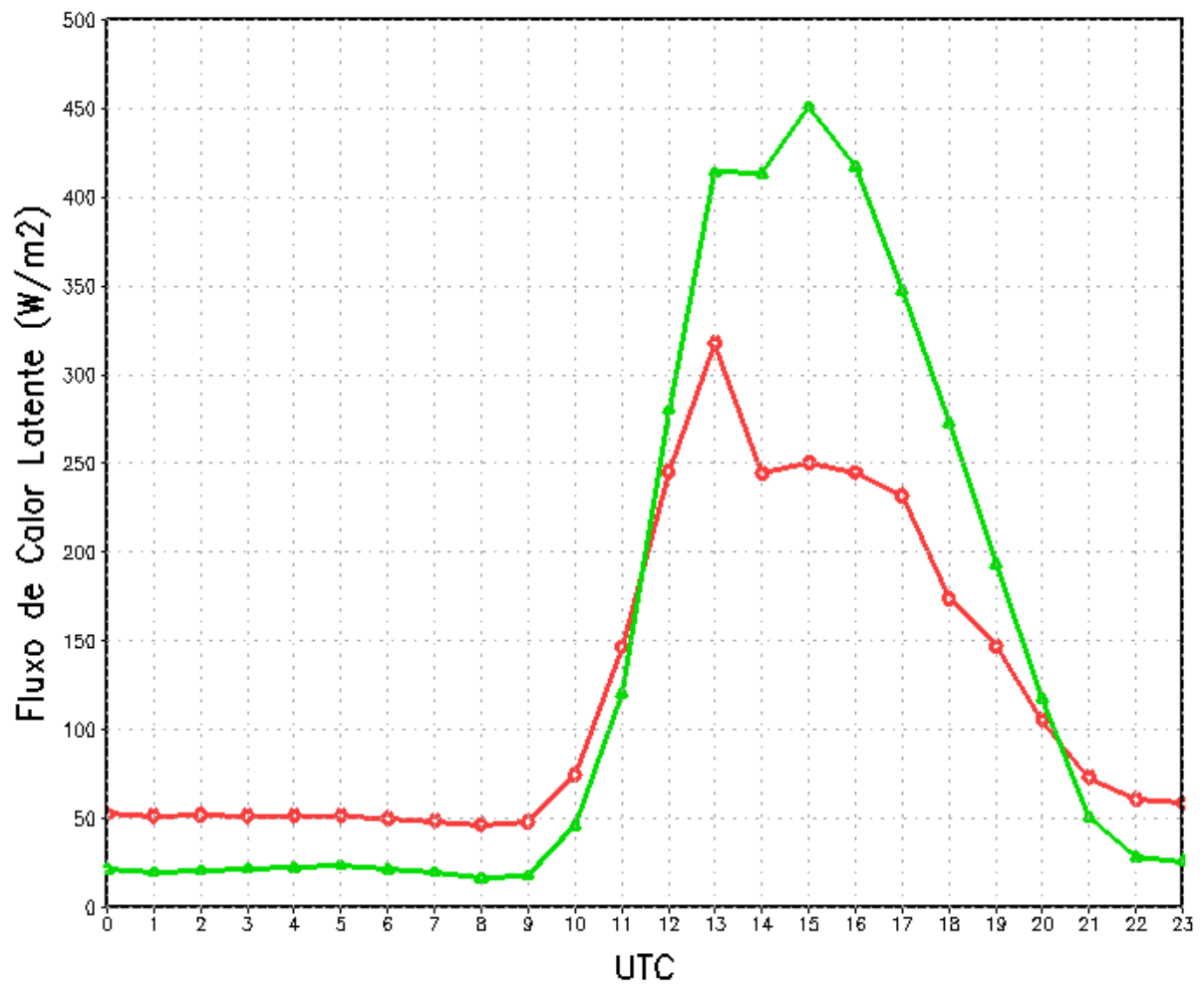


Figura 15 – Representa a média diária do fluxo de calor latente, em que a linha vermelha demonstra os fluxos no experimento TEB e a linha verde no STEB.

A Figura 16 mostra a média da radiação de onda curta para os experimentos TEB e STEB. Pode-se observar que às 13 UTC (10 hl) ocorre o pico de radiação de onda curta e que as curvas dos dois experimentos são bastante semelhantes, o que demonstra que o modelo apresentou pequena sensibilidade às atividades urbanas.

O pico típico é esperado por volta do meio-dia local (15 UTC). Mas, de acordo com a Figura 11, o céu se apresenta claro por volta das 13 UTC o que gera este pico em horário antecipado. A partir desse horário, a radiação passa a ser atenuada por nuvens cujo máximo ocorre exatamente às 15 UTC. Com isso, a curva média de radiação solar sofre forte atenuação no período da tarde.

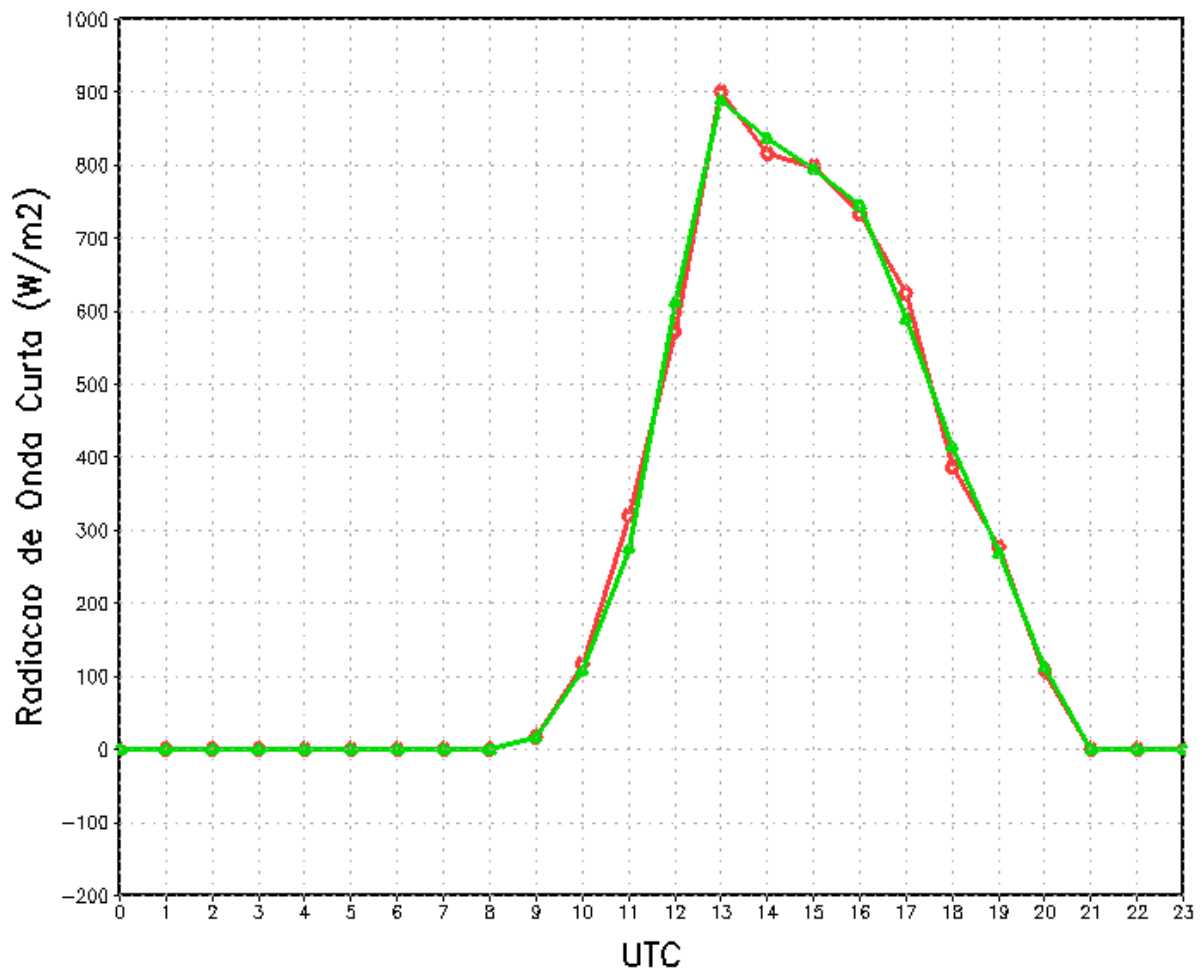


Figura 16 – Curva média da radiação de onda curta para os dois experimentos, sendo a linha vermelha a representação do experimento TEB e a linha verde a do STEB.

O albedo é bastante sensível à dinâmica urbana, pois é relacionado às características térmicas dos materiais que compõem a superfície. Assim, nas regiões urbanizadas, em geral, a radiação incidente nas construções é menos refletida, o que traz como consequência a maior absorção de energia, além da múltipla reflexão da radiação de onda curta nas superfícies do cânion, como é considerado pelo TEB e conforme pode ser observado na Figura 01. Desta forma, a Figura 17 mostra o perfil dos valores médios diários de albedo entre os dois experimentos, nela é possível constatar que em toda a média diária os valores do experimento STEB, por não levar em consideração a cidade, foi superior ao TEB, com a diferença variando de 3% a 4%.

Como esperado, durante o período diurno o albedo diminui à medida que se aproxima do meio-dia local (15 UTC).

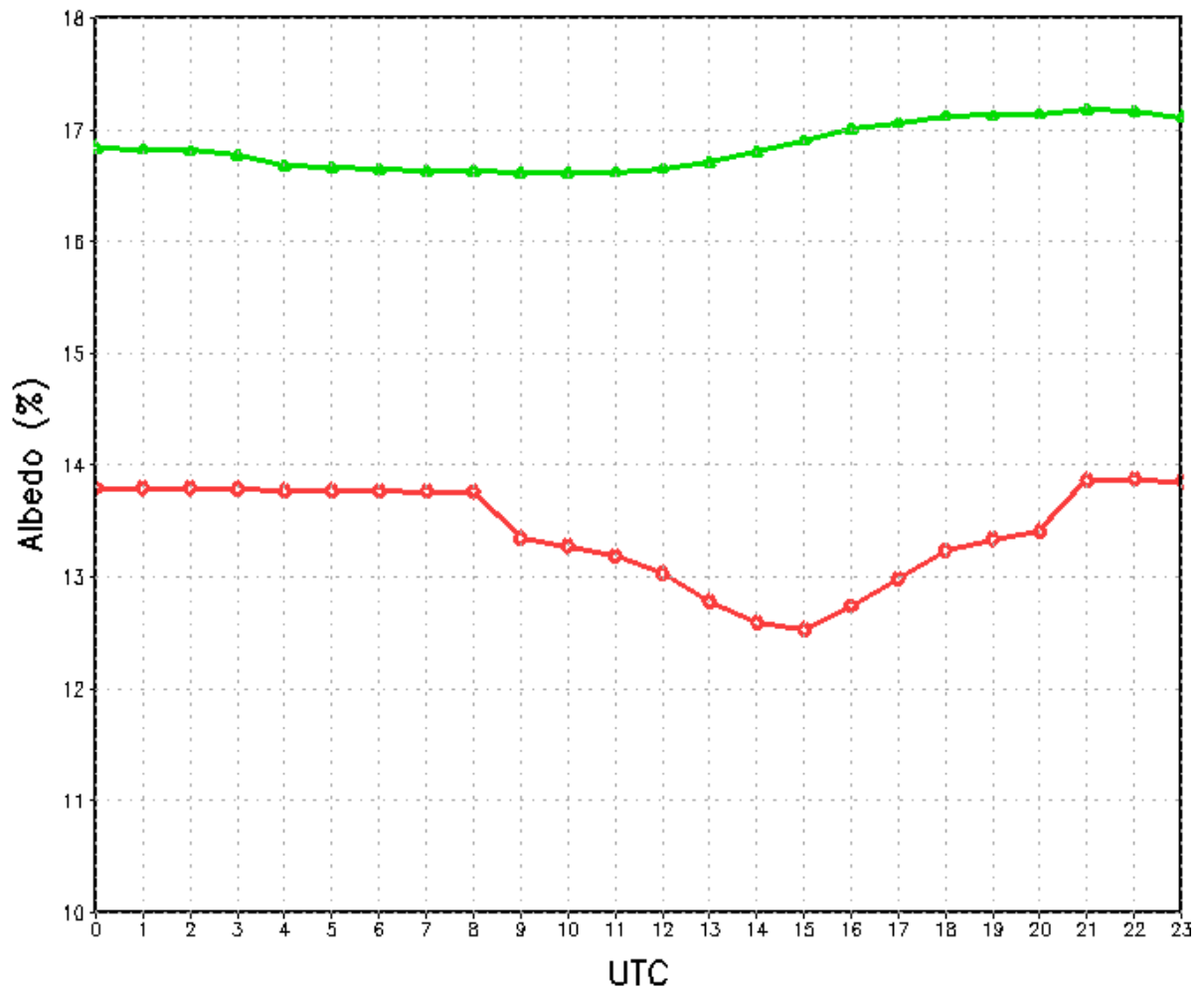


Figura 17 – Perfil dos valores médios diários de albedo entre o experimento TEB (linha vermelha) e o experimento STEB (linha verde).

Na Figura 18 é possível observar o fluxo médio da ROL (Radiação de Onda Longa) ascendente, que se apresenta com valores menores durante o período noturno no experimento TEB, pois a cidade tende a aumentar a absorção de onda curta pelo aprisionamento no interior do cânion, devido à redução do fator de visão do céu, definido como a razão entre a largura das ruas e a altura das construções, diminuindo assim a sua emissividade. No período diurno o fluxo da ROL ascendente se eleva, tendo seu pico às 15 UTC (12 hl).



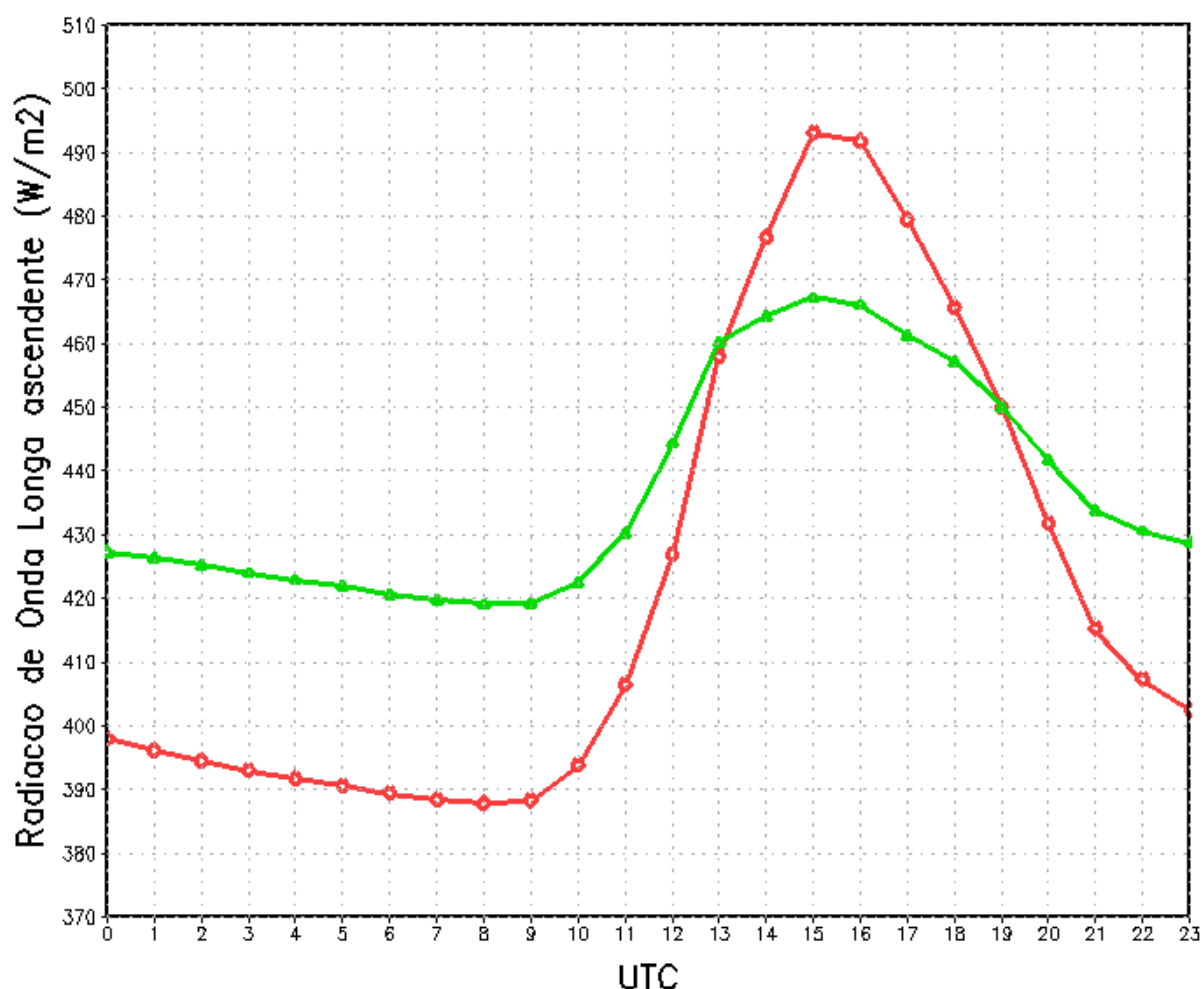


Figura 18 – Apresenta o ciclo do fluxo médio da ROL (Radiação de Onda Longa) ascendente para os experimentos TEB (linha vermelha) e para o experimento STEB (linha verde).

A ROL descendente reemite a radiação absorvida pelas nuvens e pelos poluentes atmosféricos que foi emitida pela ROL ascendente. A distribuição vertical de gases e o tipo de nuvem, combinados com o perfil de temperatura, determinam o valor da ROL descendente à superfície. Assim, a Figura 19 mostra o fluxo médio para o experimento TEB e STEB, em que apresenta valores aproximados para os dois experimentos. Porém, é possível observar na Figura 12 que ao apresentar valores positivos de água líquida, a ROL descendente tende a ser um pouco mais forte no experimento TEB.

Nota-se que as 13 UTC (10 h) o fluxo da ROL descendente cai consideravelmente, isso se deve à ausência de nuvem neste horário devido a transição das nuvens de características noturnas para as diurnas, conforme foi demonstrado na Figura 11, a qual apresenta o conteúdo de água líquida das nuvens.

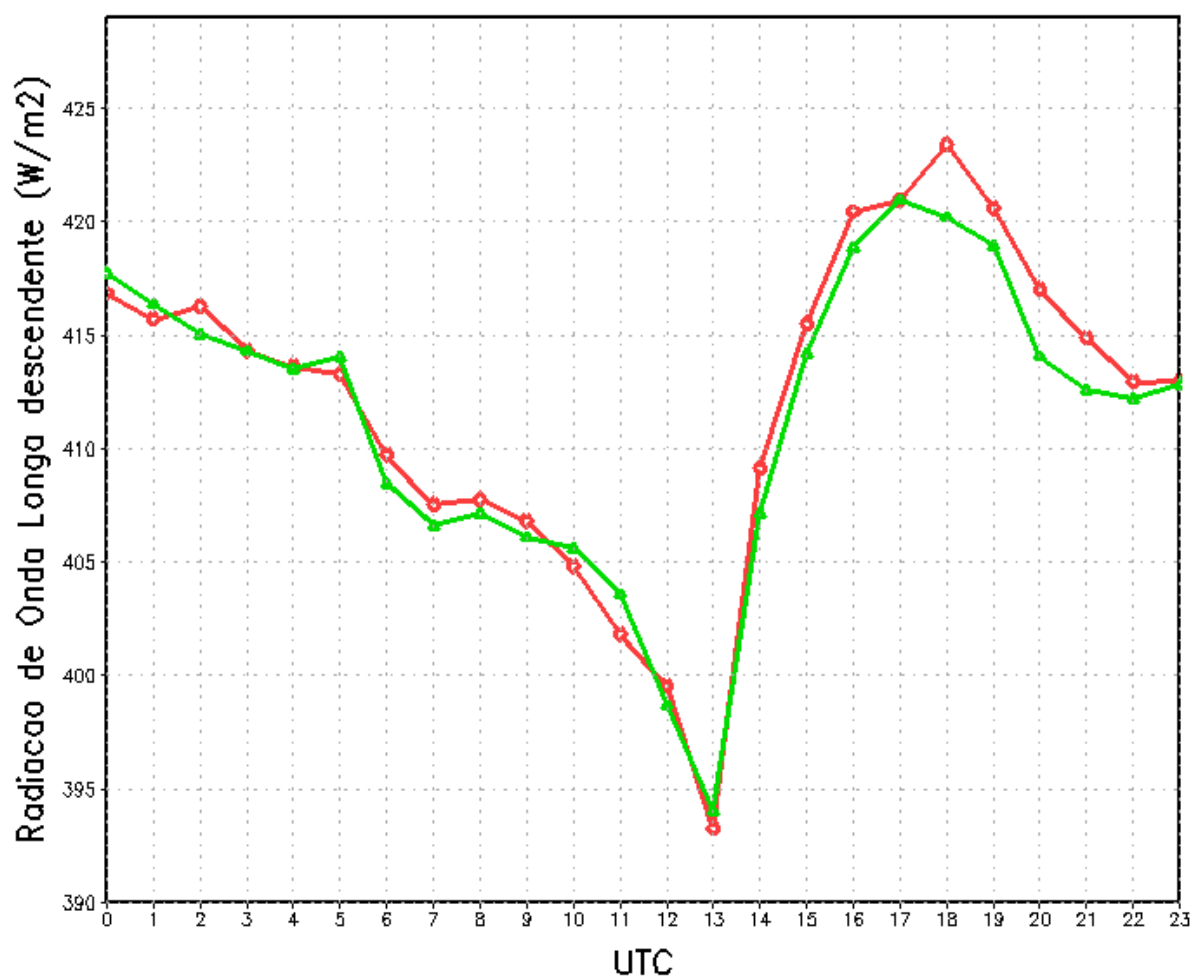


Figura 19 – Apresenta o ciclo médio diário do fluxo da ROL descendente para os experimentos TEB, representado pela linha vermelha, e STEB, representado pela linha verde.

A Figura 20 apresenta o perfil médio diário do saldo de radiação da superfície para os experimentos TEB e STEB. O saldo de radiação representa a energia disponível na superfície terrestre que é obtida pelo balanço de radiação de ondas curtas e de ondas longas que chegam e saem de uma superfície.

Naturalmente, é possível observar que durante o período diurno o saldo de radiação apresenta valores bastante elevados se comparados ao período noturno, tendo seu pico às 13 UTC (10 h). No período diurno percebe-se que a superfície urbana contribui para um aumento deste saldo, apresentando valores maiores no experimento TEB. Durante o período noturno o experimento STEB apresenta valores um pouco mais elevados com relação ao experimento TEB, o qual apresenta saldo negativo. Esses valores são coerentes com o perfil do albedo (Figura 17), pois à medida que diminui o albedo aumenta o saldo de radiação e vice-versa.

Porém, de um modo geral, verifica-se que o saldo de radiação na superfície urbana tende a variar pouco em relação a uma área rural, conforme estudos iniciados por OKE (2005). As razões são o decréscimo na radiação de ondas curtas incidente que é parcialmente compensado pelo albedo reduzido da superfície urbana, implicando em radiação de onda curta refletida menor. A radiação de onda longa incidente tende a aumentar com o aumento da emissividade atmosférica e a radiação de ondas longas refletida pela superfície aumenta, provocada pelo aumento da temperatura de superfície (ARNFIELD, 2003).

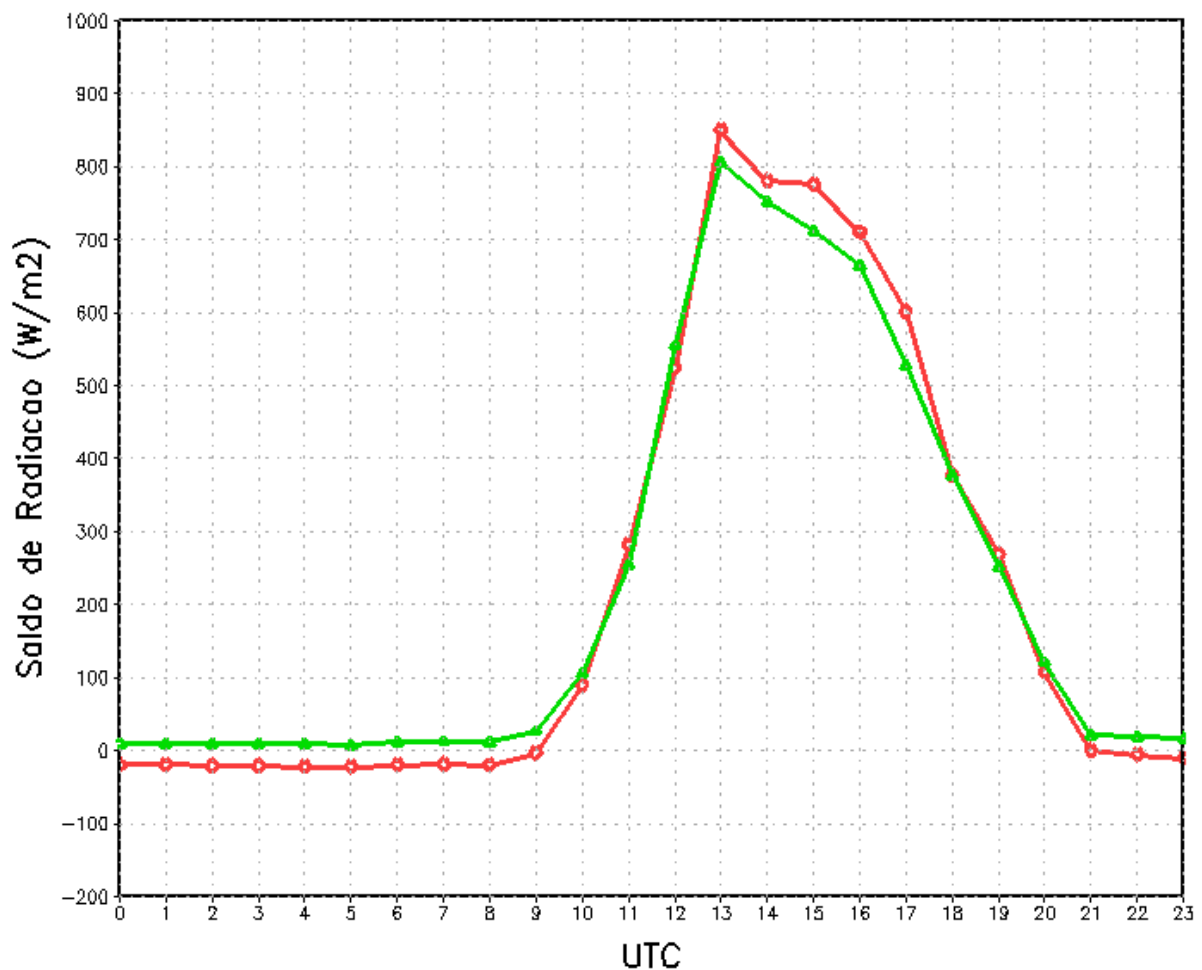


Figura 20 – Perfil médio diário do Saldo de Radiação da Superfície, sendo a linha vermelha a representação do experimento TEB e a linha verde do experimento STEB.

Forçamento radiativo define-se como o aumento efetivo da radiação que incide sobre a terra, produzida por perturbações do balanço energético entre o topo da troposfera (tropopausa) e a superfície terrestre, de maneira a atingir um novo equilíbrio térmico na superfície (FURTADO, 2012). Pode ser positiva, causando o aquecimento da troposfera e da

superfície da Terra, ou negativa, o que causa o resfriamento da troposfera e da superfície do globo terrestre.

A Figura 21 representa o forçamento da superfície, que é a soma do calor sensível com o calor latente nos experimentos TEB e STEB, em que é possível observar valores elevados de energia no período diurno. O STEB apresenta o valor máximo de  $700 \text{ Wm}^{-2}$  as 15 UTC (12 hl), chegando a ser superior ao pico do TEB, que é de  $650 \text{ Wm}^{-2}$  no mesmo horário. Isso se deve ao resultado do fluxo de calor latente no STEB ter dado bastante elevado, conforme se pode observar na Figura 15.

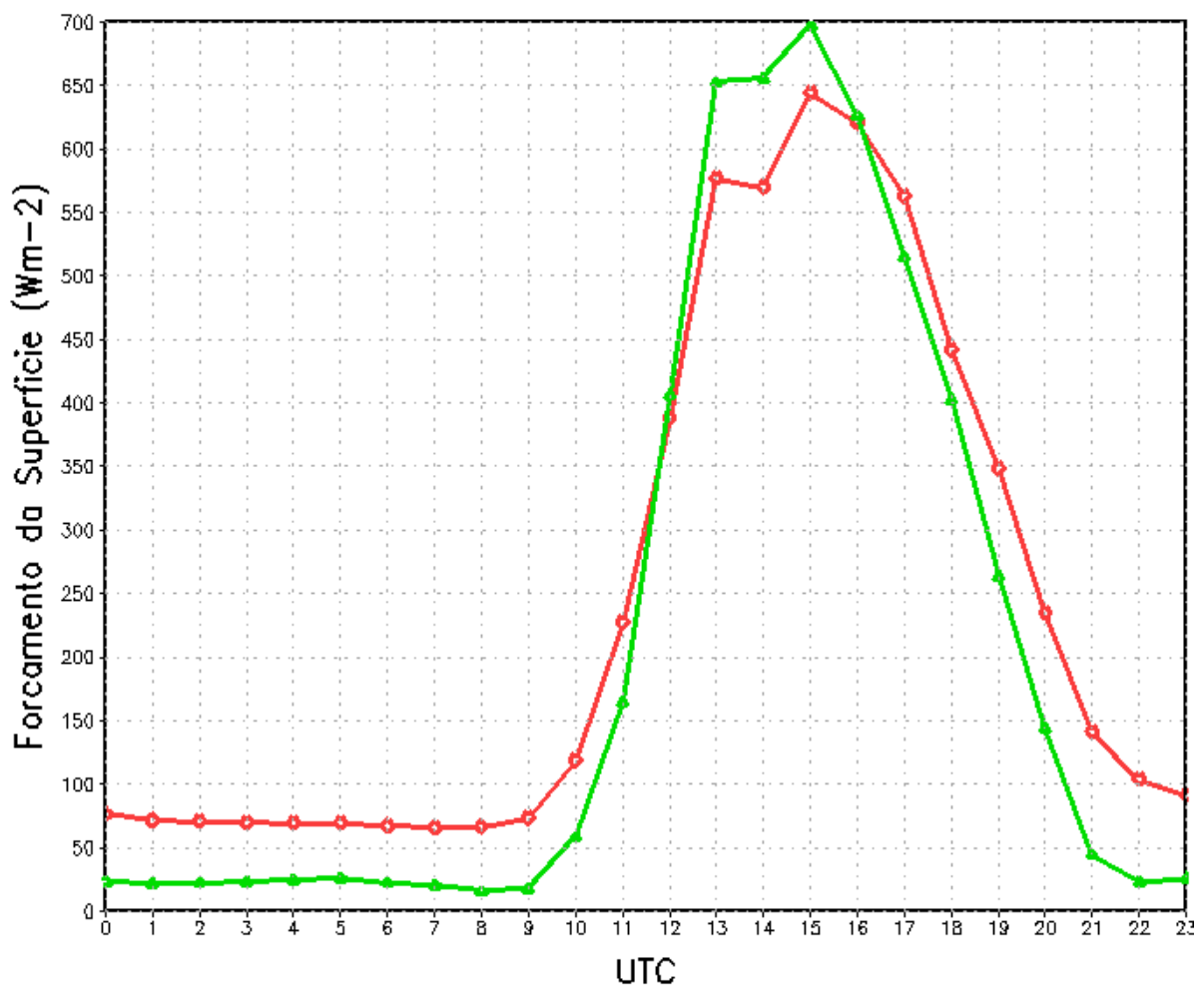


Figura 21 – Representa o forçamento da superfície, sendo a soma do calor sensível com o calor latente, nos experimentos TEB (linha vermelha) e STEB (linha verde).

A Figura 22 mostra o grau de energia cinética turbulenta, que se refere à energia cinética associada às flutuações no campo de velocidade do vento, provocadas pela turbulência presente na atmosfera, representada pela equação  $e_k' = (u'^2 + v'^2 + w'^2)/2$ . Comparando-se com a Figura 11, referente à concentração de água líquida das nuvens, pode-

se ver que essa energia está relacionada à turbulência na altura da camada limite planetária e na região com nuvem.

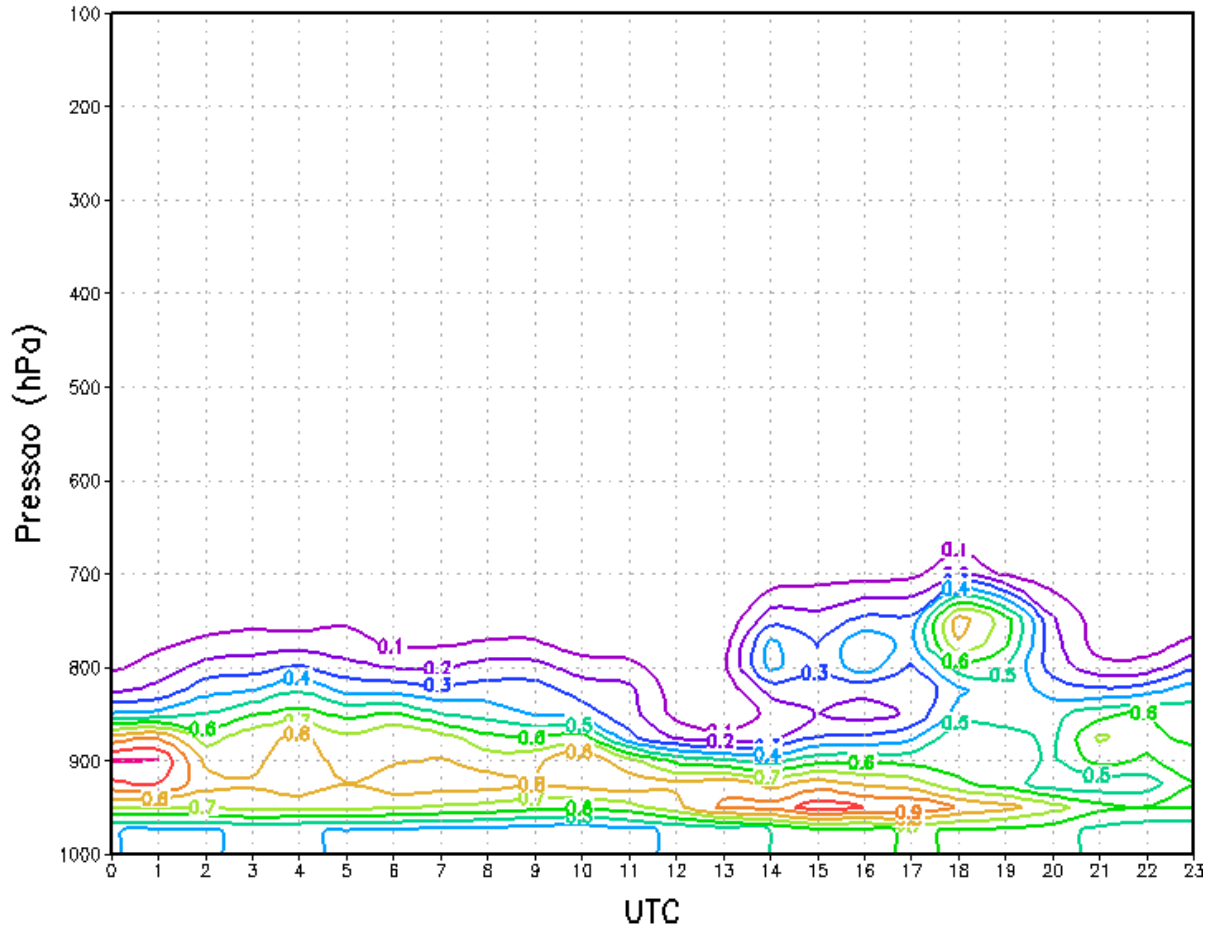


Figura 22 – Representa o perfil médio diário da energia cinética turbulenta no experimento TEB.

A diferença da energia cinética turbulenta entre os experimentos TEB e STEB, conforme apresentado na Figura 23, mostra maiores valores no experimento TEB durante o período da tarde, nos primeiros 100 hPa da atmosfera. Isso demonstra claramente o efeito de dinâmica urbana em produzir mais turbulência.

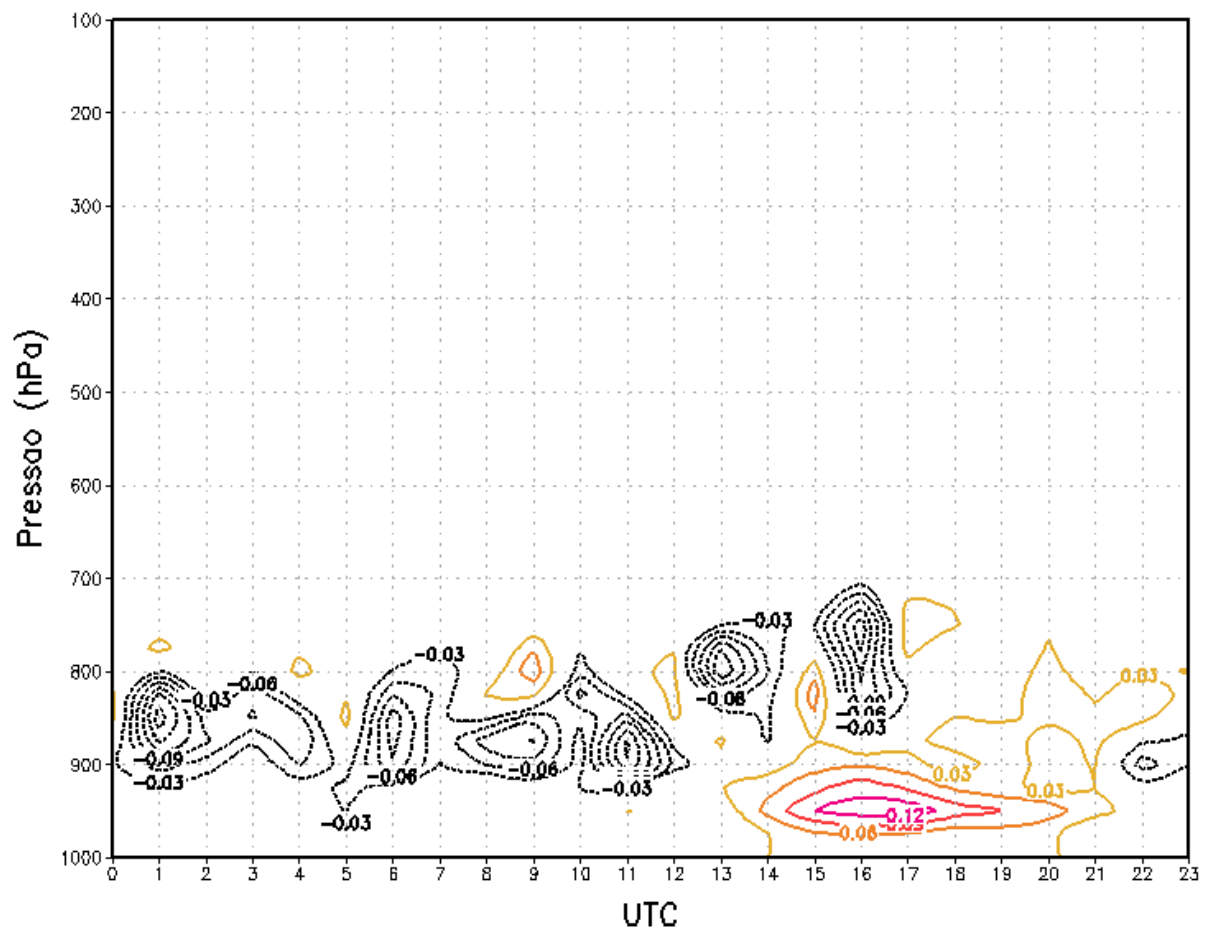


Figura 23 – Mostra o perfil diário médio da diferença de energia cinética turbulenta entre os experimentos TEB e STEB.

#### 4.4 ANÁLISE ESPACIAL PARA ALGUNS HORÁRIOS

O ciclo diário médio fornece uma visão de como certas variáveis se evoluem ao longo do dia. Entretanto, é necessário ter uma visão espacial de como o efeito da dinâmica urbana afeta a própria cidade e também sua vizinhança. Desta forma, serão apresentadas a visão espacial de certas variáveis para os horários do meio-dia local (15 UTC) e da meia-noite local (3 UTC), pois por volta das 15 UTC ocorrem os picos dessas variáveis. Porém, o ciclo diário médio mostrou que o impacto da cidade de Campina Grande não é suficiente para se estender até as 6 hl, horário por volta em que acontece o mínimo, e sim o ciclo diário médio apresenta impacto até por volta da meia-noite local. Motivo este que levou a utilizar esse horário nas análises espaciais. A Figura 24 mostra o vento médio, próximo à superfície, em uma região que apresenta a zona urbana de Campina Grande no centro. Pode-se ver, claramente, que o vento predominante é proveniente do quadrante entre sudeste e leste.

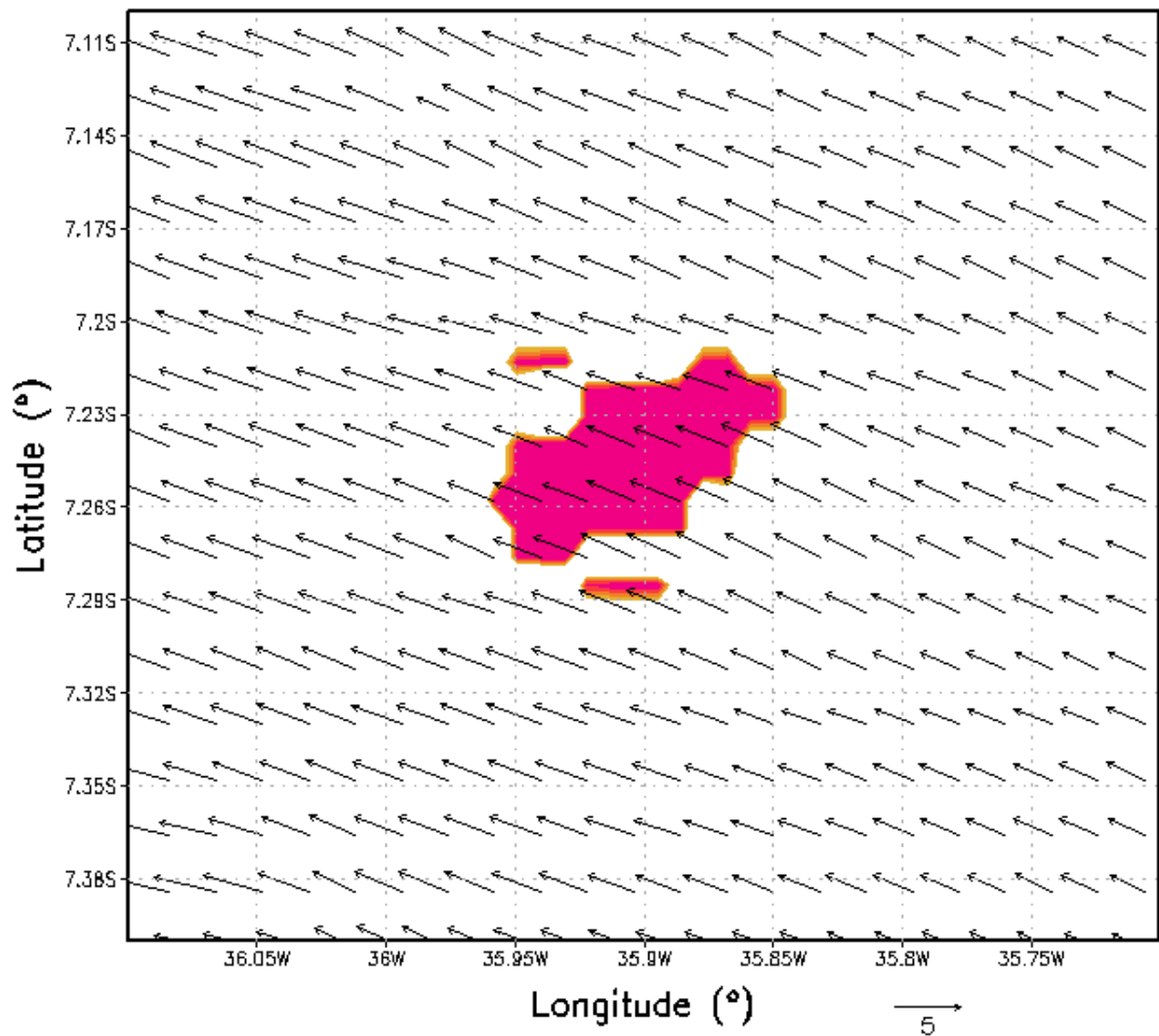


Figura 24 – Representa o vento médio, próximo à superfície, em uma região que apresenta a zona urbana de Campina Grande no centro.

A diferença de temperatura entre os experimentos TEB e STEB para as 15 UTC (12 hl) do dia 04 de outubro de 2014 é mostrada na Figura 25a. Pode-se ver que toda a superfície urbana se encontra até  $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  mais quente, no experimento TEB, em concordância com a Figura 09. É importante observar que há um apreciável impacto nas vizinhanças. Neste caso o efeito da cidade ocasiona diferenças negativas ao norte, oeste e sudoeste de Campina Grande. Contudo, não se pode atribuir o efeito apenas à presença de Campina Grande, uma vez que efeitos causados por Recife e João Pessoa podem estar também contribuindo.

Para as 3 UTC (0 hl) do dia 05 de outubro de 2014, a Figura 25b mostra que a diferença de temperatura é pequena, sendo de  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  maior para o TEB na parte nordeste da cidade, e  $-0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  na parte sudoeste. De acordo com a Figura 09, a diferença média entre os

dois experimentos é pequena. Sobre a vizinhança o efeito é menor para o experimento STEB a sudeste da cidade.

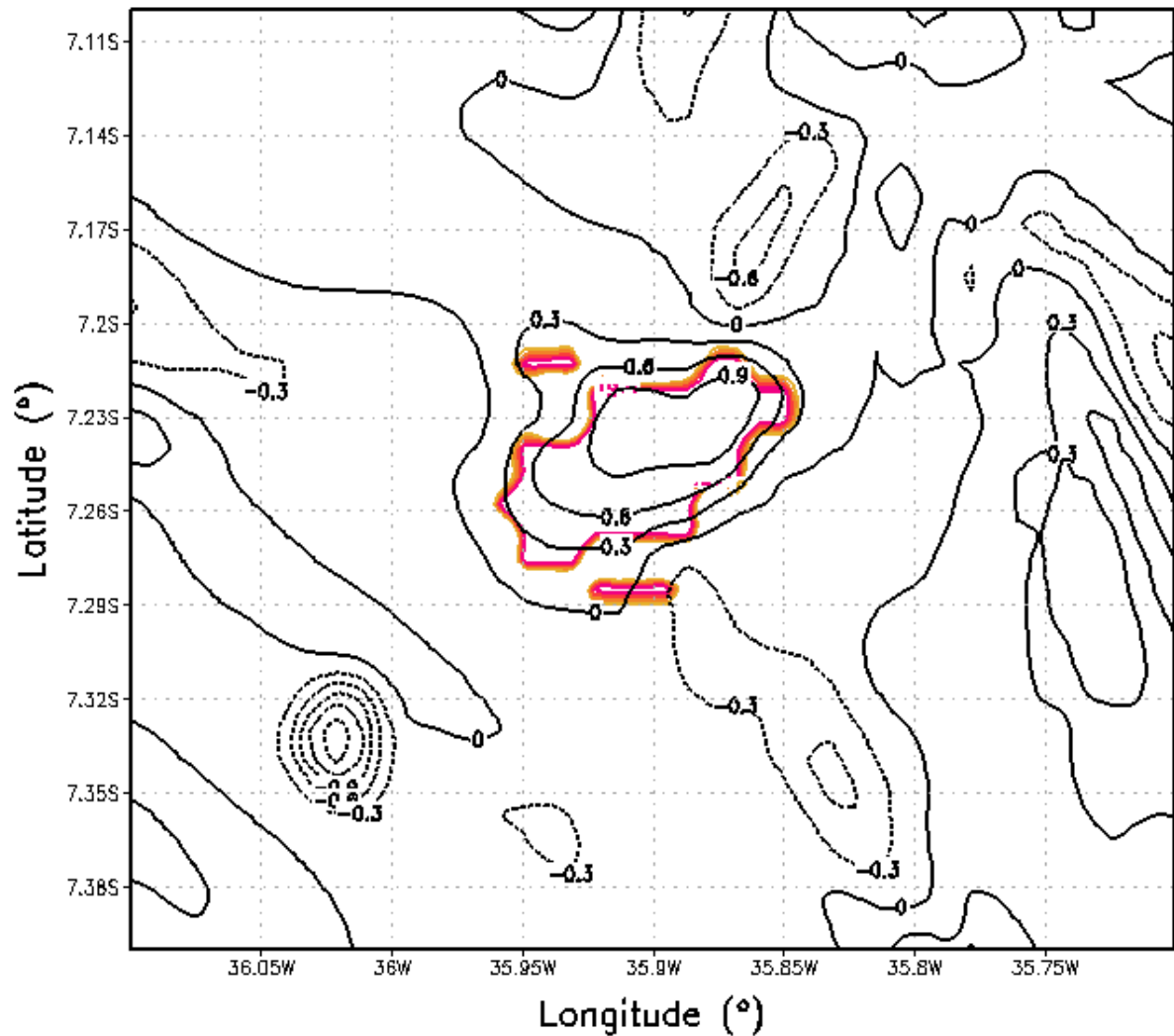


Figura 25a – Mostra a diferença de temperatura entre os experimentos TEB e STEB para às 15 UTC (12 hl) do dia 04 de outubro de 2014.



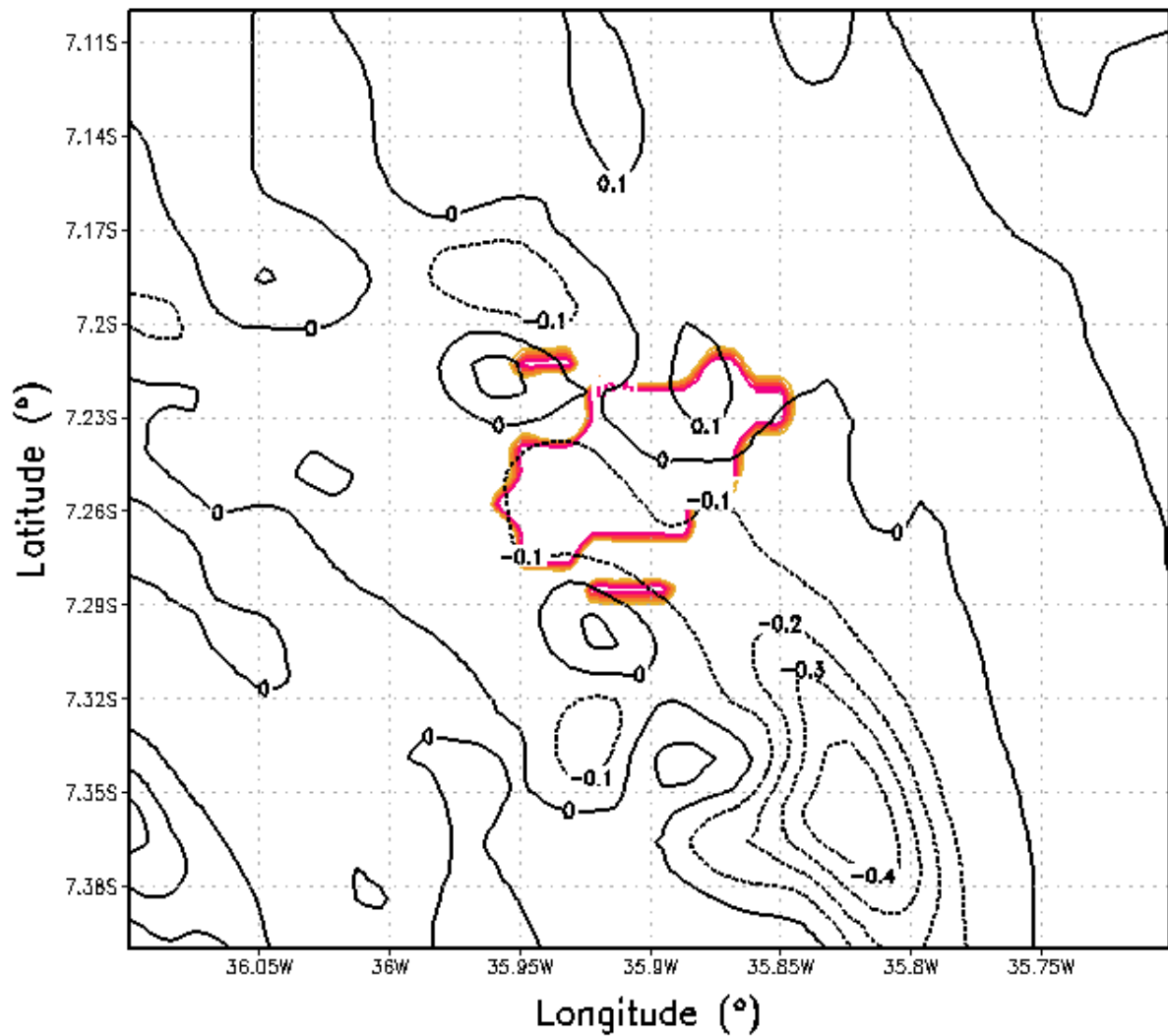


Figura 25b – Mostra a diferença de temperatura entre os experimentos TEB e STEB para às 3 UTC (0 hl) do dia 05 de outubro de 2014.

A diferença de radiação de onda longa emitida, para as 15 UTC (12 hl) é mostrada na Figura 26a. Os valores são superiores sobre a cidade no experimento TEB. Esse efeito está em concordância com a Figura 18, em que apresenta o ciclo médio diário do fluxo da ROL ascendente. Não há um efeito apreciável na vizinhança. A Figura 26b mostra que, por volta da meia-noite local, o experimento STEB emite mais radiação de onda longa do que o experimento TEB, o que também está de acordo com a Figura 18.

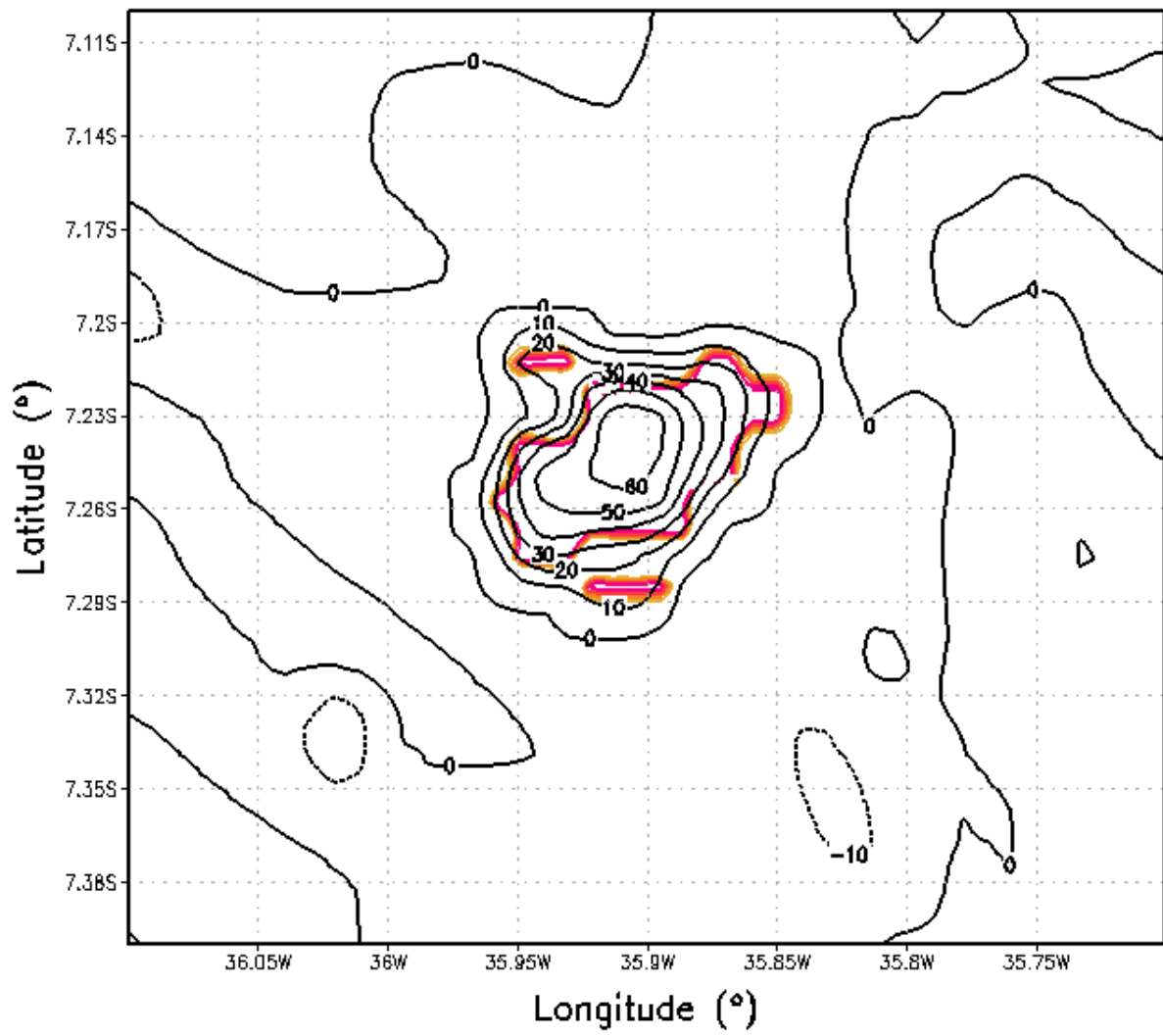


Figura 26a – Mostra a diferença de radiação de onda longa emitida nas simulações para às 15 UTC (12 hl).

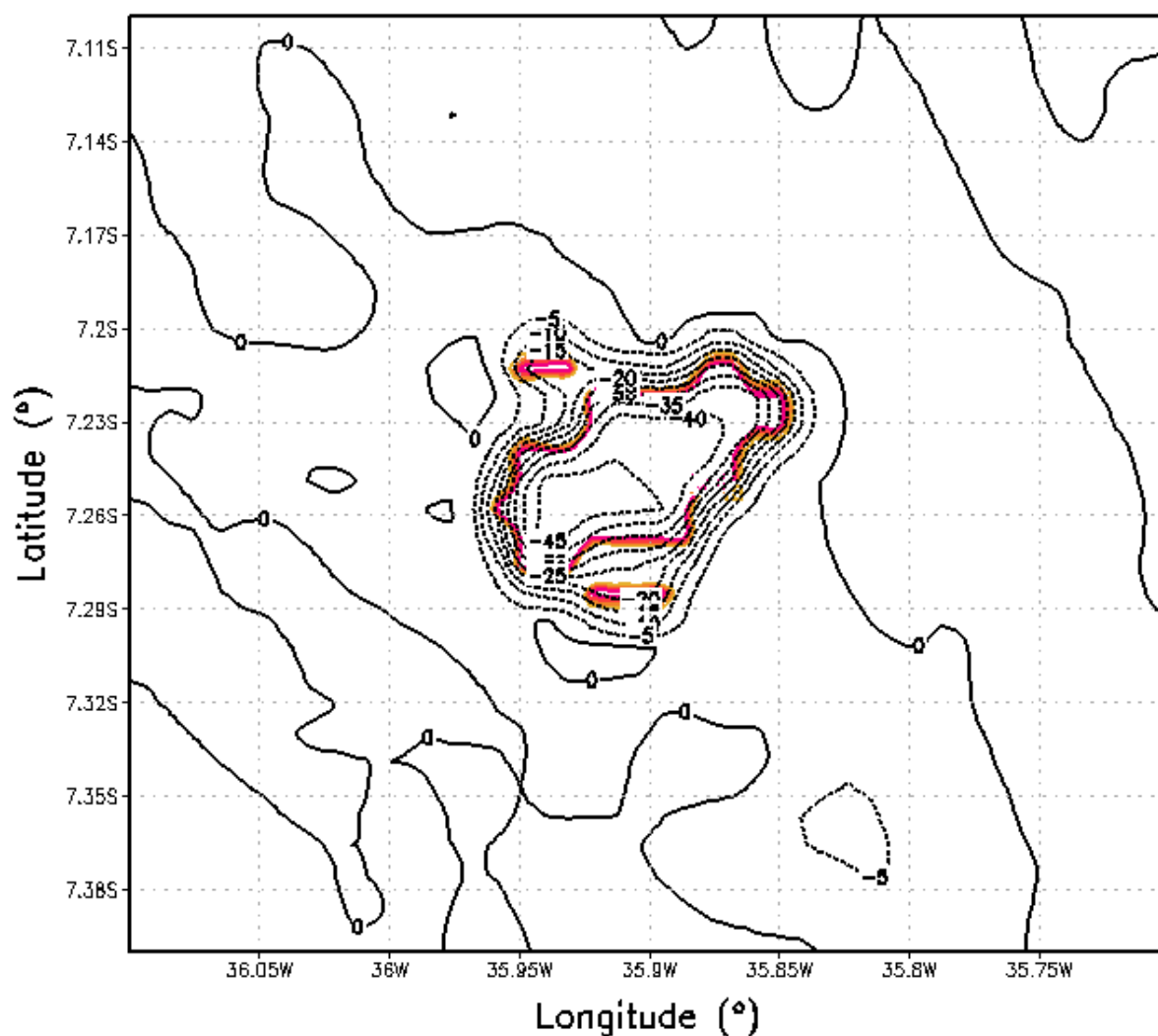


Figura 26b – Mostra a diferença de radiação de onda longa emitida nas simulações para meia-noite local (3 UTC).

A diferença do fluxo de calor sensível para as 15 UTC (12 hl) é mostrada na Figura 27a. Pode-se ver um predomínio de valores de calor sensível no experimento TEB sobre a área urbana. Maiores valores são encontrados no setor nordeste da cidade. Sobre a vizinhança, pode ser observada uma área de maior fluxo de calor sensível a sudoeste de Campina Grande. À noite (00 hl) os valores do experimento TEB continuam sendo superiores na região urbana (Figura 27b). Esse resultado está de acordo com a Figura 14, que mostra maior fluxo de calor sensível ao longo de todo o ciclo diário no experimento TEB. Esse é um efeito que pode ser atribuído à presença da cidade, que tende a ter um forçamento térmico superior, em relação à uma superfície não urbanizada.

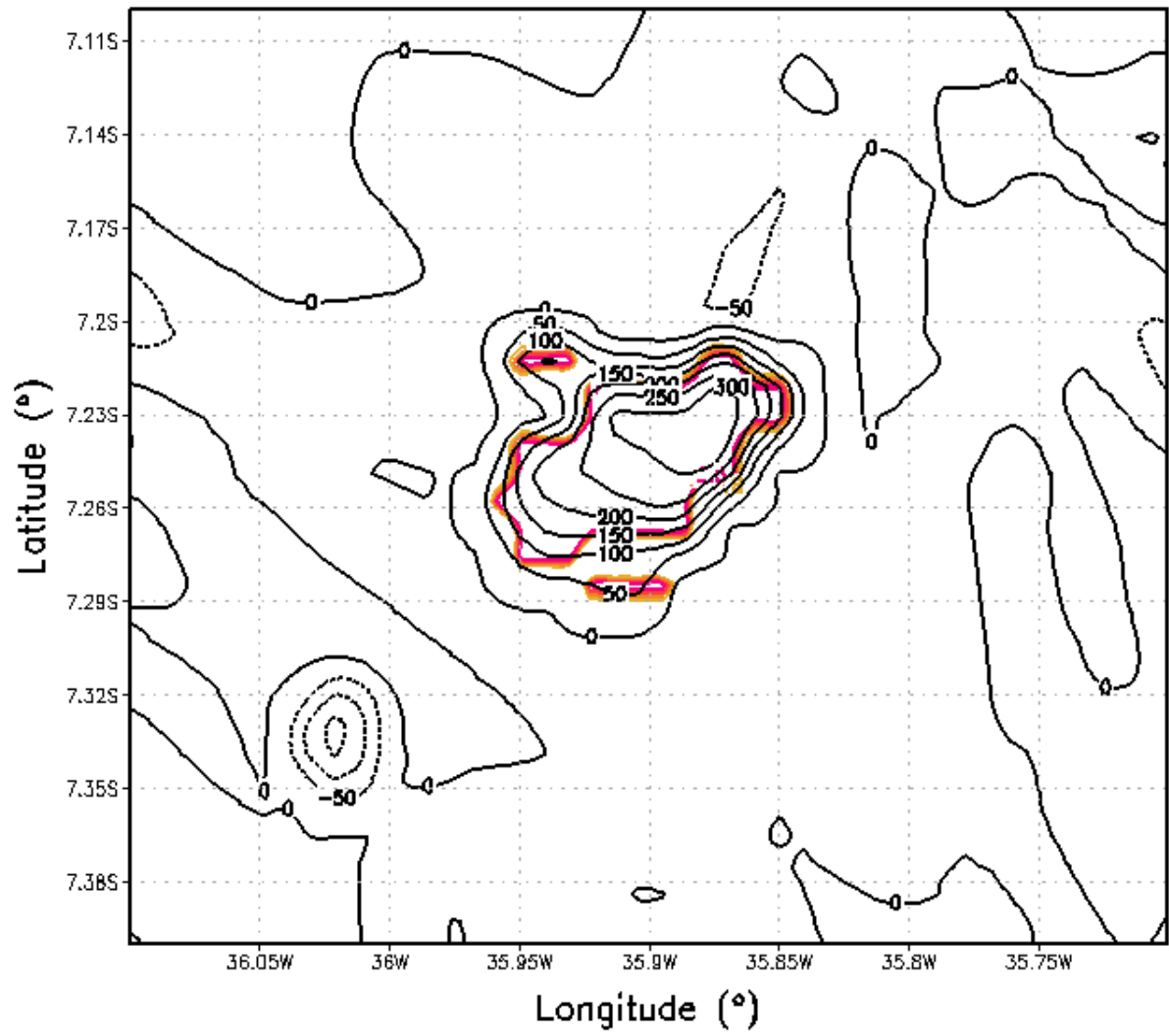


Figura 27a – Mostra a diferença do fluxo de calor sensível entre os experimentos TEB e STEB para às 15 UTC (12 hl).

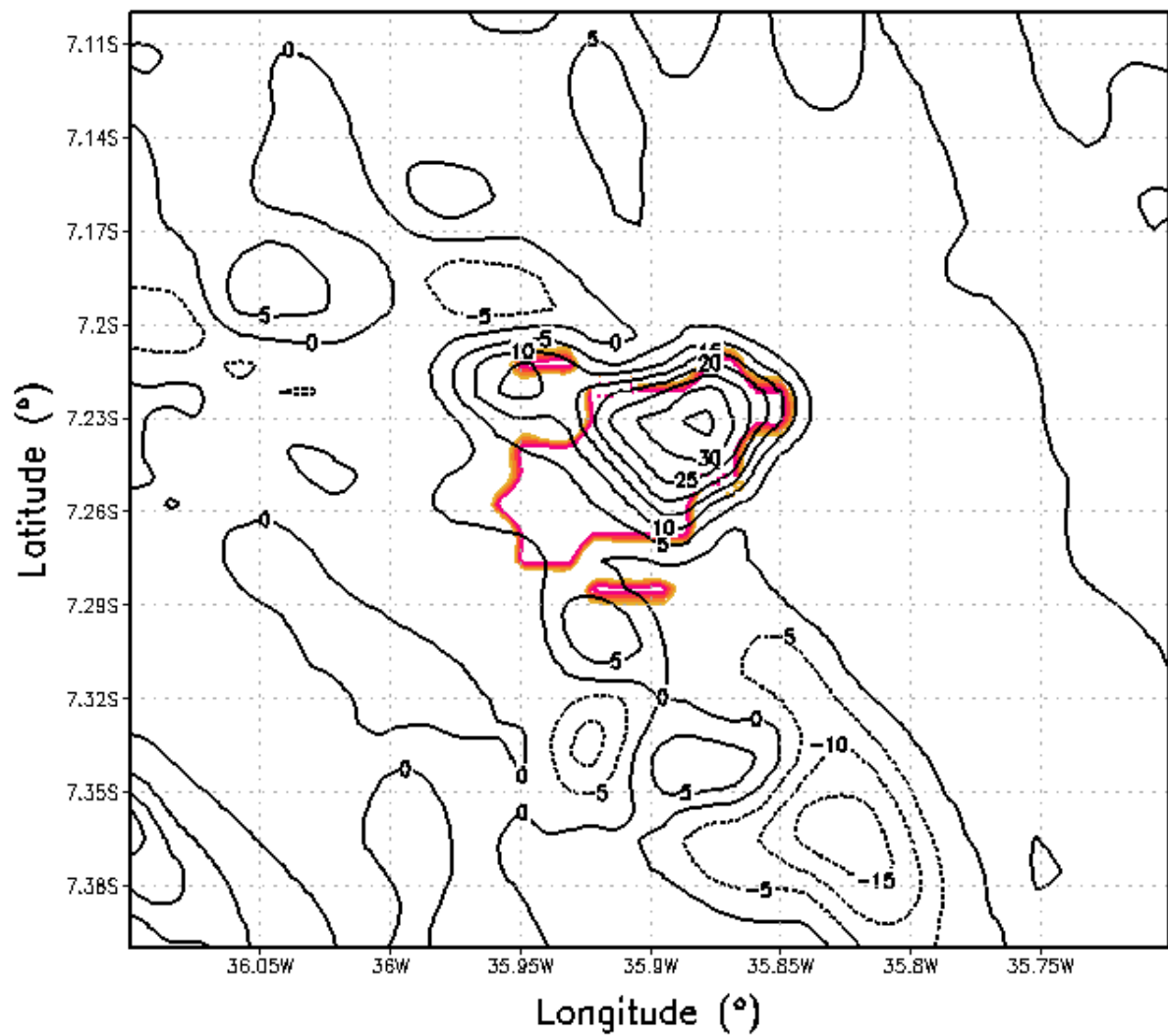


Figura 27b – Mostra a diferença do fluxo de calor sensível entre os experimentos TEB e STEB no período noturno (00 hl).

A Figura 28a mostra a diferença do fluxo de calor latente para as 15 UTC (12 hl). Nesse horário, predominam valores superiores no experimento STEB, exceto em uma pequena área no extremo nordeste da cidade. Para as 3 UTC (00 hl), os valores de fluxo de calor latente são maiores no experimento TEB (Figura 28b). Estes resultados estão de acordo com a Figura 15.

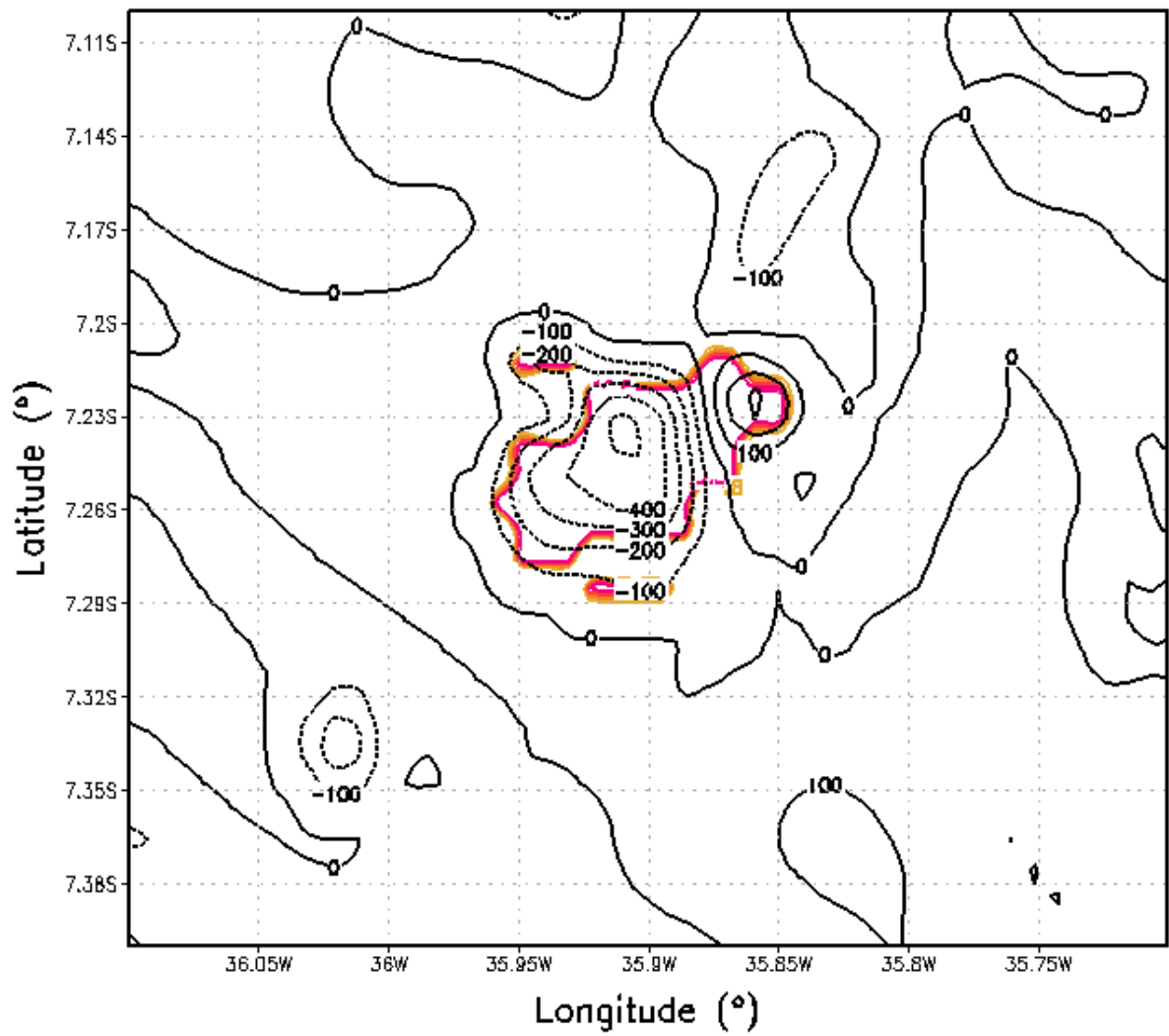


Figura 28a – Mostra a diferença do fluxo de calor latente para os dois experimentos às 15 UTC (12 hl).

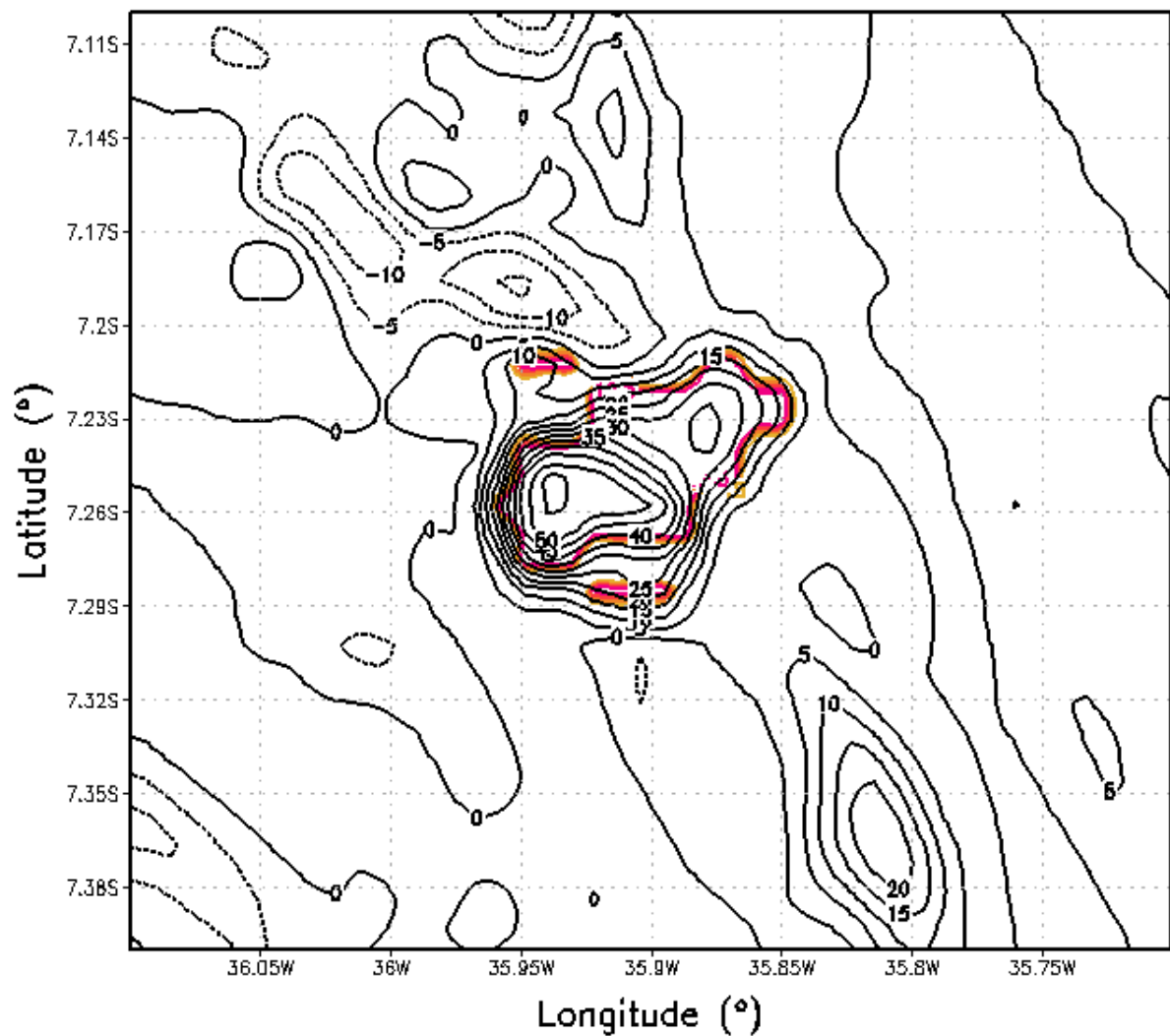


Figura 28b – Mostra a diferença do fluxo de calor latente para os dois experimentos às 3 UTC (00 hl).

A diferença de razão de mistura para as 15 UTC (12 hl) é mostrada na Figura 29a. Em toda a área urbana, o experimento TEB encontra-se mais seco do que o STEB. A diferença chega a ser de  $-1 \text{ gkg}^{-1}$  na parte noroeste da cidade. Há impacto apreciável ao norte da cidade. Para a meia-noite local (Figura 29b), o resultado mostra que o experimento TEB é mais úmido embora por valores que chegam a  $0,2 \text{ gkg}^{-1}$ . Esses resultados estão em concordância com a Figura 13.

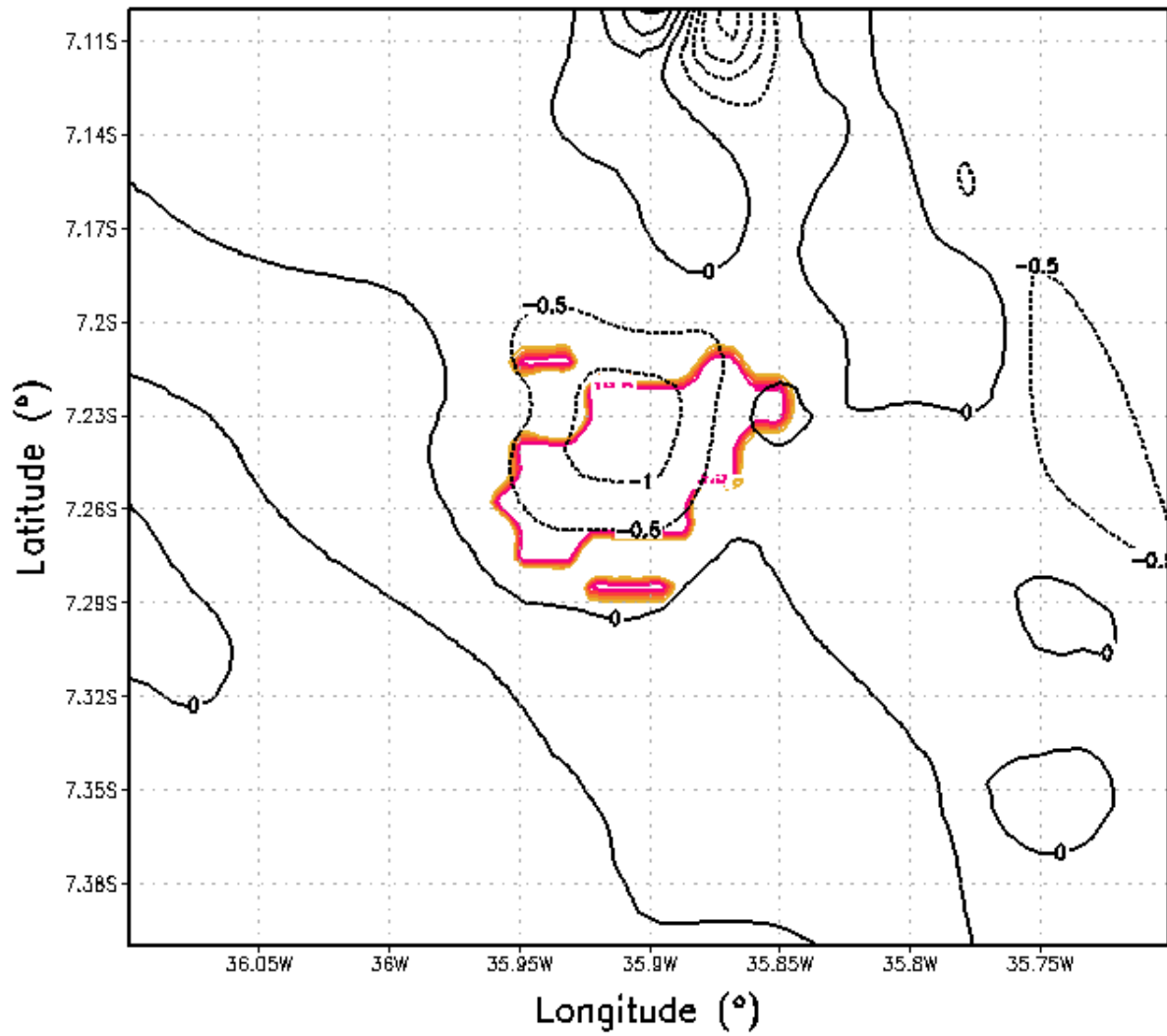


Figura 29a – Apresenta a diferença de razão de mistura para às 15 UTC (12 hl) nos experimentos TEB e STEB.



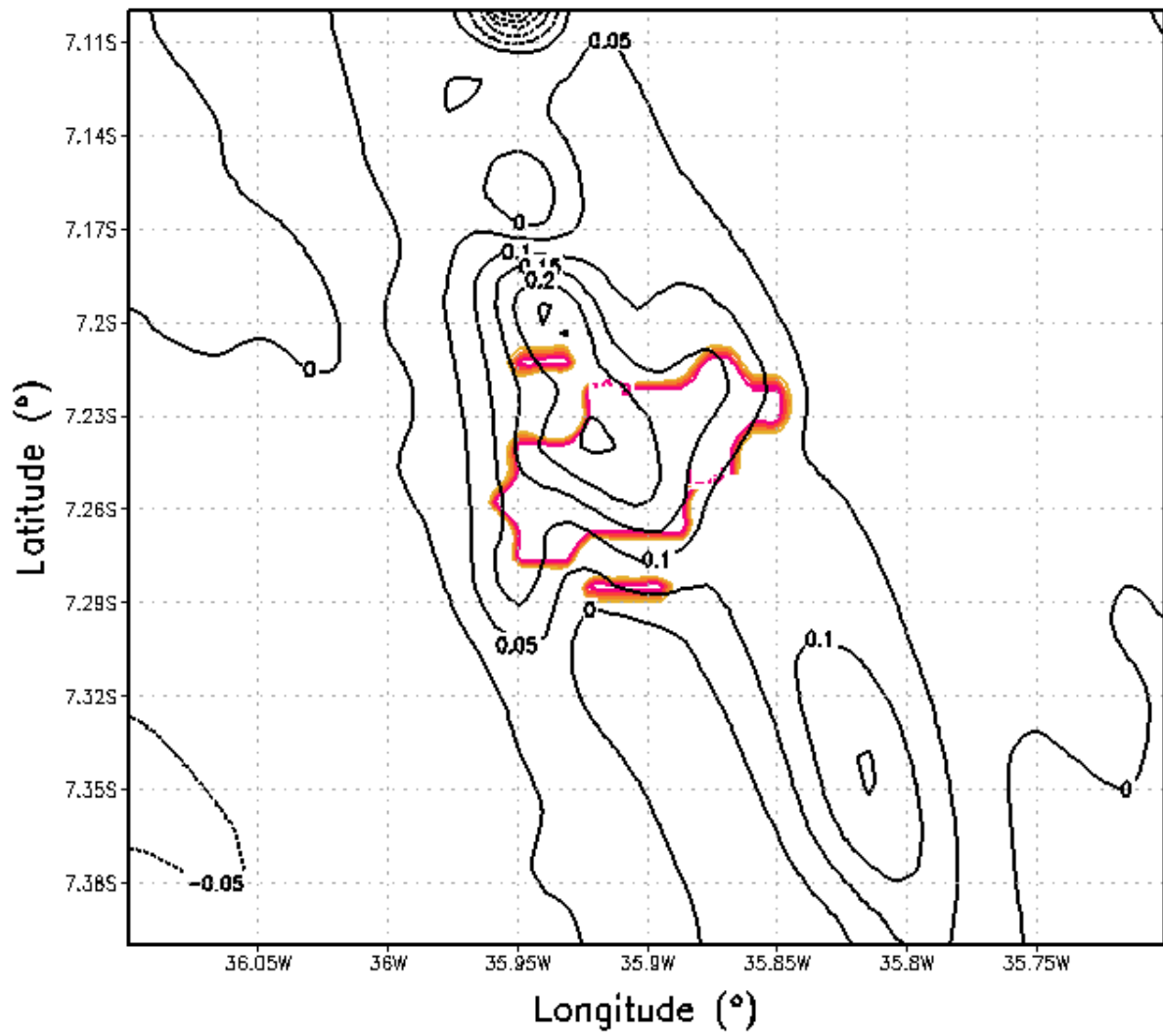


Figura 29b – Apresenta a diferença de razão de mistura para às 3 UTC (00 hl) nos experimentos TEB e STEB.

---

## 5 CONCLUSÃO

Para a realização deste trabalho foi feito um estudo comparativo entre os dados obtidos pela estação meteorológica automática do INMET e os dados gerados pelo modelo de simulação numérica de tempo e clima BRAMS através de informações de reanálises disponibilizados pelo ECMWF, com o intuito de simular as variáveis atmosféricas influenciadas pelo espaço urbano da cidade de Campina Grande para o período seco. A representação dos processos de superfície na área urbana se deu a partir do acoplamento do esquema TEB ao modelo BRAMS. Foram realizados dois experimentos comparativos com o TEB ativado e desativado para atestar a influência da cidade nas variáveis meteorológicas.

Foram realizados vários conjuntos de simulações visando um melhor ajuste das condições da cidade de Campina Grande, tendo sido encontrado como melhor resultado a localização da grade de menor resolução numa posição que abrangesse a costa e as cidades litorâneas próximas a Campina Grande, de forma que o efeito da advecção de massa advinda do oceano interferisse nas variáveis da cidade.

Os resultados obtidos sugerem que a influência da cidade de Campina Grande sobre o comportamento das variáveis atmosféricas apresenta o típico perfil da influência de regiões urbanizadas, as quais foram descritas por OKE (1978), ou seja, reemissão de radiação de onda longa pelos poluentes na atmosfera; menor perda da radiação de onda longa nas ruas devido à redução do Fator de Visão do Céu; maior absorção da radiação de ondas curtas devido à redução do albedo; alta estocagem de calor durante o dia devido às propriedades térmicas dos materiais urbanos e forte emissão de radiação durante a noite; adição de calor devido às atividades antropogênicas; diminuição do fluxo de calor latente e aumento do calor sensível.

Assim, através dos objetivos propostos por este estudo, observações efetuadas pela pesquisa, simulações numéricas realizadas e resultados obtidos é possível concluir que:

A cidade de Campina Grande é grande o suficiente para influenciar o próprio microclima.

O efeito da urbanização sobre a temperatura do ar se dá principalmente no período da tarde, e se estende até por volta da meia-noite.

O modelo consegue representar razoavelmente bem o ciclo do vento durante o dia. Mas é deficiente em representar o vento noturno.

O albedo da superfície é fortemente influenciado pela dinâmica da cidade. Sua redução causa um aumento do saldo de radiação, o que contribui para acumular mais energia

na cidade. Esse efeito está de acordo com o aumento de temperatura observado na maioria das cidades.

Na partição da energia, o fluxo de calor sensível aumenta e o de calor latente diminui devido ao efeito da cidade.

Observa-se impacto na temperatura, umidade e fluxos nos arredores da cidade. Entretanto, não é possível afirmar que o impacto é totalmente devido à cidade de Campina Grande, já que o vento pode estar advectando propriedades das regiões metropolitanas do Recife e de João Pessoa.

Para trabalhos futuros, sugere-se fazer estudos para outros períodos com forçamento atmosférico distinto. É interessante também avaliar o papel das superfícies urbanas de Recife e João Pessoa sobre o clima da região.

---

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, T. L. *Estudo numérico da interação entre uma região urbanizada e a convecção rasa*. 2010. 129 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2010.

ARNFIELD, A. J. Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water and the urban heat island. *International Journal Climatology*, vol. 23, p.1–26, 2003.

BADIRU, A. I. Z. *Análise de variáveis meteorológicas influenciadas pelo espaço urbano de João Pessoa – PB*. 2014. 53 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2014.

BARBIRATO, G. M.; BARBOSA, R.V.R.; TORRES, S. C. *Articulação entre Clima Urbano e Planejamento das Cidades: Velho Consenso, Contínuo Desafio*. International Conference Virtual City and Territory. 8º Congresso Internacional Ciudad y Territorio Virtual, Rio de Janeiro, Out. 2012. Rio de Janeiro: UFRJ, 2012.

BIAZETO, B. *Impacto da Precipitação no Ciclo de Assimilação em Modelos de Mesoescala*. 2007. Dissertação de Mestrado – Instituto Astronômico, Geofísico e de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

BARBOSA, R. V. R. *Áreas verdes e qualidade térmica em ambientes urbanos: Estudos em microclimas de Maceió (AL)*. 2005. 117 p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005.

BARBOSA, J. P. S. *Novas parametrizações de turbulência atmosférica para o modelo BRAMS*. Dissertação de Mestrado – INPE, São José dos Campos – SP, 129p, 2007.

CAVALCANTI, E. P. *Teor e transporte de vapor d'água na atmosfera do Nordeste do Brasil*. Tese de Doutorado – UFPB, Campina Grande – PB, 115 p, 2001.

CANTELLI, A.; MONTI, P.; LEUZZI, G. Numerical study of the urban geometrical representation impact in a surface energy budget model. *Environ Fluid Mech.* n. 15, p. 251-273, 2015.

CARVALHO, V. S. B. *O impacto das megacidades sobre a qualidade do ar: os casos das regiões metropolitanas de São Paulo e do Rio de Janeiro*. 2010. 234 p. Tese (Doutorado em Ciências Atmosféricas) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

CHEN, F.; COTTON, W. R. *A one-dimension simulation of the stratocumulus capped mixed layer*. *Boundary- Layer Meteorology*, vol. 25, p. 289-321, 1983.

---

CLARK, T. L.; FARLEY, R. D. Severe downslope windstorm calculations in two and three spatial dimensions using anelastic iterative grid nesting. *A possible mechanism for gustiness*. J. Atmos. Sci. 41, 329-350, 1984.

CORDÃO, M. J. de S. *Modelagem e otimização da disposição espacial de unidades de reservação em redes de distribuição de água utilizando geotecnologias*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2009. 115p.

COTTON, W. R.; PIELKE SR. R. A.; WALKO, R. L.; LISTON, G. E.; TREMBACK, C. J.; JIANG, H.; MCANELLY, R. L.; HARRINGTON, J. Y.; NICHOLLS, M. E.; CARRIO, G. G.; MCFADDEN, J. P. RAMS 2001: Current status and future directions. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 82, 5-29, 2003.

CUNHA, J. B. L.; RUFINO, I. A. A.; IDEIÃO, S. M. A. Determinação da temperatura de superfície na cidade de Campina Grande-PB a partir de imagens do satélite Landsat 5-TM. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), Natal, 2009. Anais ... São José dos Campos: INPE, 2009. p. 5717-5724. ISBN 978-85-17-00044-7. Disponível em: <<http://mar.te.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr/4080/2008/11.17.22.51/doc/5717-5724.pdf>>. Acessado em: 18 de nov. 2015.

DEARDORFF, J. W. Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three dimensional model, *Boundary Layer Meteorology*, 18, 495-527, 1980.

FREITAS, E. D. *Circulações locais em São Paulo e sua influência sobre a dispersão de poluentes*. 2003. 156 p. Tese (Doutorado em Ciências Atmosféricas) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

FREITAS E. D. de; DIAS P. L. da S. Alguns efeitos de áreas urbanas na geração de uma ilha de calor. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 20, n. 3, p. 355-366, 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, n. 1, p. 43-65, 2007.

FURTADO, M. T. Modelo adiabático da atmosfera terrestre compatível com o aquecimento global e o efeito estufa. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 34, n. 3. São Paulo, 2012.

GOUVÊA, M. L. *Cenários de impacto das propriedades da superfície sobre o conforto térmico humano na cidade de São Paulo*. 2007. 87 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

GRIMMOND, C. S. B. Progress in measuring and observing the urban atmosphere. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 84, n.1, p. 3-22, 2006.

GUERRERO V. V. U. *Características das circulações locais em regiões metropolitanas do Chile Central*. 2010. 113 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

---

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2010. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?uf=25&dados=21>>. Acessado em: 04 de mai. 2015.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2014. Disponível em:<<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=250400&search=linfogr%E1ficos:-informa%E7%F5es-completas>>. Acessado em: 22 de jan. 2016.

JURAS, I. da A. G.M. Mudança do clima: Principais conclusões do 5º Relatório do IPCC. *Consultoria Legislativa da Câmara dos Deputados*, Brasília, nov. 2013. Disponível em: <[http://www2.camara.leg.br/documentos-e-pesquisa/publicacoes/estnottec/areas-da-conle/tema14/2013\\_24881.pdf](http://www2.camara.leg.br/documentos-e-pesquisa/publicacoes/estnottec/areas-da-conle/tema14/2013_24881.pdf)>. Acessado em: 01 de mai. 2015.

KANDA, M. Progress in the scale modeling of urban climate: Review. *Theoretical Applied Climatology*, vol. 84, p. 23–33, 2006.

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

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. *Klimate der Erde*. Gotha: Verlag Justus Perthes. *Wall-map* 150cmx200cm. 1928.

LIMA, Y. S. *A Política Habitacional em Campina Grande – PB (1988-2009)*. 2010. 113 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal da Paraíba (PPGG/UFPB). João Pessoa, 2010.

LIMA, V. L. A. de; SOUZA, V. C. de; SOUZA, G. M. M. N. e; SOUZA, V. G. de; SILVA, S. S. F. da. Avaliação preliminar de impactos ambientais no entorno do Louzeiro e Riacho das Piabas - Campina Grande - PB. *Qualitas Revista Eletrônica*. ISSN 1677-4280. vol. 7, n.1, 2008.

LOMBARDO, M. A. Análise das mudanças climáticas nas metrópoles: o exemplo de São Paulo e Lisboa. In: CORTEZ, A. T. C.; ORTIGOZA, S. A. G., Orgs. *Da produção ao consumo: impactos socioambientais no espaço urbano* [online]. São Paulo: Editora UNESP; São Paulo: Cultura Acadêmica, 2009. 146 p. ISBN 978-85-7983-007-5. Disponível em SciELO Books <<http://books.scielo.org/id/n9brm/06>>. Acessado em: 21 de abr. 2015.

LOMBARDO, M. A. O uso de geotecnologias na análise das mudanças climáticas na metrópole de São Paulo. *Revista Geográfica de América Central*, Costa Rica, Número Especial EGAL, p. 1-19, II semestre 2011.

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, p. 1151-1162. 1977.

MAIA, D. S. *Estrutura e Dinâmica Urbana da Cidade Média: a cidade de Campina Grande na Paraíba*. Projeto de pesquisa apresentado ao CNPq, 2006.

MASSON, V. A Physically-based Scheme for the Urban Energy Budget in Atmospheric Models. *Boundary-Layer Meteorology*. v. 94, n. 3, p. 357-397, 2000.

---

MASSON, V.; GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T. R. Evaluation of the Town Energy Budget (TEB) Scheme with direct measurements from dry districts in two cities. *J. Appl. Meteorol.*, v. 41, n. 10, p. 1011-1026, 2002.

MASSON V.; MARCHADIER C.; ADOLPHE L.; AGUEJDAD R.; et al. Adapting cities to climate change: A systemic modelling approach. *Urban Climate*, v. 10, n. 2, p. 407-429, dez. 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212095514000212>>. Acessado em: 06 de mai. 2015.

MELLOR, G.; YAMADA, T. *Desenvolvimento de um modelo de fechamento de turbulência para uso em problemas de física geofísica*. Reviews of Geophysics and Space Physics, vol. 20, p. 851-857, 1982.

MENUT, L. *Etude expérimentale et théorique de la couche limite Atmosphérique en agglomération Parisienne (Experimental and Theoretical Study of the ABL in Paris Area)*, Ph.D. Thesis, University Pierre et Marie Curie, Paris - France, 200 p., 1997.

MEYERS, M. P.; WALKO, R. L.; HARRINGTON, J. Y.; COTTON, W. R. New RAMS cloud microphysics parameterization Part II: the two-moment scheme. *Atmospheric Research*, v 45, p. 3-39, 1997.

OKE, T. R. The distinction between canopy and boundary layer urban heat islands. *Atmosphere*, vol. 14, p. 268-277, 1976.

OKE, T. R. *Boundary Layer Climates*. Offers a concise description of atmospheric layers sensitively pitched for the non-meteorological specialist in a variety of disciplines: in geography, agriculture, forestry, ecology, engineering, environment and planning. 372 p. Methuen, 1978.

OKE, T. R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observation. *Journal of Climatology*, vol. 1, p. 237-254, 1981.

OKE, T. R. *Boundary Layer Climates*. Second edition. *Routledge Kegan & Paul*, 435 p., 1988.

OKE, T. R. Surface climate processes. In: Bailey, W. G.; Oke, T. R.; Rouse, W. R. (eds), *Surface climates of Canada*, chapter 4, Montreal, McGill-Queen's University Press, 1997.

OKE, T. R. *Boundary Layer Climates*. New York: Routledge, 2005. 435p.

OLIVEIRA, S. S. Implementação de um esquema de convecção rasa baseado em fechamento de primeira ordem no Brams. Dissertação de Mestrado – UFCG/CTRN/UACA/PPGM, Campina Grande – PB, 78 p, 2009.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Relatório da ONU mostra população mundial cada vez mais urbanizada. 2014. Traduzido e editado por UNRIC (Centro Regional de Informação das Nações Unidas). Disponível em: <<http://www.unric.org/pt/actualidade/31537-relatorio-da-onu-mostra-populacao-mundial->

---

cada-vez-mais-urbanizada-mais-de-metade-vive-em-zonas-urbanizadas-ao-que-se-podem-juntar-25-mil-milhoes-em-2050>. Acessado em: 04 de mai. 2015.

PICCILLI, D.G.A. *Avaliação da previbilidade hidroclimática no Alto Paraguai*. Tese de Doutorado, UFRS, Porto Alegre – RS, Brasil, 201 p, 2007.

PIELKE, R. A.; COTTON, W. R.; WALKO, L. R.; TREMBACK, C. J.; LYONS, W. A.; GRASSO, L. D.; NICHOLLS, M. E.; MORAN, M. D.; WESLEY, D. A.; LEE, T. J.; COPELAND, J. H. A comprehensive meteorological modeling system – RAMS. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 49, 69-91, 1992.

PIGEON, G.; ZIBOUCHE, K.; BUENO, B.; BRAS, J. Le; MASSON, V. *Improving the capabilities of the Town Energy Balance model with up-to-date building energy simulation algorithms: an application to a set of representative buildings in Paris*. *Energy and Buildings*, v. 76, p. 1–14, 2014.

ROGERS, R. R; YAU, M. K. *A short course in cloud physics*. International series in natural philosophy, v. 113, 1988.

ROTH, M. Review of urban climate research in (sub)tropical regions. *International Journal of Climatology*, v. 27, p. 1859–1873, ago. 2007. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.1591/epdf>>. Acessado em: 21 de abr. 2015.

SÁ, M. B. A paisagem recriada: um olhar sobre a cidade de Campina Grande. In: GURJÃO, E. Q.; SILVA, J. G. A.; AMORIM, L. et al (Orgs.). *Imagens Multifacetadas de Campina Grande*. p. 179-189. Campina Grande/PB: Copyright, 2000.

SEAMAN, N. L.; LUDWIG, F. F.; DONALL, E. G.; et al. *Numerical Studies of Urban Planetary Boundary-Layer Structure under Realistic Synoptic Conditions*, *J. Appl. Meteorology*, vol. 28, p. 760–781, 1989.

SILVA, I. A. da. *A política habitacional para as classes de baixa renda de Campina Grande - Paraíba*. 1986. Dissertação (Mestrado em Economia) – Universidade Federal da Paraíba, 1986.

SILVA, V. de P. R. da; AZEVEDO, P. V. de; BRITO, R. S.; CAMPOS, J. H. B. da C. Evaluating the urban climate of a typically tropical city of northeastern Brazil. *Environ Monit Assess.* n. 161, p. 45–59, 2010.

SMAGORINSKY, J. General circulation experiments with the primitive equations. Part I, the basic experiment. *Monthly Weather Review*, AMS, Boston, USA, v.91, p.99-164, 1963.

SQUIRES, P. *The microstructure and colloidal stability of warm clouds*. *Tellus* 10, 256 – 271, 1958.

SOUSA, F. de A. S. de; MORAIS, H. F. de; SILVA, V. de P. R. da. Influência da Urbanização no Clima da Cidade de Campina Grande-PB. *Revista Brasileira de Geografia Física*, p. 134-145, 2011.



SOUZA, D. O. de. *Influência da ilha de calor urbana nas cidades de Manaus e Belém sobre o microclima local*. 2012. 187 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2012.

SUN, Y.; AUGENBROE, G. Urban heat island effect on energy application studies of office buildings. *Energy and Buildings*. n. 77, p. 171–179, 2014.

TAHA, H. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*, vol. 25, p. 99-103, 1997.

TEICHRIEB, C. A. *Sensibilidade do Brams para descrição de chuva e temperatura, no Nordeste do Rio Grande do Sul, para diferentes resoluções espaciais*. Dissertação de Mestrado – UFSM/CCNE/PPGF, Santa Maria – RS, 79 p, 2008.

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.

TREMBACK, C. J.; TRIPOLI, G. J.; COTTON, W. R. 1985: A regional scale atmospheric numerical model including explicit moist physics and a hydrostatic time-split scheme. Preprints, 7th AMS Conference on numerical Weather Prediction, June 17-20. Montreal, Quebec, Canada, Amer. Meteor. Soc., Boston. 433-434.

TREMBACK, C. J.; WALKO, R. L. The Regional Atmospheric Modeling System (RAMS): development for parallel processing computer architectures. In: *Third RAMS Users' Workshop*. Echuca, Victoria, Australia, 1997.

TRIPOLI, G. J.; COTTON, W. R. 1982: The Colorado State University three-dimensional cloud mesoscale model, 1982: PartI: General theoretical framework and sensitivity experiments. *J. de Rech. Atmos.* 16, 185-220.

Uppala, S. M.; Simmons, A. J.; Berrisford, P.; Poli, P.; Kobayashi, S.; Andrae, U.; Balmaseda, M. A.; Balsamo, G.; Bauer, P.; Bechtold, P.; Beljaars, A. C. M.; Berg, L. van de; Bidlot, J.; Bormann, N.; Delsol, C.; Dragani, R.; Fuentes, M.; Geer, A. J.; Haimberger, L.; Healy, S. B.; Hersbach, H.; Hólm, E. V.; Isaksen, I.; Kållberg, P.; Köhler, M.; Matricardi, M.; McNally, A. P.; Monge-Sanz, B. M.; Morcrette, J.-J.; Park, B.-K.; Peubey, C.; Rosnay, P. de; Tavolato, C.; Thépaut, J.-N.; Vitart F. *The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system*. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* v. 137, p. 553–597, 2011.

VILHENA, J. E. de S. *Influências de friagens na estrutura vertical da atmosfera da região amazônica: um estudo numérico e observacional*. 2010. 96 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2010.

WALKO, R. L.; COTTON, W. R.; MEYERS, M. P.; HARRINGTON, J. Y. *New RAMS cloud microphysics parameterization. 1. The single-moment scheme*. *Atmospheric Research*, vol. 38 (14), p. 29-62, 1995.

WALKO, R. L.; BAND, L. E.; BARON, J.; KITTEL, T. G. F.; LAMMERS, R.; LEE, T. J.; OJIMA, D.; PIELKE, R. A.; TAYLOR, C.; TAGUE, C.; TREMBACK, C. J.; VIDALE, P. L. Coupled atmosphere-biophysics-hydrology models for environmental modeling. *J. Appl. Meteorol.*, v. 39, n. 6, p. 931-944, 2000.