



**UIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ – UFPA
MUSEU PARAENSE EMÍLIO GOELDI – MPEG
EMBRAPA AMAZÔNIA ORIENTAL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – IG
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS – PPGCA**

JUAREZ VENTURA DE OLIVEIRA.

**CLIMA URBANO DE BELÉM, PARÁ: PERCEPÇÃO CLIMÁTICA,
CLIMATOLOGIA E MODELAGEM ATMOSFÉRICA**

Belém – Pará

01/2020

JUAREZ VENTURA DE OLIVEIRA

**CLIMA URBANO DE BELÉM, PARÁ: PERCEPÇÃO CLIMÁTICA,
CLIMATOLOGIA E MODELAGEM ATMOSFÉRICA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA) do Instituto de Geociência (IG) da Universidade Federal do Pará (UFPA) em parceria com Embrapa e Museu Paraense Emílio Goeldi, para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Clima e Dinâmica Socioambiental na Amazônia.

Linha de Pesquisa: Interação Clima, Sociedade e Ambiente.

Orientadora: Dra. Julia Clarinda Paiva Cohen

Coorientadora: Dra. Marcia Pimentel.

Belém-Pará

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

O48c Oliveira, Juarez Ventura de

Clima urbano de Belém, Pará: percepção climática, climatologia e modelagem atmosférica / Juarez Ventura de Oliveira. — 2020.

127 f: il. color.

Orientador(a): Prof.^a. Dra. Julia Clarinda Paiva Cohen.

Coorientação: Prof.^a. Dra. Márcia Aparecida Pimentel

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2020.

1. Clima urbano. 2. Mudança climática. 3. Percepção climática. 4. Modelagem atmosférica. 5. Belém. I. Título.

CDD 551.6098115

JUAREZ VENTURA DE OLIVEIRA

**CLIMA URBANO DE BELÉM, PARÁ: PERCEPÇÃO CLIMÁTICA,
CLIMATOLOGIA E MODELAGEM ATMOSFÉRICA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA) do Instituto de Geociência (IG) da Universidade Federal do Pará (UFPA) em parceria com Embrapa e Museu Paraense Emílio Goeldi, para obtenção do título de Doutor em Ciências.

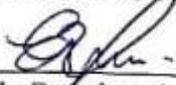
Área de Concentração: Clima e Dinâmica Socioambiental na Amazônia.
Linha de Pesquisa: Interação Clima, Sociedade e Ambiente.

Data de defesa: 29/01/2020/

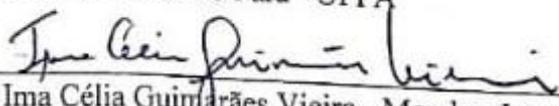
Banca Examinadora:



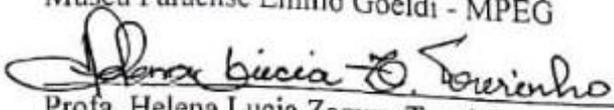
Prof. Julia Glarinda Paiva Cohen - Orientadora
Doutora Ciências Atmosféricas
Universidade Federal do Pará - UFPA



Prof. Everaldo Barreiros de Souza – Membro Interno
Doutor em Meteorologia
Universidade Federal do Pará - UFPA



Prof. Ima Célia Guimarães Vieira - Membro Interno
Doutora em Ecologia
Museu Paraense Emilio Goeldi - MPEG



Prof. Helena Lucia Zagury Tourinho – Membro Externo
Doutora em Desenvolvimento Urbano
Universidade da Amazônia - UNAMA



Prof. Maria Assunção Faus da Silva Dias - Membro Externo
Doutora em Ciências Atmosféricas
Universidade de São Paulo - USP

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não teria sido feito sem a ajuda de diversas pessoas que passaram pela minha vida e estiveram comigo ao longo de todos estes anos.

Em primeiro lugar, agradeço a minha família por tudo que me proporcionaram, todas as brigas, conselhos e suporte;

À minha orientadora, Dr^a Julia Cohen. Esses 3 anos e meio sob a sua tutela foram excelentes e seu incentivo foi primordial para a conclusão desta tese;

À minha coorientadora, Dr^a Marcia Pimentel, que me ajudou imensamente a abrir os olhos para as questões de percepção climática;

A todos os membros das bancas de qualificação e de defesa: Dr. Everaldo Souza, Dr^a Aurora Mota, Dr^a Helena Tourinho, Dr^a Ima Vieira, Dr^a Maria Assunção Silva Dias. Cada comentário, crítica e elogios foram essenciais ao longo deste processo. Ao Dr. Marco Antônio (UNAMA/IBGE), que também contribuiu significativamente para este trabalho;

Aos meus amigos, colegas, chegados e tantos outros que, entre um copo e outro de cerveja, me ouviram e me inspiraram a continuar a viver;

A todos do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA) do Instituto de Geociências (IG) da Universidade Federal do Pará (UFPA), Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG) e Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias (EMBRAPA) – Amazônia Oriental e a bibliotecária Lucia Imbiriba (IG) pelo auxílio com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT);

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de doutorado sanduiche (processo: 88881.186837/2018-01) e a todos no *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) nos Estados Unidos da América, em especial ao Dr. Michael Barlage, essa tese poderia ser bem diferente se não fosse pela sua ajuda;

A todos as pessoas que conheci no durante o meu período nos Estados Unidos, especialmente a Dr^a Lígia Bernardet que abriu sua casa para mim nessa viagem, além de me auxiliar em diversas outras coisas, sempre serei grato;

A todos os Institutos que coletaram e disponibilizaram os dados utilizados neste trabalho: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Instituto Nacional de Pesquisas Especiais (INPE, pelos dados do Projeto Chuva) e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET);

Por último, a todos aqueles que desenvolveram os programas utilizados nesta tese, a minha vida foi muito mais simples graças a vocês.

“Ser ruim em alguma coisa é o primeiro
passo para ser tornar bom em alguma coisa”
Jake, o Cão (Hora de Aventura).

RESUMO

O objetivo desta tese é investigar a influência da urbanização de Belém no clima local e como parte de sua população percebe as mudanças climáticas. O clima de Belém e a interação entre urbanização e atmosfera foram investigados a partir de dados de estações meteorológicas e simulação numérica usando três cenários de cobertura do solo (urbanização em 2017, em 1986 e com a área urbana substituída por floresta) da Região Metropolitana de Belém (RMB, considerada Belém, Ananindeua e Marituba) utilizando o modelo numérico *Weather Research and Forecast* (WRF). A percepção foi analisada com base em questionários aplicados em quatro locais com características sociais e ambientais diferentes. Os locais foram definidos com base no Mapa de Tipologias Sócio – Ambientais desenvolvido utilizando dados do Censo de 2010 e imagem de satélite. Dos quatro locais, dois representam regiões bem vegetadas, verticalizadas, com população de média/alta renda e baixa densidade demográfica (representados pela tipologia Tipo III) e dois representam regiões com vegetação esparsa, pouca verticalização, população de baixa renda e alta densidade demográfica (Tipo I). Os resultados mostraram que, independente da tipologia, os participantes do questionário perceberam mudanças no clima de Belém. Para eles, devido ao crescimento da urbanização local, Belém está mais quente e com maior variabilidade na precipitação. A estação meteorológica de Belém corroborou esta percepção, porém estações em municípios próximos também apresentaram aquecimento nos últimos anos, inviabilizando a atribuição desta alteração a urbanização. No entanto, em oposição ao observado nas outras estações, há um maior acúmulo de precipitação em Belém e através dos resultados do WRF foi observado que as características atuais da RMB podem intensificar o desenvolvimento de sistemas convectivos locais, causando tempestades mais fortes e, conseqüentemente, maior acúmulo de precipitação devido ao aumento do cisalhamento vertical do vento e a maior energia disponível para convecção. Apesar de perceberem estas mudanças e de sofrerem impactos devido a elas (diferentes para cada tipologia, porém principalmente questões de saúde e financeira), a falta de conhecimento, tempo e/ou dinheiro, a maioria dos participantes não sabe como adaptar a sua vida para este novo cenário climático, ou se adapta de forma ineficiente. Todavia, quando o assunto é Belém, os entrevistados conseguiram sugerir estratégias de adaptação que podem ter impacto significativo no clima local e até minimizar os efeitos da urbanização na atmosfera.

Palavras – chave: Clima urbano. Mudança climática. Percepção climática. Modelagem atmosférica. Belém.

ABSTRACT

The objective of this study is to investigate the influence of urbanization on Belém's climate and how part of its population perceives climate change. Belém's climate and the urban – atmospheric interaction were studied with meteorological station data and with simulations of three different soil cover scenarios (urbanization in 2017, 1986 and a scenario where all urbanization was replaced by forest) for the Belém's Metropolitan Region (considered as the main urban areas of Belém, Ananindeua and Marituba) using the Weather Research and Forecasting (WRF) model. The perception analysis was made via a questionnaire applied in four places with different socio and environmental characteristics. These places were selected from the Socio – Environmental Typology Map that was developed using 2010 Census data and satellite image. From the four sites, two of them represent well vegetated and verticalized region, with medium/high income population and low demographic density (typology Type III). The other two places represent areas with sparse vegetation, with low houses, low income population and high demographic density (Type I). The results showed that, regardless of the typology, the questionnaire participants noticed changes in the climate of Belém. According to them, due to the development of local urbanization, Belém is warmer and with higher precipitation variability. The Belém weather station corroborated this perception, but stations in nearby municipalities have also warmed in recent years, making it difficult to link this change with urbanization. However, there is a greater accumulation of precipitation in Belém, which was not observed on the other stations data, and from the WRF results it was observed that the current characteristics of the RMB (Belém Metropolitan Region) can intensify the development of local convective systems, causing stronger storms and consequently higher accumulation of precipitation due to increased vertical wind shear and available energy for convection. Although the participants have perceived these changes and have been impacted by them (different for each typology, but mainly health and financial issues), most of them do not know how to adapt their life to this new climate scenario or adapts inefficiently to it due to a lack of knowledge, time and/or financial resources. However, when it comes to Belém itself, the interviewees were able to suggest adaptation strategies that can have a significant impact on the local climate and even minimize the effects of urbanization on the atmosphere.

Key words: Urban climate. Climate change. Climate perception. Atmospheric modelling. Belém.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1.1- Estimativas globais de emissão de CO ₂ por ano..... | 21 |
| Figura 1.2- Esquematização da variação da temperatura do ar de acordo com diferentes coberturas do solo..... | 22 |
| Figura 1.3- Esquematização do efeito da urbanização no desenvolvimento de uma tempestade. A ilha de calor inicia uma circulação com forte movimento ascendente (convectivo) na área urbana, favorecendo o desenvolvimento de nuvem e precipitação. | 23 |
| Figura 1.4- Esquematização do processo de convecção e circulação de brisa..... | 25 |
| Figura 1.5- Esquematização do cisalhamento do vento (a) e da influência da convecção (b). 26 | |
| Figura 1.6- Esquematização da formação e escoamento da "piscina fria" e geração de nova célula de nuvem alimentando a tempestade antiga. | 27 |
| Figura 2.1- Área de estudo do Capítulo 2. O contorno em verde demarca a principal área urbana do município de Belém e em vermelho os bairros da PLP. O símbolo em vermelho e branco marca o local da estação do INMET. | 33 |
| Figura 2.2- Localização das estações do INMET utilizadas. | 34 |
| Figura 2.3- Distribuição espacial do índice de arborização (a), NDVI (b), renda (c), densidade (d) e verticalização (e)..... | 42 |
| Figura 2.4- Mapa de tipologias construído a partir do Índice J para a principal zona urbana do município de Belém. Tipo I (marrom): $0 < J \leq 0.29$; Tipo II (azul): $0.29 < J \leq 0.58$; Tipo III (verde): $0.58 < J \leq 0.87$. Os números marcam os locais onde os questionários foram aplicados: Jurunas (1), Guamá (2), Nazaré (3) e Umarizal (4)..... | 44 |
| Figura 2.5- Quantidade de respostas corretas (C, azul) e erradas (E, vermelho) nos bairros Tipo I (sólido) e Tipo III (pontilhado). | 46 |
| Figura 2.6: Número de entrevistados que observaram uma determinada mudança no clima em cada tipologia. Itens sem respostas foram omitidos desta figura. | 47 |
| Figura 2.7- Principais fontes de informação sobre o clima..... | 48 |
| Figura 2.8- Tendência de busca (em todo estado do Pará) pelos termos "clima" (azul) e "tempo" (laranja). | 50 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.9- Média anual de: a) temperatura máxima (TMAX, °C); b) temperatura mínima (TMIN, °C); c) temperatura média (TMED, °C); d) umidade específica (q); e) velocidade do vento (VV, m/s); e f) acumulado anual de precipitação (PRP, mm/ano). A linha solida representa o valor anual e a pontilhada a tendência para Belém (azul) e a média das outras estações (laranja). O sombreado cinza marca o intervalo entre o valor máximo e mínimo observado em todas as estações, exceto Belém..... | 52 |
| Figura 2.10- Frequência de dias com precipitação em determinado intervalo: Sem PRP (a), Fraca (b), Moderada (c), Forte (d) e Extrema (f). Informações para Belém (azul) e a média das outras estações (laranja). Linha pontilhada corresponde a tendência linear. | 55 |
| Figura 3.1- Área de estudo com as cidade de Marituba (azul), Ananindeua (laranja) e parte da cidade de Belém (verde). | 62 |
| Figura 3.2- Imagens do satélite GOES-12 exibindo a evolução da tempestade estudada nos seguintes horários UTC: 1630 (a), 1930 (b), 2000 (c) e 2100 (d). O circulo vermelho marca a RMB, a linha azul marca a Linha de Instabilidade e o sistema estudado é indicado pela seta verde..... | 63 |
| Figura 3.3- (a) Domínio da grade utilizada nas simulações com o WRF; b) classificação original do uso do solo no modelo WRF; c) uso do solo no cenário de 1986; d) uso do solo no cenário de 2017. | 68 |
| Figura 3.4- Perfil vertical de: a) umidade específica (q); b) temperatura do ar; c) velocidade (VV) e direção do vento (DV) para medidas feitas pela radiossonda (azul) e simulado pelo WRF no cenário de controle (preto), as 1800 UTC. | 71 |
| Figura 3.5- Refletividade máxima (dBZ) simulada pelo WRF (a,b,c) e observada pelo radar (d,e, f) às 2000 UTC (coluna da esquerda), 2030 UTC (coluna do meio) e 2100 UTC (coluna da direita). | 72 |
| Figura 3.6- Refletividade máxima (dBZ) para o cenário de 2017 (linha de cima), 1986 (linha do meio) e floresta (linah de baixo) no horário de 1930 UTC (primeira coluna), 2000 UTC (segunda coluna), 2030 (terceira coluna) e 2100 (quarta coluna)..... | 74 |

| | |
|---|-----|
| Figura 3.7- Corte longitudinal através da latitude 1.38°S da refletividade (dBZ, sombreado) e a velocidade vertical do vento (m/s, linhas). A linha próxima ao eixo X representa a RMB. Velocidade vertical negativa (linha tracejada) varia entre -5m/s e 0m/s, a cada 0.5m/s, e a velocidade vertical positiva (linha contínua) varia entre 0m/s e +5m/s, a cada 1m/s. A linha de velocidade vertical de 0m/s foi omitida..... | 76 |
| Figura 3.8- Corte longitudinal através da latitude 1.38°S de Temperatura Potencial Equivalente (θ_E) e a velocidade vertical do vento (m/s, linhas). A linha próxima ao eixo X representa a RMB. Velocidade vertical negativa (linha tracejada) varia entre -5m/s e 0m/s, a cada 0.5m/s, e a velocidade vertical positiva (linha contínua) varia entre 0m/s e +5m/s, a cada 1m/s. A linha de velocidade vertical de 0m/s foi omitida. | 78 |
| Figura 3.9- CAPE (coluna da esquerda, J/kg) e CIN (coluna da direita, J/kg) em cada cenário às 2000 UTC..... | 80 |
| Figura 3.10- Fluxo de calor sensível da superfície para a atmosfera (W/m ² , sombreado) para 2017 (linha de cima), 1986 (linha do meio) e Floresta (linha de baixo) às 1930, 2000, 2030 e 2100 UTC. | 81 |
| Figura 3.11- Fluxo de calor latente da superfície para a atmosfera (W/m ² , sombreado) para 2017 (linha de cima), 1986 (linha do meio) e Floresta (linha de baixo) às 1930, 2000, 2030 e 2100 UTC. | 82 |
| Figura 3.12- Velocidade do vento horizontal (sombreado) e vetor direção e velocidade do vento (setas) em 10m de altura em 2017 (linha de cima), 1986 (linha do meio) e Floresta (linha de baixo) às 1930, 2000, 2030 e 2100 UTC..... | 83 |
| Figura 3.13- Perfil vertical, no ponto da radiossonda, de velocidade do vento horizontal (linha preta) e direção do vento (barbelas) para os cenários de 2017 (linha de cima), 1986 (linha do meio) e floresta (linha de baixo) às 2000, 2030 e 2100 UTC. Cada traço menor nas barbelas de vento representa 5kts e os maiores 10 kts..... | 85 |
| Figura B.1- Média anual no primeiro (linha contínua) e segundo semestre (linha tracejada) de temperatura máxima (a), mínima (b) e média (c), umidade específica (d), velocidade do vento (e) e precipitação (f) em Belém (linhas azuis) e na média das outras estações (linhas laranjas). | 106 |

Figura C.1- Frequência no primeiro (linha contínua) e segundo semestre (linha tracejada) de precipitação de acordo com diferentes intervalos: a) sem PRP; b) Fraca; c) Moderada; d) Forte; e) Extrema em Belém (linhas azuis) e na média das outras estações (linhas laranjas)..... 110

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1- Questionário..... | 36 |
| Tabela 2.2- Caracterização da amostra de acordo com a tipologia (Tipo I e Tipo III)..... | 45 |
| Tabela 2.3- Número de respostas positivas e negativas com relação a mudança climática. ... | 47 |
| Tabela 2.4- Semestre no qual os entrevistados perceberam com maior facilidade as mudanças mencionadas..... | 50 |
| Tabela 2.5- a) Equação da linha de tendência de cada variável: temperatura máxima (TMAX), mínima (TMIN) e média (TMED), umidade específica (q), velocidade do vento (VV) e precipitação (PRP). Em vermelho estão marcadas as tendências negativas; b) coeficiente de correlação das equações de tendência..... | 53 |
| Tabela 2.6- a) Equação da linha de tendência em cada semestre da frequência de dias com PRP em um determinado intervalo (Sem PRP: $PRP \leq 1\text{mm}$; Fraca: $1\text{mm} < PRP \leq 10\text{mm}$; Moderada: $10\text{mm} < PRP \leq 25\text{mm}$; Forte: $25\text{mm} < PRP \leq 50\text{mm}$; Extrema: $50\text{mm} < PRP$) em Belém e na média das outras estações. Valores em vermelho indicam tendência negativa; b) coeficiente de correlação das equações de tendência. | 56 |
| Tabela 2.7- Quantidade de participantes que sofreram ou não algum tipo de impacto devido à mudança climática mencionada anteriormente. | 57 |
| Tabela 2.8- Quantidade de participantes que conseguiram ou não se adaptar a mudança mencionada anteriormente. | 57 |
| Tabela 3.1- Diferença entre 2017 (controle) e 1986 e Floresta em quatro horários UTC para as seguintes variáveis: Temperatura Potencial Equivalente (θ_e , °K), CAPE (J/kg), CIN (J/kg), fluxo vertical de calor latente (LH, W/m ²) e calor sensível (S, W/m ²), vento horizontal em 10m (VH, m/s) e vento vertical próximo a superfície (w, m/s) multiplicado por 10 ⁴ | 86 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARWpost – *WRF postprocessing system*.

BEP – *Buiding Environmental Parametrization*.

BRAMS – *Brazilian Contribution to the Regional Atmospheric Modeling System*.

CAPE – *Convective Available Potential Energy*.

CIN – *Convective Inhibition*.

COP – *Conference of Parties*.

DV – Direção do Vento.

GFS – *Global Forecast System*.

HWRF – *Hurricane WRF*.

I_{arb} – Índice de arborização.

IBI – *Index-based Built-up Index*.

I_{den} – Índice de densidade demográfica.

I_{ndvi} – Índice de NDVI.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

IPCC – *International Panel for Climate Change*.

I_{ren} – Índice de renda.

I_{ver} – Índice de verticalização.

J – Índice sócio – ambiental.

LH – Calor latente.

MNDWI – *Modified Normalized Difference Water Index*.

MUR – *Multiscale Ultra-high Resolution*.

NCAR – *National Center for Atmospheric Research*.

NCL – *NCAR Command Language*.

NDBI – *Normalized Difference Built-up Index*.

NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*.

NIR – Canal infravermelho próximo.

PBMC – Painel Brasileiro sobre Mudanças Climáticas.

PDM – Plano Diretor Municipal.

PLP – Primeira Léngua Patrimonial.

PRP – Precipitação.

q – Umidade específica

Ri_B – Número de Richardson (*bulk*).

RMAX – Refletividade Máxima.

RMB – Região Metropolitana de Belém.

RRTM – *Rapid Radiative Transfer Model*.

S – Calor sensível.

SAVI – *Soil Adjust Vegetation Index*.

TMAX – Temperatura Máxima do ar.

TMED – Temperatura Media do ar.

TMIN – Temperatura Mínima do ar.

θ_E – Temperatura Potencial Equivalente.

USP – Universidade de São Paulo.

VER – Canal Vermelho

VH – Vento Horizontal.

VV – Velocidade do Vento.

WPS – *WRF Preprocessing System*.

WRF – *Weather Research and Forecast*.

WRF-Chem – *WRF Chemistry*.

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul.

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical.

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO, OBJETIVOS E REFERENCIAL TEÓRICO | 18 |
| 1.1 Introdução | 18 |
| 1.2 Objetivos | 19 |
| 1.2.1 Objetivo Geral | 19 |
| 1.2.2 Objetivos Específicos | 20 |
| 1.3 Referencial Teórico | 20 |
| 1.3.1 Clima Urbano | 20 |
| 1.3.2 Tempestades Severas..... | 24 |
| 1.3.3 Percepção Climática | 28 |
| 1.3.4 Adaptação..... | 29 |
| CAPÍTULO 2 PERCEPÇÃO, EVOLUÇÃO DO CLIMA E ADAPTAÇÃO | 31 |
| 2.1 Materiais e Métodos | 31 |
| 2.1.1 Área de Estudo | 31 |
| 2.1.2 Dados Observacionais | 33 |
| 2.1.3 Questionário | 35 |
| 2.1.4 Mapa de Tipologias Socio-Ambiental..... | 37 |
| 2.2 Resultados | 45 |
| 2.2.1 Caracterização da Amostra da População | 45 |
| 2.2.2 Percepção e o Clima de Belém..... | 46 |
| 2.2.2.1 <i>Percepção Atmosférica</i> | 46 |
| 2.2.2.2 <i>Evolução do Clima</i> | 50 |
| 2.2.3 Impacto e Adaptação a Mudança Climática em Belém | 56 |
| 2.3 Sumário e Conclusão | 58 |
| CAPÍTULO 3 INFLUÊNCIA DA URBANIZAÇÃO NO DESENVOLVIMENTO DE TEMPESTADE SEVERA | 60 |
| 3.1 Materiais e Métodos | 60 |
| 3.1.1 Área de Estudo | 60 |
| 3.1.2 Estudo de Caso | 62 |
| 3.1.3 Definição da Área Urbana da RMB | 64 |
| 3.1.4 O modelo numérico Weather Research and Forecasting - (WRF)..... | 65 |
| 3.2 Resultados | 70 |
| 3.2.1 Validação do Modelo | 70 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 3.2.2 | Refletividade e Balanço de Energia..... | 73 |
| 3.2.3 | Varição Vertical e Horizontal do Vento | 82 |
| 3.3 | Sumário e Conclusão | 85 |
| 4 | CONCLUSÃO GERAL..... | 87 |
| | REFERENCIAS | 89 |
| | APÊNDICE A – ARTIGO PUBLICADO NO JORNAL URBAN CLIMATE..... | 105 |
| | APÊNDICE B – GRÁFICOS SEMESTRAIS DAS ESTAÇÕES..... | 106 |
| | APÊNDICE C – GRÁFICOS SEMESTRAIS DA FREQUÊNCIA DE PRECIPITAÇÃO..... | 110 |

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO, OBJETIVOS E REFERENCIAL TEÓRICO

1.1. Introdução

O clima na cidade de Belém é quente e úmido, sendo classificado como A_{fi} segundo Köppen (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007). Os dados coletados na estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em Belém, no período de 1961 a 2009, apontam temperatura do ar média variando entre 25,4°C e 26,5°C nos meses de fevereiro e novembro, respectivamente. O acumulado médio de precipitação supera os 2.800mm/ano, sendo o mês mais chuvoso em março, com 450mm em média, e o menos chuvoso em novembro, com 120mm (INMET, 2020).

Tais características climáticas podem estar mudando. Estudos passados concluíram que Belém está ficando mais quente e com maiores acumulados de precipitação (BASTOS et al., 2002; OLIVEIRA et al., 2016). A causa destas alterações climáticas pode ter sua origem no desenvolvimento da urbanização de Belém ou nos efeitos de mudanças climáticas globais. Os estudos mencionados anteriormente não conseguem definir esta origem, pois Bastos et al. (2002) aborda o clima de Belém de forma geral e apesar Oliveira et al. (2016) utilizarem a expressão “clima urbano”, eles não fazem comparação com a área rural ou localidades menos urbanizadas, inviabilizando a caracterização do clima de Belém como “clima urbano” de forma absoluta.

Outros autores utilizaram metodologias diferentes de Bastos et al. (2002) e Oliveira et al. (2016) e, em seus resultados, indicam a possível influência da urbanização no clima local. Souza (2012) utilizou modelagem atmosférica com o BRAMS (*Brazilian Contribution to the Regional Atmospheric Modeling System*) e concluiu que a temperatura do ar em 2008 é superior ao simulado com as condições urbanas de 1973, principalmente no centro da divisa entre Ananindeua e Belém. Além disso, Silva Junior et al. (2013) utilizaram sensores instalados em um transecto norte – sul da principal área urbana de Belém para medir a temperatura do ar e observaram maior temperatura na região mais urbanizada, onde há maior verticalização. Assim, estes estudos demonstram possível influência da urbanização sobre o clima de Belém, porém, nas simulações feitas por Souza (2012), a representação geográfica de Belém é diferente da observada, agregando incertezas aos seus resultados, enquanto as medidas feitas por Silva Junior et al. (2013) foram coletadas para um curto período de tempo, sendo apenas um indicativo de clima urbano.

Embora estes estudos não sejam conclusivos, são evidências de como o clima de Belém pode estar sendo alterado pela urbanização e aqueles que mais sofrem com tais

alterações são os que integram a população mais carentes, e cuja vulnerabilidade a estes eventos e suas consequências (como proliferação de doenças e alagamentos) é mais elevada em comparação a parcela da população de Belém com maior poder econômico (BARROS et al., 2017; CAMPOS; MOTA; SANTOS, 2014; PONTES et al., 2017; SADECK et al., 2017; SANTOS; VITORINO; PIMENTEL, 2017).

O Plano Diretor Municipal de Belém (PDMB, um instrumento legal que orienta o desenvolvimento urbano local) apresenta parágrafos visando à proteção ambiental e dos habitantes perante o clima (BELÉM, 2008), mas o que se observa é o aumento de casos de alagamento devido a extremos de precipitação e de desconforto térmico decorrente do aumento da temperatura, tanto diurna quanto noturna (ALMEIDA et al., 2010; BORGES; SOUZA, 2011; CAMPOS; MOTA; SANTOS, 2014; LOUREIRO et al., 2014). O primeiro passo para se criar um plano para solucionar estes problemas, é entender como a população percebe o clima e a interação dele com o seu meio ambiente (RODRIGUES et al., 2012). Porém, Belém é desprovida de estudos sobre percepção climática urbana, aqueles que abordam percepção tratam do ambiente de forma geral (SANTOS et al., 2018; SILVA et al., 2014).

Assim, esta tese visa agregar elementos sociais aos estudos do clima de Belém e maior robustez às análises meteorológicas. A partir de dados meteorológicos observados e resultados de simulações numéricas de alta resolução, este estudo aborda como o clima de Belém pode estar sendo alterado pela urbanização e, através de questionário, avalia como a população percebe e se adapta a estas possíveis alterações. Estudos como esse são fundamentais para o planejamento urbano, pois, permitem investigar a influência de diferentes cenários de uso do solo na atmosfera e, a partir deste conhecimento, é possível gerar ações para a mitigação dessas mudanças climáticas e/ou aumentar a resiliência da cidade e de seus habitantes.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

O objetivo principal desta pesquisa é estudar o impacto dos principais centros urbanos dos municípios Belém, Ananindeua e Marituba sobre o clima local e analisar como parte da população de Belém percebeu a mudança no clima local.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Analisar a influência da urbanização sobre o clima em Belém e comparar esses resultados com os coletados em cidades menos urbanizada, utilizando 37 anos de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET);

- Investigar como parte dos habitantes de Belém percebem a evolução do clima local e compara-la com o observado pelas medidas realizadas pelo INMET;

- Analisar como as mudanças climáticas percebidas por parte da população de Belém podem ter impactado suas vidas e quais suas estratégias de adaptação a este novo cenário meteorológico;

- Simular e avaliar como diferentes cenários de uso do solo nas principais áreas urbanas dos municípios de Belém, Ananindeua e Marituba podem alterar as características atmosféricas, com conseqüente influência no desenvolvimento de tempestade severa.

1.3. Referencial Teórico

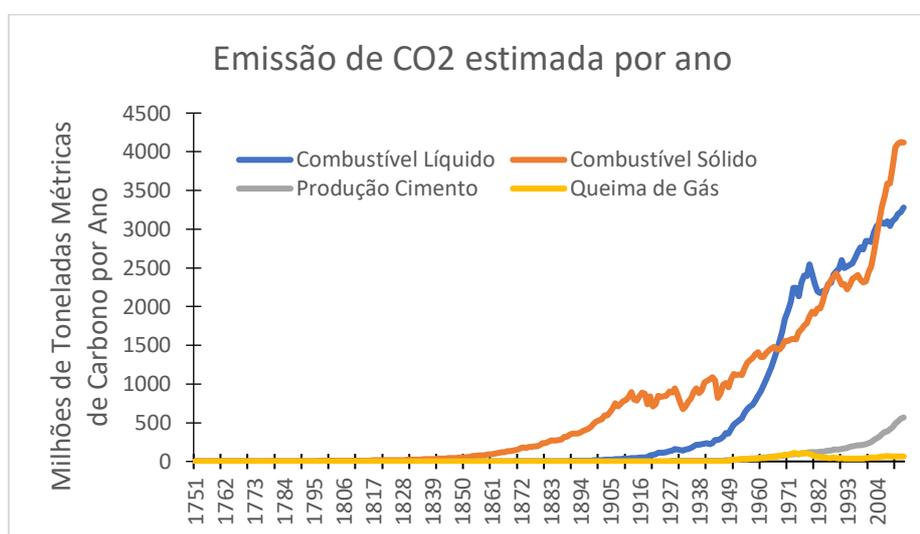
1.3.1. Clima Urbano

Tempo e clima são palavras com conceitos diferentes na meteorologia. Enquanto o tempo é um estado momentâneo da atmosfera (exemplo: “hoje o tempo está chuvoso”, ou seja, em outro momento, o tempo será diferente), o clima é a média das condições de tempo de um determinado local em um período mínimo de 30 anos (exemplo: “o clima de Belém é quente e úmido”). Isso não quer dizer que não possam haver anos e/ou estações mais quentes/frias e/ou mais chuvosas/secas do que o normal, afinal, existem diferentes variações naturais contribuindo para estas alterações, como o El Niño/Oscilação Sul, a Oscilação Interdecadal do Pacífico e os ciclos de atividade solar (variações na quantidade de manchas solares que alteram a quantidade de energia emitida pelo sol). Todos estes mecanismos atuam em uma frequência de meses, anos e décadas e podem passar despercebidos se o clima de um local não for caracterizado com uma série longa de dados (GHIL, 2002), porém, são naturais e o equilíbrio climático da Terra se mantem.

O ser humano tem exercido uma pressão cada vez mais forte sobre clima, principalmente a partir da revolução industrial no século XVIII, através da contínua emissão de grande quantidade de gases com potencial de aquecimento da atmosfera (Figura 1.1). Estes

gases, como os compostos de carbono (CO_2 e CH_4), intensificam o efeito estufa natural da Terra, gerando um aquecimento extra do planeta e a variabilidade natural do clima passa a ser influenciada pela ação humana, o clima começa a mudar (BLASING, 2016). De acordo com o quinto relatório do Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas (IPCC), o aquecimento mínimo esperado para o final do século, em todo o planeta, deve ser entre $0,3^\circ\text{C}$ e $1,7^\circ\text{C}$ (IPCC, 2014). No Pará, os resultados produzidos pelo Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC) estimam um aumento mínimo entre 3°C e 4°C no final deste século (PBMC, 2013).

Figura 0.1- Estimativas globais de emissão de CO_2 por ano.



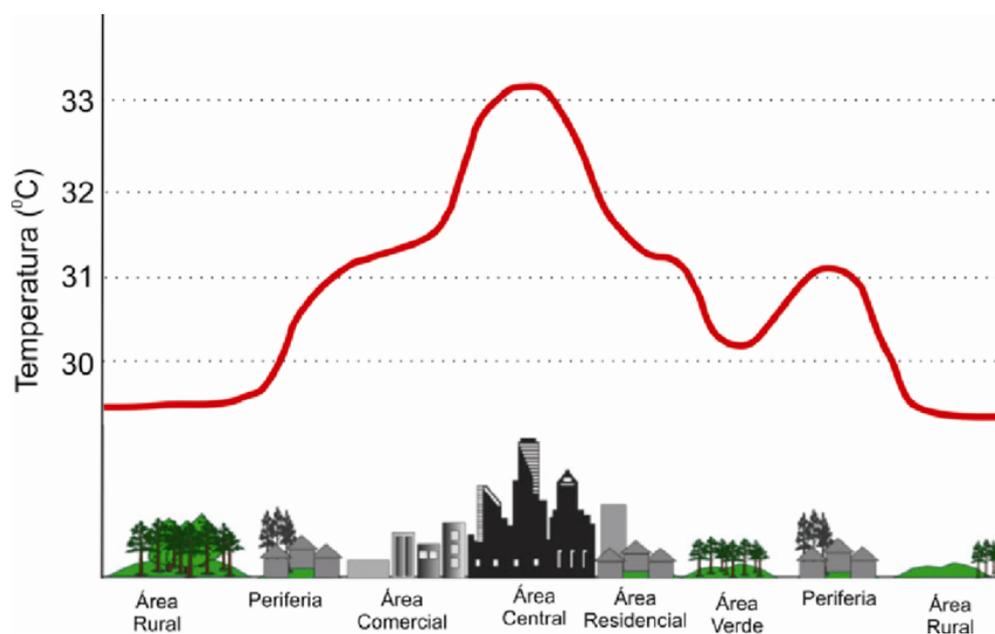
Fonte: Boden et al. (2017).

Levando em consideração apenas as emissões de gases do efeito estufa e um aumento em $1,5^\circ\text{C}$ e $2,0^\circ\text{C}$ na temperatura média da Terra, danos irreversíveis podem ser causados a diversos ecossistemas terrestres: acidificação dos oceanos; redução de áreas com clima ótimo para a sobrevivência de insetos, plantas e vertebrados; longos períodos de secas; e aumento na frequência de eventos meteorológicos extremos (IPCC, 2018a). Todavia, em diversos lugares ao redor do mundo, a maior parte da população vive em grandes centros urbanos e estes representam um problema completamente diferente.

As estruturas (edificações, ruas, e materiais utilizados nas construções) dos centros urbanos conseguem acumular mais calor devido ao baixo albedo (taxa de reflexão da luz de um determinada superfície) e o alto calor específico, a poluição gerada pela queima de combustíveis intensifica o efeito estufa natural, diversas atividades humanas emitem calor para a atmosfera e a maior rugosidade da superfície devido as construções reduzem a

velocidade do vento no interior da cidade inviabilizando a renovação do ar local. A somatória destes fatores gera um dos principais efeitos causados pelos centros urbanos, a formação das “ilhas de calor” (Figura 1.2), que ocorre quando a temperatura na cidade se torna muito mais elevada do que da região no entorno, como se fosse uma ilha (ALVES, 2017; CHEN; YANG; ZHU, 2014; COSTA et al., 2016; FREITAS; DIAS, 2005; GIANNAROS et al., 2013; ICHINOSE; SHIMODOZONO; HANAKI, 1999; WENG, 2009).

Figura 0.2- Esquemática da variação da temperatura do ar de acordo com diferentes coberturas do solo.

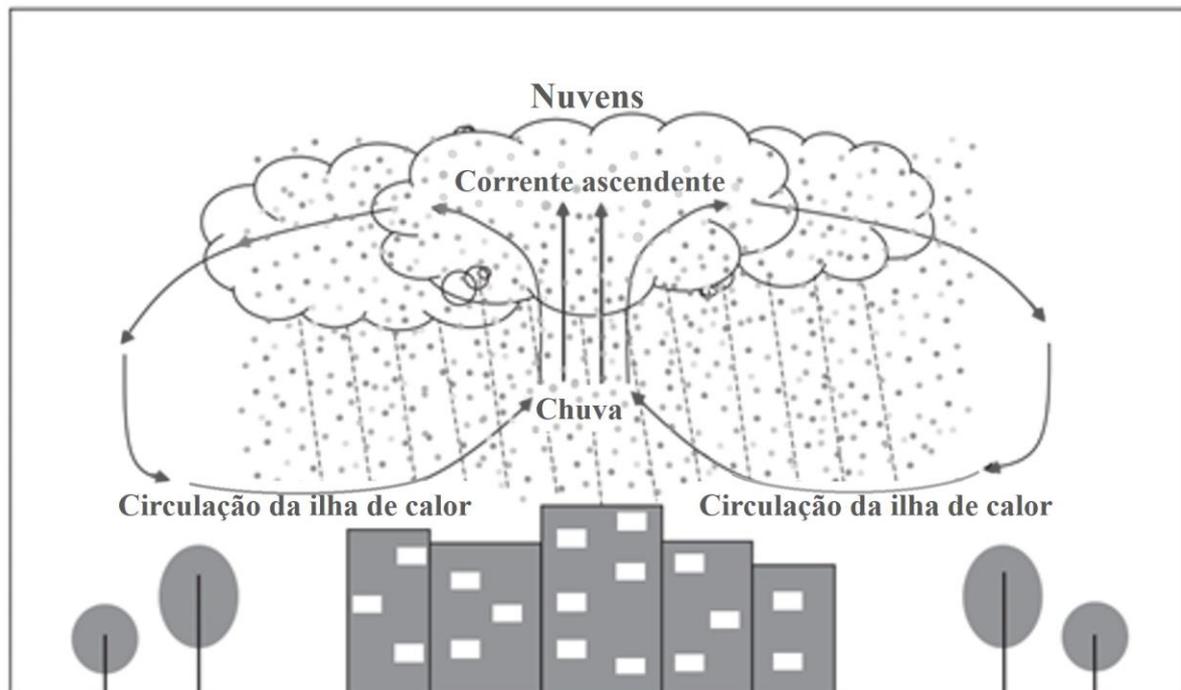


Fonte: Azevedo et al. (2012)

Além da ilha de calor, os centros urbanos também podem ser responsáveis por aumentar a frequência de eventos meteorológicos extremos, sejam estes eventos relacionados a temperatura ou a precipitação. No caso da temperatura, ondas de calor podem ser mais intensas e duradouras, devido a ilha de calor e a reduzida umidade na superfície (HEROLD; KALA; ALEXANDER, 2016; WARD et al., 2016). Todavia, a relação da precipitação com a urbanização é mais complexa do que a temperatura, apesar de ambas possuírem elementos em comum, como o maior acúmulo de energia pelos materiais presentes no meio urbano aquece mais a atmosfera diretamente acima da superfície. Por sua vez, essa massa de ar mais quente se eleva, por ser menos densa que o ar frio acima, gerando convecção em superfície e movimento ascendente do ar. Caso exista umidade suficiente na atmosfera, esse movimento vertical transportará vapor d'água para camadas mais altas, o qual condensará, formará nebulosidade e, possivelmente, precipitação (Figura 1.3). A maior concentração de aerossóis,

apesar de ainda apresentar incertezas com relação ao seu efeito na atmosfera (VAN DEN HEEVER; COTTON, 2007), também facilita a formação de nebulosidade, pois os mesmos atuam como núcleos de condensação para o vapor d'água transportado por esta corrente ascendente de ar. Tal dinâmica pode gerar maiores volumes de precipitação em determinados pontos da cidade, intensificar sistemas meteorológicos que se formaram em outras regiões e se deslocaram para o centro urbano e/ou gerar precipitação onde antes não acontecia da mesma forma (BORNSTEIN; LIN, 2000; LEI; NIYIOGI, 2010; MCWILLIAMS, 2010; MÖLDERS; OLSON, 2004; MOTE; LACKE; SHEPHERD, 2007; PATHIRANA et al., 2014).

Figura 0.3- Esquemática do efeito da urbanização no desenvolvimento de uma tempestade. A ilha de calor inicia uma circulação com forte movimento ascendente (convectivo) na área urbana, favorecendo o desenvolvimento de nuvem e precipitação.



Fonte: Adaptado de Yang et al (2017).

Atualmente, a modelagem numérica da atmosfera (representação dos processos físicos que regem a dinâmica atmosférica por meio de equações matemáticas escritas em linguagem computacional) é uma das principais ferramentas para o estudo da relação entre eventos meteorológicos extremos e a urbanização. Os resultados obtidos com esses modelos indicam que o acúmulo e a emissão de energia extra pelas cidades, associado à reduzida velocidade do vento e conseqüente aumento da convergência de massa (exemplo: umidade) e energia (calor), podem intensificar uma tempestade sobre a cidade, causando mais precipitação e

rajadas de ventos (FREITAG; NAIR; NIYOGI, 2018; HABERLIE; ASHLEY; PINGEL, 2015; PATHIRANA et al., 2014; YANG; REN; YAN, 2017). Por outro lado, os prédios também podem servir como barreiras para o escoamento do vento, desviando a tempestade para outra região e tornando o centro da cidade mais seco, ou então a reduzida umidade na cidade (causada pela falta de vegetação e menor evapotranspiração) e baixa convergência em superfície devido a uma pequena área urbana pode fazer com que a tempestade se desenvolva após a cidade (BORNSTEIN; LIN, 2000; HABERLIE; ASHLEY; PINGEL, 2015; KINGFIELD et al., 2018; MIAO et al., 2011)

Por todos estes motivos citados anteriormente, Howard (2008, reimpressão), um dos primeiros autores a estudar o clima urbano em 1833 em Londres (utilizando apenas estações meteorológicas e trabalhando apenas a temperatura do ar), concluiu que o clima de um centro urbano não deve ser confundido com o clima natural, pois as artificialidades (construções e materiais utilizados) dos centros urbanos tornam o clima destes locais únicos.

1.3.2. Tempestades Severas

Aglomerados de nuvens avançando pelo horizonte, produzindo fortes rajadas de vento, precipitação, raios e relâmpagos, chamam atenção das pessoas, deixando-as em alerta para qualquer sinal de perigo. Por isso, as tempestades são fenômenos meteorológicos facilmente reconhecidos. Além disso, como mencionado anteriormente, as tempestades podem ser influenciadas pelos centros urbanos, aumentando o nível de perigo deste fenômeno devido a muitas e variadas vulnerabilidades as quais os milhares de habitantes dos centros urbanos estão expostos. Assim, este tópico abordará a formação, o desenvolvimento e a dissipação destes fenômenos.

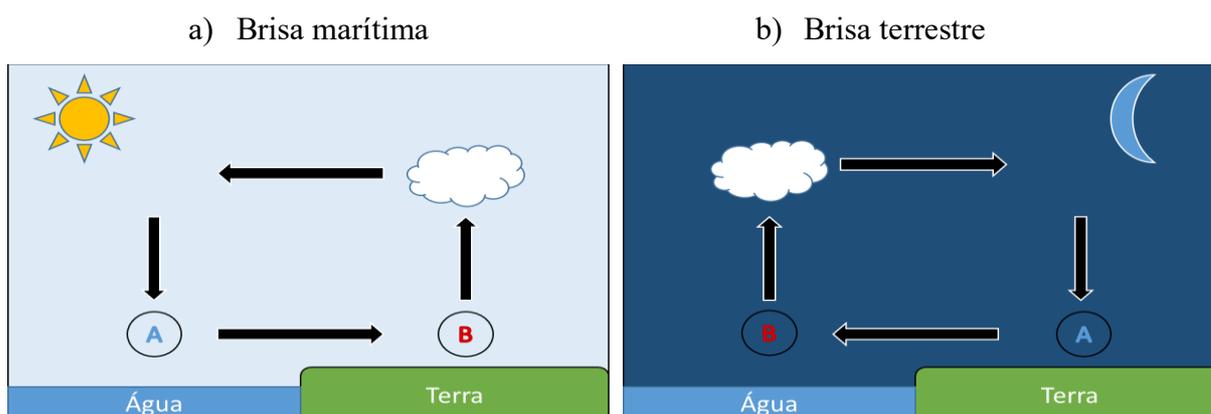
Durante a estação chuvosa na Amazônia Oriental (dezembro a maio), o principal mecanismo de formação de tempestade são os fenômenos de escala sinótica que atuam nesta região e organizam a nebulosidade: Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (SOUZA et al., 2016; SANTOS; LUCIO; SILVA, 2017). Quando estes sistemas sinóticos estão ausentes ou com influência reduzida, outros mecanismos passam a ser responsáveis pelo desenvolvimento de tempestades.

O aquecimento superficial promovido pela incidência dos raios solares aquece a massa de ar diretamente acima (Figura 1.4). Esta massa de ar torna-se mais leve e eleva-se (formando uma área de baixa pressão, indicado pelo B na Figura 1.4) e caso haja umidade, se condensará (liberando calor latente) em altitude e formará uma nuvem. Devido a posição geográfica da Amazônia (intenso ciclo diurno regido pela radiação solar aproximadamente

constante ao longo de todo o ano) e as suas características ambientais (radiação solar aproximadamente constante ao longo do ano e umidade oriunda do oceano e da própria floresta pelo processo de evapotranspiração), as condições atmosféricas para formação de nebulosidade por convecção são ideais (LIMA; WILSON, 2008; MOLION, 1987; SANTOS; MOTA; ROCHA, 2014).

Este movimento convectivo inicia uma circulação do vento, pois devido as leis de conservação de massa, o local de onde a massa de ar se elevou não pode ficar vazio e o ar ao lado se move para ocupar o espaço “vago”. Na costa nordeste da Amazônia, o Oceano Atlântico aquece mais lentamente do que o continente iniciando essa circulação de brisa, a chamada brisa marítima (Figura 1.4.a). Durante a noite, o continente esfria mais rapidamente do que o oceano e a circulação de brisa inverte de direção (Figura 1.4.b). Ademais, durante o dia, esta circulação é intensificada pelo escoamento básico dos ventos atmosféricos em baixos níveis, gerando convergência. Assim, a partir destes dois processos (convergência e convecção) tem-se a formação de tempestades próximo à costa da Amazônia com o Oceano Atlântico e, por vezes, várias tempestades se formam ao mesmo tempo, se organizam em linhas e se deslocam continente adentro, estas são as chamadas Linhas de Instabilidade, um dos principais mecanismos de precipitação da região (COHEN; SILVA DIAS; NOBRE, 1995; GARSTANG et al., 1994).

Figura 0.4- Esquemática do processo de convecção e circulação de brisa.



Fonte: Autor.

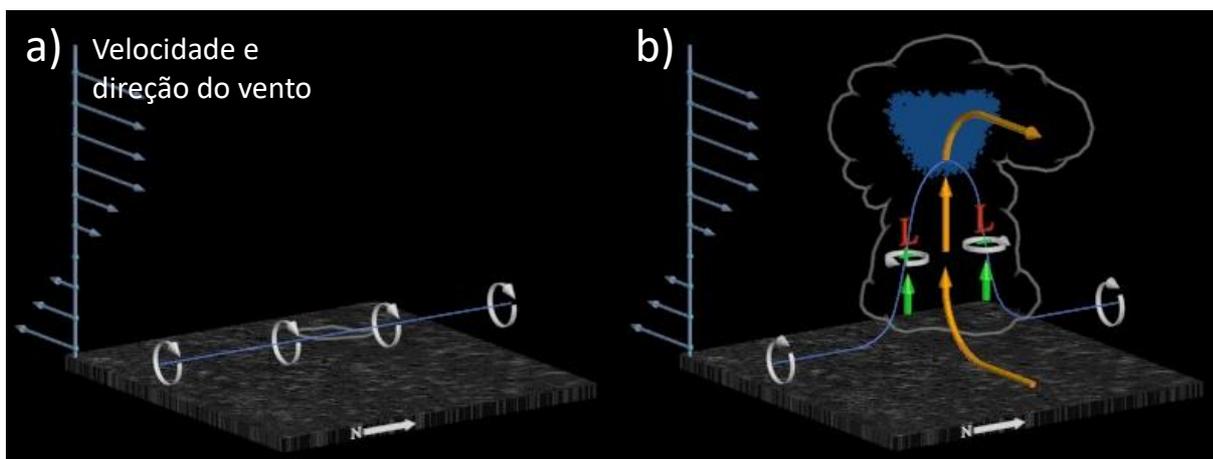
A circulação de brisa também pode se formar no continente, devido ao diferencial térmico entre duas áreas com distintas coberturas do solo. Na Amazônia esta questão vem ganhando importância devido ao processo de desflorestamento que pode causar alterações

significativas no ciclo hidrológico de uma determinada área (D'ALMEIDA et al., 2007; MARENGO et al., 2018; SAAD et al., 2010).

Assim, para a formação de uma tempestade na Amazônia é necessário ao menos um de dois processos: convecção e/ou convergência (a partir da circulação de brisa). Todavia, a manutenção da tempestade é mais complexa e necessita do balanço entre duas forças: o cisalhamento do vento e a flutuabilidade.

O cisalhamento do vento diz respeito a variação da velocidade e direção do vento com a altitude. A linha branca com as setas ao lado esquerdo da Figura 1.5.a e 1.5.b mostra a direção e velocidade (tamanho da seta) do vento com a altitude e devido a essa variação, um movimento de rotação se inicia próxima a superfície (indicado pelas setas circulares). Caso esse movimento se intensifique e, principalmente, se houver convecção, haverá a formação de uma corrente ascendente de ar (seta amarela na Figura 1.5.b). Esta corrente empurra para cima esta região com rotação de vento, inclinando o sentido da rotação, que passa de vertical para horizontal (Figura 1.5.b). A rotação horizontal do vento reduz a pressão atmosférica nestes locais (indicado pelo L na Figura 1.5.b), intensificando a corrente ascendente de ar. Com isso, mais calor e humidade são transportados da superfície para níveis mais elevados da atmosfera. (MOLLER et al., 1994; ROTUNNO, 1981; ROTUNNO; KLEMP; WEISMAN, 1988). A medida em que uma massa de ar é transportada para cima por meio desta corrente ascendente, o vapor d'água condensa e calor latente é liberado para a atmosfera, fortalecendo a tempestade.

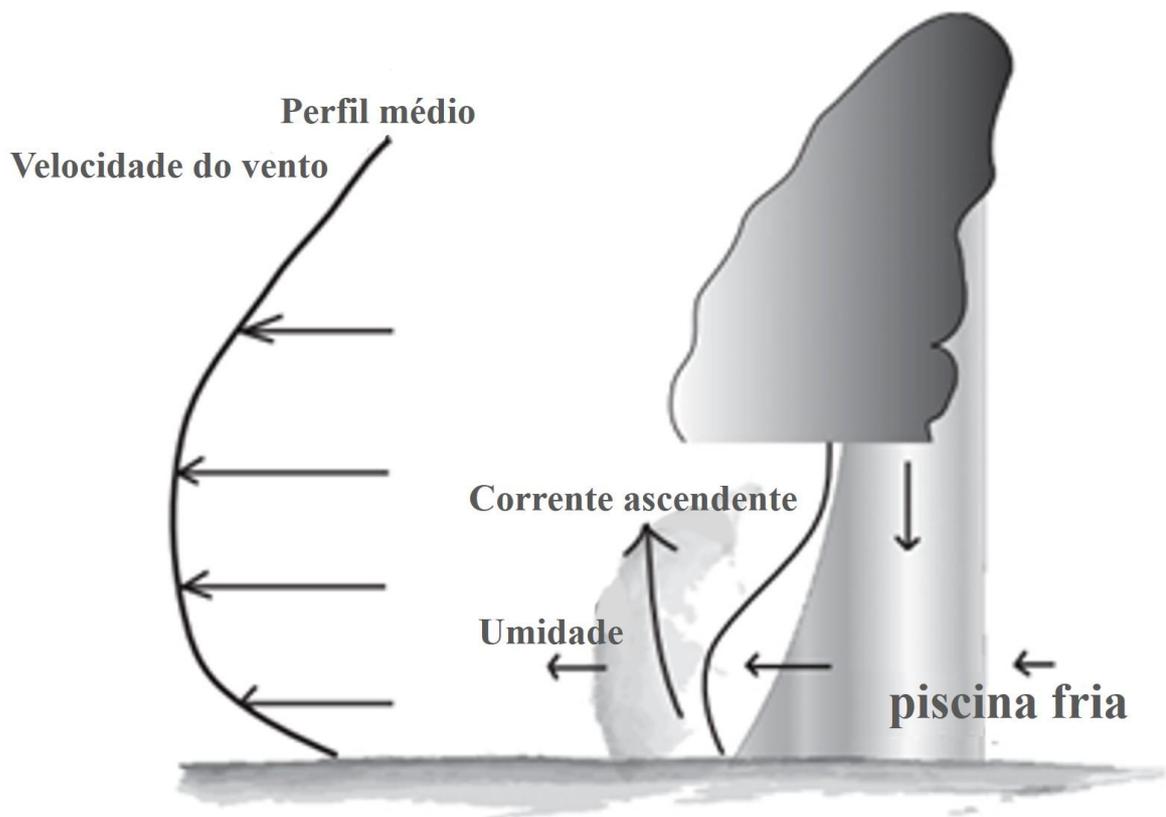
Figura 0.5- Esquematização do cisalhamento do vento (a) e da influência da convecção (b).



Fonte: COMET (2020).

Com a precipitação das gotículas de água e consequente estabelecimento de corrente descendente trazendo ar frio e seco de altos níveis da atmosfera para a superfície (estabelecendo a “piscina fria”) a corrente ascendente deixa de alimentar a tempestade com umidade e calor e a mesma começa seu processo de dissipação. Porém, quando a corrente descendente se forma, ela carrega consigo, ao longo de sua borda, vapor d’água e calor da superfície que pode se elevar novamente ao convergir com o escoamento básico da atmosfera (Figura 1.6), iniciando uma nova célula de tempestade na retaguarda ou revigorando a tempestade antiga caso ocorra na vanguarda (DRAGER; VAN DEN HEEVER, 2017; GARCIA-CARRERAS et al., 2013; LI; ZUIDEMA; ZHU, 2014). Eventualmente a tempestade irá estabilizar novamente a atmosfera e novas células deixaram de ser geradas, dissipando por completo a tempestade. Todavia, caso não haja cisalhamento do vento, o levantamento do ar na borda da piscina fria não ocorrerá com força suficiente para iniciar uma nova célula de tempestade.

Figura 0.6- Esquematização da formação e escoamento da "piscina fria" e geração de nova célula de nuvem alimentando a tempestade antiga.



Fonte: Adaptado de Li et al. (2014).

1.3.3. Percepção Climática

A formação de ilha de calor e o aumento na frequência de eventos extremos (longas secas, precipitação mais fortes, calor extremo) causadas apenas pela formação de um clima urbano e exacerbado pelas mudanças climáticas globais podem causar danos significativos aos habitantes destes locais (PEDUZZI et al., 2009). No entanto, antes de se desenvolver qualquer política focada em trabalhar a população para a adaptação ou mitigação dos efeitos das mudanças climáticas, inicialmente é fundamental entender como a população percebe e reage ao clima local e sua variabilidade.

O processo de percepção pode parecer simples, afinal, perceber é sentir, é olhar, é a interação dos sentidos humanos com os elementos atmosféricos ao seu redor, na verdade, é um processo complexo e dinâmico, no qual diferentes fatores estão contribuindo para que cada indivíduo, cada comunidade, perceba de forma diferente o clima (WOLLMANN; SARTORI, 2010).

Ao se abordar percepção e clima, um dos primeiros fatores a se levar em consideração é que mudanças climáticas ocorrem gradativamente, em um longo período de tempo, e em alguns lugares as mudanças podem ser mais intensas do que em outros. Assim, a percepção passa a ser afetada pela capacidade de cada indivíduo de notar estas mudanças sutis e registrar na memória (HOWE et al., 2012) e os meios de comunicação passam a ter um importante papel no aumento da percepção, divulgando notícias de alterações climáticas em todo o planeta (BOYKOFF; BOYKOFF, 2007; CAPSTICK et al., 2015; LEISEROWITZ et al., 2013; NUNES, 2007). Em locais onde há aumento na frequência de eventos meteorológicos extremos (tempestades mais severas, secas prolongadas, ondas de calor mais intensas), a atenção dos indivíduos para mudança climática e seus efeitos é maior, a percepção é maior, pois os indivíduos estiveram presentes durante estes eventos e, talvez, impactados de alguma forma pelos mesmos (KONISKY; HUGHES; KAYLOR, 2016; LUJALA; LEIN; RØD, 2015; SISCO; BOSETTI; WEBER, 2017).

O meio em que o indivíduo está inserido também é relevante para sua percepção de mudanças climáticas. Quanto maior for o controle climático do ambiente em que cada pessoa vive, menor será a percepção de mudança climática. Os habitantes de centros urbanos passam cada vez mais tempo dentro de edificações ou em veículos, lugares que podem ter o clima controlado por ventiladores e/ou ar-condicionado e sem visão do céu, isso resulta em uma desconexão da natureza, prejudicando a percepção. No ambiente natural ou rural, as pessoas dependem de uma determinada condição climática para sobreviver e por isso precisam

perceber as alterações no clima (NUNES, 2007; OLIVEIRA; NUNES, 2007; WOLLMANN; SARTORI, 2010).

Questões pessoais, como gênero, idade e saúde influenciam diretamente o corpo humano e como os sentidos percebem os estímulos. O conhecimento sobre mudanças climáticas também pode modificar de forma significativa a percepção: se o indivíduo conhece os impactos e a causa da mudança, ele tende a perceber com mais facilidade, pois se sentem responsáveis e vulneráveis a este novo cenário climático (SHI et al., 2016; SHI; VISSCHERS; SIEGRIST, 2015). As crenças perante a comunidade científica, nas experiências de vida e nos conhecimentos sobre mudanças climáticas também tem forte influência na percepção, pois caso um indivíduo more em um local onde eventos extremos não são frequentes, associado a uma descrença na ciência e pouco conhecimento sobre o tema, a sua percepção sobre mudança climática será baixíssima. Caso estes elementos não sejam levados em consideração é possível que as estratégias de combate às mudanças climáticas não sejam sustentáveis e, apesar de um resultado inicialmente favorável, venham a falhar no futuro (ERIKSEN; BROWN, 2011).

1.3.4. Adaptação

A principal forma de trabalhar estes problemas seria através de planos de mitigação das mudanças climáticas (como a redução da emissão de gases de efeito estufa por meio de diversas propostas), porém, uma corrente de pensamento diferente vem ganhando força, a de adaptação ao possível novo clima (AYERS; FORSYTH, 2009; BASSETT; FOGELMAN, 2013; WISE et al., 2014). A ideia de estimular o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem a adaptação de uma população e não a mitigação das mudanças climáticas não é nova, mas é um conceito que ganhou força nos últimos anos, principalmente por dois motivos, de acordo com Bassett e Fogelman (2013): já ocorreram mudanças climáticas e a falha das políticas de mitigação. De acordo com o IPCC (2018b), o conceito de adaptação de um sistema humano é definido como a capacidade de ajuste ao clima atual ou futuro e aos seus efeitos, com o intuito de reduzir o seu efeito e/ou de explorar situações benéficas. Por isso, era vista como um meio de evitar o problema, pois o objetivo não é encontrar a solução para este problema e sim como conviver com ele (ADGER; ARNELL; TOMPKINS, 2005; AYERS; FORSYTH, 2009). Assim, em uma situação no qual uma determinada comunidade está adaptada aos eventos naturais, a sua resiliência a esses eventos naturais aumenta, visto que ela estará preparada para eles e pode se recuperar com maior eficiência.

Quando se conhece a população a ser trabalhada, suas necessidades e recursos (naturais e humanos), é possível desenvolver um plano eficiente e de longa duração (ADGER; ARNELL; TOMPKINS, 2005; BIAGINI et al., 2014; MARU et al., 2014; SMIT; WANDEL, 2006). O observado em diferentes lugares do mundo é um esforço conjunto de criação de estratégias de adaptação, como a elevação de casas em comunidades ameaçadas pelo aumento das marés, construção de jardins suspensos como forma de evitar prejuízos advindos de inundações, melhoria no sistema de informação e infraestrutura para avisos e resposta a eventos meteorológicos extremos e a criação de políticas que possam viabilizar e perpetuar projetos de adaptação (ANGUELOVSKI; CHU; CARMIN, 2014; AYERS; FORSYTH, 2009; BIAGINI et al., 2014).

Os centros urbanos são um caso complexo de se abordar. Dentro da paisagem urbana, é possível observar diferentes níveis sociais, ambientais e de vulnerabilidade que tornam difícil o processo de criação de programas de adaptação as mudanças climáticas. Para Anguelovski et al. (2014) a adaptação em um centro urbano não depende apenas de uma forte atuação política, mas também da conscientização e do aprendizado da questão a ser tratada e para isso, é necessário o desenvolvimento de pesquisas voltadas para o impacto da urbanização no clima local. Saber como tais impactos podem alterar eventos meteorológicos extremos e como a população tem reagido e se adaptando à estas novas condições, é o principal objetivo desta tese.

CAPÍTULO 2 PERCEPÇÃO, EVOLUÇÃO DO CLIMA E ADAPTAÇÃO¹

Este Capítulo explora o clima de Belém a partir de dois pontos de vista: meteorológico e humano. O primeiro trata da evolução do clima local a partir de dados da estação do INMET e analisa se o desenvolvimento da principal área urbana do município pode ter influenciado o clima. O segundo ponto de vista aborda como alguns habitantes da cidade percebem a evolução do clima local e como reagem a ele.

Estes dois pontos de vista são explorados a partir de metodologias distintas, porém complementares. Os questionários utilizados para avaliar a percepção climática podem ser validados através dos dados medidos na estação do INMET e a validade destes dados para toda Belém (visto que até o presente momento, esta foi a única estação meteorológica com dados consistentes e de fácil acesso a toda população) pode ser corroborada pelos questionários.

2.1. Materiais e Métodos

2.1.1. Área de Estudo

Com o objetivo de defender as terras brasileiras contra a invasão de holandeses, inglês e franceses, uma expedição comandada por Francisco Caldeira Castelo Branco seguiu pela costa norte do Brasil em busca de um lugar seguro para aportar (ABREU, 1998). As margens da baía do Guajará, Castelo Branco construiu um forte e assegurou para os portugueses a entrada fluvial para a floresta Amazônica (IBGE, 2020a), iniciando o que viria a ser Belém. Como o passar dos anos, esta pequena colônia foi ganhando mais importância, passando a atuar como um importante entreposto comercial para navios de diversas nacionalidades que vinham para a região negociar os produtos da floresta, e assim o vilarejo começou a se expandir para dentro e a sua população crescia.

Mesmo com o crescimento do povoado, as terras de Belém ainda pertenciam a coroa portuguesa. Apenas em 1627 foi iniciado o processo de demarcação e concessão da primeira porção de terra aos cuidados dos governadores locais. Concluída em 1708, o principal objetivo desta demarcação, conhecida como Primeira Légua Patrimonial (PLP, Figura 2.1), era de ordenamento e alinhamento urbano, um meio para desenvolver a cidade de forma organizada (CARDOSO; VENTURA NETO, 2013; SILVA et al., 2015).

¹ Este capítulo foi publicado pelo jornal *Urban Climate*. Referência: OLIVEIRA, J. V. *et al.* Urban climate and environmental perception about climate change in Belém, Pará, Brazil. *Urban Climate*, v. 31, p. 1–16, 2020. Ver Apêndice A.

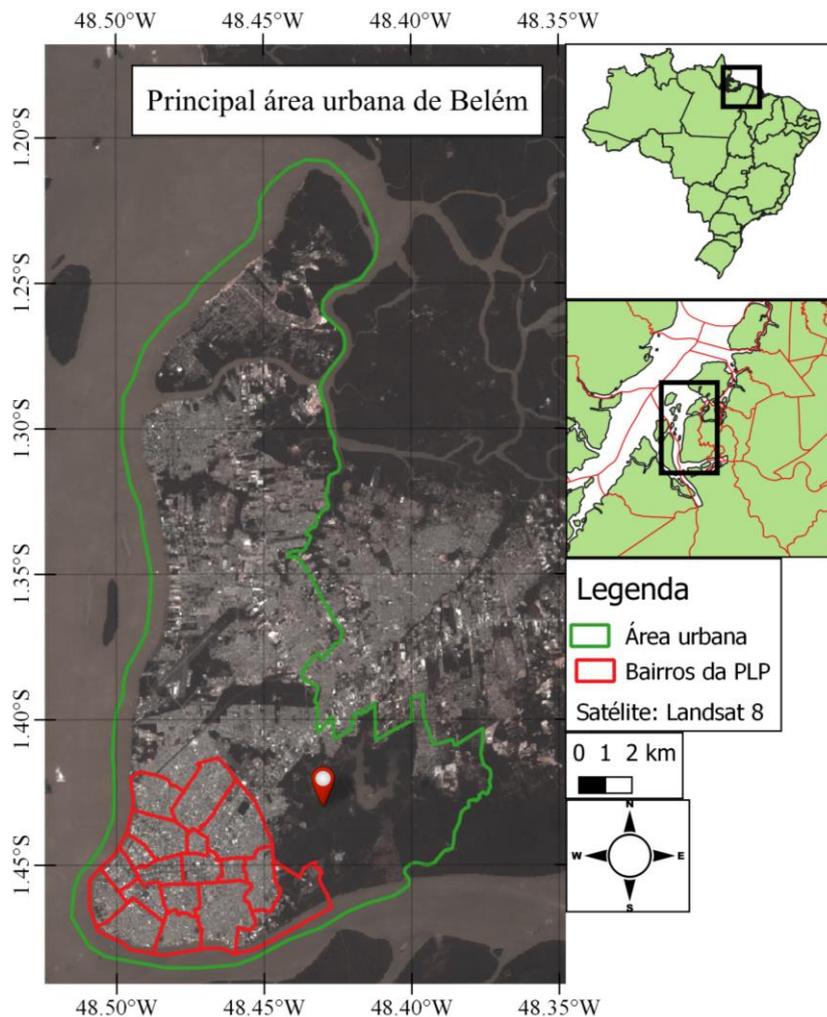
No final do século XIX teve início um dos capítulos mais importantes do desenvolvimento de Belém, o “ciclo da borracha”. Milhares de imigrantes chegaram a Belém, oriundos de inúmeros países e de outras cidades brasileiras. A economia belenense fervilhava com o “ouro negro” extraído da floresta e a cidade passou por um intenso desenvolvimento, quando ruas largas, praças e edifícios luxuosos foram construídos e/ou reformados, além de diversas melhorias na infraestrutura da cidade, como no sistema de esgoto, de transporte e financeiro. Assim, Belém passou a ser conhecida como a “Paris n’América”, uma cidade tecnologicamente avançada, bem estruturada e culturalmente ímpar (BRASIL ESCOLA, 2017; RICHARDS; VANWEY, 2015; WEINSTEIN, 1983).

A partir da metade do século XX, outros importantes processos começaram a modificar a cidade, a expansão para áreas de fazenda e a verticalização. A expansão da cidade se deu a partir da década de 1960, quando havia a necessidade de realocação da população que morava no centro, para a reestruturação urbana neste local. Com isso, diversos conjuntos habitacionais foram construídos ao norte do centro da cidade. Pouco antes desse movimento, na década de 1940 teve início o processo de verticalização dos prédios de Belém. Nesta etapa, a verticalização ocorreu apenas no centro da cidade, como forma de valorização do espaço urbano. Hoje, no entanto, é possível observar prédios cada vez mais altos em, praticamente, todos os bairros de Belém (OLIVEIRA, 2007).

O traçado da PLP foi extrapolado a muitos anos e, atualmente, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020a), Belém é lar para uma população estimada em 2019 de 1.492.745 pessoas (sendo que mais de 99% destas pessoas habitam a principal área urbana do município), possui uma área de 1.059,458 km² e uma densidade populacional de 1.315,26 habitantes/km² (Figura 2.1).

A percepção climática é única para cada indivíduo e capturar as informações em uma grande região exigiria um estudo maior sobre a dinâmica social, urbana e meteorológica da região e mais tempo para a coleta dos dados. Com isso em mente, este trabalho focou a análise da percepção na região onde a urbanização está mais desenvolvida e mais densa, ou seja, na região da PLP.

Figura 2.1- Área de estudo do Capítulo 2. O contorno em verde demarca a principal área urbana do município de Belém e em vermelho os bairros da PLP. O símbolo em vermelho e branco marca o local da estação do INMET.



Fonte: Autor.

2.1.2. Dados Observacionais

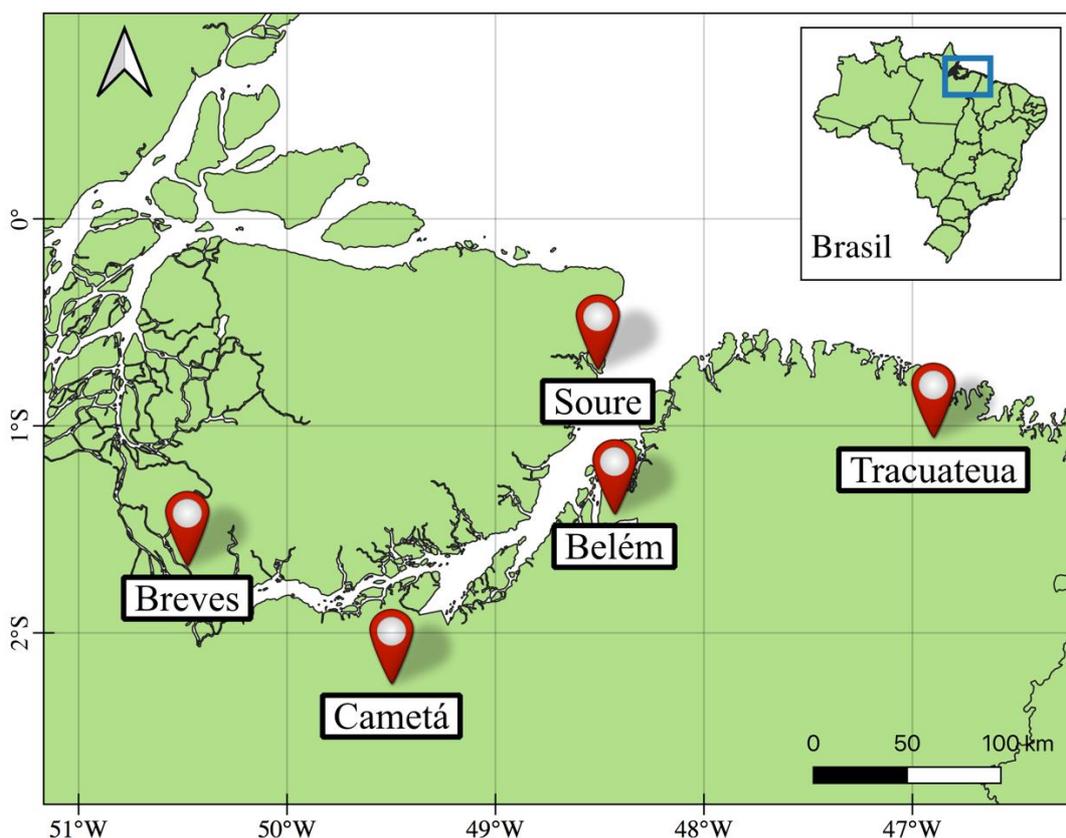
A estudo do clima de Belém foi feito com base em dados diários coletados em estação meteorológica do INMET no período de 1 de janeiro de 1980 a 31 de dezembro de 2017, totalizando 37 anos de dados, o suficiente para se caracterizar o clima de determinado local. Os parâmetros atmosféricos abordados foram: acumulado diário de precipitação (PRP), temperatura mínima (TMIN), máxima (TMAX) e média (TMED) do ar e velocidade horizontal do vento (VV). Os anos com mais de 10 dias com falhas de dados foram removidos das análises por poderem causar diferenças significativas nas análises, principalmente nos acumulados de PRP.

Estudar a influência da urbanização no clima analisando apenas os dados coletados na cidade de Belém não é suficiente para alcançar os objetivos deste estudo, visto que as

características de um centro urbano modificam a atmosfera de forma distinta, é necessário comparar os resultados encontrados para a cidade de Belém com os observados em cidades menos urbanizadas para se poder confirmar a existência do clima urbano.

Infelizmente, a rede de estações no norte do Brasil não é densa e encontrar uma estação meteorológica próxima à Belém e em uma área natural/rural não é possível. Dessa forma, foram escolhidas estações em municípios próximos, cuja área urbana é menor do que Belém e/ou cujas populações residem, em grande parte, em zonas rurais (IBGE, 2019). São estes: Breves, Cametá, Soure e Tracuateua (Figura 2.2). Os mesmos dados coletados em Belém e do mesmo período também foram coletados nestes quatro locais e foram tratados da mesma forma.

Figura 2.2- Localização das estações do INMET utilizadas.



Fonte: Autor.

Além destes dados observados, também foi calculada a Umidade Específica (q). Esta é uma outra forma de se estimar a quantidade de água presente na atmosfera. Ela corresponde a razão entre a massa de vapor d'água e a massa total do sistema e, diferente da Umidade Relativa, comumente utilizada em estudos meteorológicos, q varia apenas com a adição e/ou

remoção de água do sistema e não com alterações na temperatura do mesmo (DAVID; MCGREGOR; ENFIELD, 2016). Este parâmetro é calculado a partir da seguinte equação:

$$q = \frac{0.622 \cdot e}{p - 0.378 \cdot e} \cdot 1000 \quad (\text{Equação 3.6})$$

Onde p equivale a pressão atmosférica (em hPa) e e corresponde a pressão relativa de vapor d'água, que pode ser obtida a partir da relação da Umidade Relativa:

$$UR = \frac{e}{e_s} \cdot 100 \quad (\text{Equação 3.7})$$

Nesta equação, e_s é a pressão de saturação do vapor d'água e é calculada em função da temperatura do ar (T , em °C):

$$e_s = 6.108 \exp\left(\frac{17.27 \cdot T}{237.3 + T}\right) \quad (\text{Equação 3.8})$$

2.1.3. Questionário

A coleta de dados e análise da percepção foram realizados com base em um questionário desenvolvido com o objetivo de obter diferentes tipos de informações dos indivíduos entrevistados e seguiu as ideias discutidas por Capstick et al (2015), Taylor et al (2014) e Thompson (2017). O questionário consiste em 22 questões divididas em três partes, cada uma projetada para servir a um propósito: Parte I (7 perguntas): são perguntas relativas ao indivíduo, focadas em alguns aspectos que podem influenciar a percepção; Parte II (9 perguntas) – projetada para avaliar o conhecimento do(a) entrevistado(a) com relação a meteorologia e como ele(a) percebe o clima local; Parte III – caso o(a) participante tenha notado mudança climática, esta parte pretende verificar se e como ele(a) se adaptou a este novo cenário. As perguntas de cada parte são apresentadas na Tabela 2.1 apresentada a seguir.

Tabela 2.1- Questionário.

| <i>PARTE I</i> | | | |
|------------------|---|-----------|----------|
| 1 | Idade | | |
| 2 | Gênero | MASCULINO | FEMININO |
| 3 | Profissão | | |
| 4 | Você sempre viveu no mesmo lugar? | SIM | NÃO |
| 5 | Caso tenha se mudado, a quanto tempo isso ocorreu? (anos) | | |
| 6 | Principal meio de transporte utilizado | | |
| 7 | A maior parte do dia é em lugar aberto ou fechado? Com ou sem refrigeração? | | |
| <i>PARTE II</i> | | | |
| 1 | Para você, o que é Meteorologia? | CORRETO | ERRADO |
| 2 | Para você, o que é Mudança Climática | CORRETO | ERRADO |
| 4 | Você acha que o clima de Belém está mudando? | SIM | NÃO |
| 5 | Qual mudança você observou? | | |
| 6 | Qual a sua principal fonte de informação sobre mudança climática? | | |
| 7 | A quanto tempo você notou essa mudança? (Anos) | | |
| 8 | Você acha que essa mudança é natural ou culpa do ser humano? | NATURAL | HUMANO |
| 9 | Em qual semestre é mais fácil observar estas alterações? | PRIMEIRO | SEGUNDO |
| <i>PARTE III</i> | | | |
| 1 | Essa mudança causou algum impacto em sua vida? | SIM | NÃO |
| 2 | Se sim, qual impacto? | | |
| 3 | Você conseguiu se adaptar a esse novo cenário climático? | SIM | NÃO |
| 4 | Se sim, como você se adaptou? | | |
| 5 | Você acha que a população de forma geral sabe lidar com essa alteração? | SIM | NÃO |
| 6 | O que você acha que o governo precisa fazer com relação a essa alteração? | | |
| 7 | Você acha que Belém, a cidade, está preparada para esta alteração? | SIM | NÃO |
| 8 | Como Belém poderia se adaptar? | | |

A maioria das perguntas são binárias, sim ou não. Em outras perguntas, o entrevistado fornece uma lista de opções, são elas: Parte II, Questão 4: mais ou menos chuva, mais quente ou mais frio, maior ou menor velocidade do vento; Parte II, Questão 6: jornais, revistas, internet, televisão ou experiência de vida. As perguntas restantes são abertas, nas quais os entrevistadores apenas tomam nota das respostas. A validade das informações fornecidas pelos entrevistados foi avaliada de acordo com a relação dos resultados da estação meteorológica do INMET e com as respostas dos outros participantes (WHYTE, 1977).

Para as Questões 1 e 2 da Parte II, os conceitos de Meteorologia e Mudança Climáticas considerados corretos foram, respectivamente: a ciência que estuda e prevê a atmosfera, seus processos, elementos e interação (METOFFICE, 2020); e alterações no clima devido a ação direta e/ou indireta do homem que alteram a composição da atmosfera e que soma os efeitos as alterações climáticas naturais (UNCC, 2020). As respostas dos entrevistados foram consideradas corretas caso contenham ideias similares às apresentadas aqui, não sendo necessária total similaridade.

As entrevistas foram conduzidas por voluntários supervisionados pelo autor deste trabalho, os quais foram instruídos a não interferirem durante as respostas, apenas quando

fosse necessário esclarecer alguma dúvida e/ou informar as opções das perguntas com múltiplas escolhas. O conceito de mudança climática também foi informado para aqueles que não souberam definir corretamente para que as respostas seguintes pudessem ser as mais precisas possíveis.

As entrevistas ocorreram entre os dias 3 e 7 de setembro de 2018, no período matutino. Algumas entrevistas foram realizadas na semana anterior com o objetivo de testar o questionário, avaliando a sua fluidez, clareza e abrangência. Os entrevistados foram pessoas que estavam transitando pelas ruas dos bairros selecionados e que concordaram por livre e espontânea vontade em participar. Ao todo, 47 questionários foram aplicados em quatro bairros definidos a partir do Mapa de Tipologias Sócio – Ambientais.

2.1.4. Mapa de Tipologias Socio-Ambiental

Como mencionado anteriormente, a percepção pode ser influenciada por inúmeros elementos e varia de pessoa para pessoa. Então, a definição dos locais onde os questionários foram aplicados foi realizada com base em um mapa criado com o objetivo de caracterizar a população de Belém a partir de cinco índices, dos quais, quatro foram coletados durante o Censo de 2010 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, organizados em setores censitários, áreas contínuas e homogêneas do território nacional) e um por sensoriamento remoto. Os cinco índices são:

a) Arborização (I_{arb}):

Áreas verdes contribuem para a redução da temperatura de diferentes formas: menor exposição do solo para a radiação solar reduzindo a quantidade de energia armazenada na superfície; albedo maior em comparação ao asfalto/cimento, aumentando a reflexão da radiação solar; e mais vapor d'água liberado para a atmosfera a partir da evapotranspiração (processo de transpiração vegetal e animal somado a evaporação da água), o qual pode controlar a temperatura, evitando que os dias fiquem muito quentes e as noites muito frias, em outras palavras, regulando a amplitude térmica (DORIGON; AMORIM, 2013; JENERETTE et al., 2007; SANTOS; PIMENTEL, 2012).

Este índice foi coletado durante o Censo de 2010, ele representa o número de residências em cada setor censitário com ou sem arborização (considerado como árvores ou parte de árvores) na calçada, passeio ou canteiro central diretamente em frente a residência e foi definido pelas Equações 2.1 e 2.2.

$$X_{arb} = \frac{D_C - D_S}{D_C + D_S} \quad (\text{Equação 2.1})$$

$$I_{arb} = \frac{X_{arb} - X_{arb,min}}{X_{arb,max} - X_{arb,min}} \quad (\text{Equação 2.2})$$

A Equação 2.1 normaliza os dados do censo entre -1 (sem arborização no setor) e +1 (todas as residências tem arborização). “D_c” é o número de residências com arborização e “D_s” sem arborização. A Equação 2.2 utiliza o valor máximo e mínimo (“X_{arb,max}” e “X_{arb,min}”) para toda a cidade e o valor de um setor específico (“X_{arb}”) para gerar o índice normalizado entre 0 e +1 de um setor específico. Os cálculos seguintes seguem a mesma lógica deste índice.

b) NDVI (I_{ndvi}):

As informações do Censo sobre arborização contemplam apenas a vegetação em frente as residências, a vegetação no quintal das residências e no interior dos quarteirões não foi levada em consideração. O NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) foi utilizado como meio para sanar este problema. Inicialmente variando entre -1 e +1, o NDVI também foi normalizado entre 0 e +1 (Equação 2.3). Após isso, foi feita a média em cada setor censitário, para que todos os índices apresentem a mesma distribuição espacial.

$$I_{ndvi} = \frac{X_{ndvi} - X_{ndvi,min}}{X_{ndvi,max} - X_{ndvi,min}} \quad (\text{Equação 2.3})$$

O NDVI é um parâmetro calculado a partir de sensoriamento remoto, neste caso, utilizando os instrumentos a bordo do satélite Landsat 8. Lançado em 1972 pelo governo dos Estados Unidos da América, o projeto Landsat tem o objetivo de melhorar a qualidade do nosso ambiente, através da continua coleta de informações da superfície da Terra (<https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat>). Nos anos seguintes, novas versões do satélite foram lançadas em orbita, sendo o Landsat 5 o mais duradouro e o Landsat 8 o mais recente (o Landsat 9 tem previsão de lançamento para 2020). Neste Capítulo, foram empregadas imagens do dia 27 de julho de 2013, obtidas pelo Landsat 8.

O NDVI é utilizado para o monitoramento da vegetação e é produzido pela combinação das bandas nos canais vermelho (VER – refletido por nuvens, solo nu, neve,

edificações) e infravermelho próximo (NIR – refletido pela vegetação, principalmente por folhas com maior atividade fotossintética) (Equação 2.4).

$$NDVI = \frac{(NIR-VER)}{(NIR+VER)} \quad (\text{Equação 2.4})$$

Este é um dos índices de vegetação mais utilizados ao redor do mundo (ALFACE et al., 2019; CONDORELLI et al., 2018; GANDHI et al., 2015; TUCKER, 1979). Ele varia de -1 a +1, sendo que quanto mais saudável e abundante for a vegetação, mais próximo a +1 será o NDVI, valores positivos e próximos a zero indicam vegetação esparsa e zero e valores negativos são indicativos de solo nu, edificações, areal, terreno rochoso, etc. Neste estudo, o NDVI foi utilizado no cálculo da área verde média em cada setor censitário do principal núcleo urbano do município de Belém.

Este índice completa o anterior (I_{arb} , Equação 2.2), porém ele possui origem e escala diferente e se for integrado ao índice de arborização o resultado não refletirá as condições de vegetação de Belém. Por este motivo, o I_{ndvi} é calculado como um índice novo.

c) Renda (I_{ren}):

A renda média per capita de cada setor foi calculada com base no salário mínimo de 2010 (R\$510,00). Ela foi utilizada para representar diferentes informações a respeito dos habitantes: a) regiões de alta renda, em geral, possuem mais equipamentos eletrônicos e mais veículos, emitindo assim mais calor para a atmosfera. Martilli (2014) mostrou que apenas o uso de ar condicionado pode elevar a temperatura do ar fora das construções em 2°C; b) bairros de baixa renda são mal organizados, as casas não tem separação entre elas, dificultando a circulação do vento e mantendo o ar quente aprisionado (DU et al., 2017; HEISLER, 1990; HONG; LIN, 2015; KUBOTA et al., 2008); c) casas de baixa renda podem ser construídas com materiais de baixa qualidade, que armazenam e emitem muito calor de volta para a atmosfera (HARLAN et al., 2006; SANTOS; PIMENTEL, 2012); d) a vegetação em áreas de alta renda tendem a ser mais cuidadas e mais diversas, aumentando a evapotranspiração local (HARLAN et al., 2006; JENERETTE et al., 2007); e) os habitantes de alta renda têm acesso a diferentes fontes de informação e a melhor educação, fato que pode influenciar positivamente a percepção (LEE et al., 2015; SAVOLAINEN, 2016; SIMÕES et al., 2017). Outros elementos como o trabalho desenvolvido, o tipo de transporte utilizado, o

tempo em ambiente fechado e aberto também pode estar diretamente relacionado com a renda.

O índice que representa este fator é calculado pela Equação 2.5:

$$I_{ren} = \frac{X_{ren} - X_{ren,min}}{X_{ren,max} - X_{ren,min}} \quad (\text{Equação 2.5})$$

A Equação 2.5 segue os padrões apresentados anteriormente (Equações 2.3 e 2.2). “ X_{ren} ” é a renda média de um setor específico, “ $X_{ren,min}$ ” e “ $X_{ren,max}$ ” são a renda média mínima e máxima, respectivamente, de todos os setores.

d) Densidade Demográfica (I_{den}):

O impacto da densidade no clima não é, necessariamente, direto. Enquanto regiões desenvolvidas com alta densidade podem gerar menos gases de efeito estufa, devido a maior utilização do transporte público e casas menores, áreas de alta densidade em locais menos desenvolvidos podem ser sinônimos de locais com maior tráfego de veículos particulares e maior desorganização do espaço (como a geometria das ruas e o espaçamento entre as casas), contribuindo ainda mais para o efeito de mudança climática (CUI et al., 2016; FLATOW, 2019; MALLICK; RAHMAN, 2012; RIBEIRO; RYBSKI; KROPP, 2019).

No caso de Belém e, mais especificamente, da PLP, a baixa eficiência do transporte público e densidade elevada, principalmente, na periferia (região mais carente), torna a questão da densidade demográfica maléfica para o clima. Por este motivo, o I_{den} (Equação 2.6) foi invertido e quanto mais próximo a zero, maior a densidade.

$$I_{den} = 1 - \frac{X_{den} - X_{den,min}}{X_{den,max} - X_{den,min}} \quad (\text{Equação 2.6})$$

Onde “ X_{den} ” é a densidade (habitantes/km²) em cada setor e “ $X_{den,min}$ ” e “ $X_{den,max}$ ” é a densidade mínima e máxima registrada.

e) Verticalização (I_{ver}):

Construções baixas possuem menos concreto, menor área de absorção de radiação solar e menor impacto no escoamento do vento. Locais com construções altas, porém, conseguem armazenar e emitir mais radiação de volta para a atmosfera e podem reduzir

significativamente a velocidade do vento, aprisionando o ar quente dentro destas regiões (GRIMMOND, 2007; GÜLTEN; AKSOY; ÖZTOP, 2016; PERINI; MAGLIOCCO, 2014).

O cálculo deste índice foi feito em duas partes: primeiramente, a diferença entre o número de casas e prédios foi normalizada entre -1 (mais prédios) e +1 (mais casas) pela Equação 2.7; em seguida foi feita a normalização entre zero e +1 (Equação 2.8).

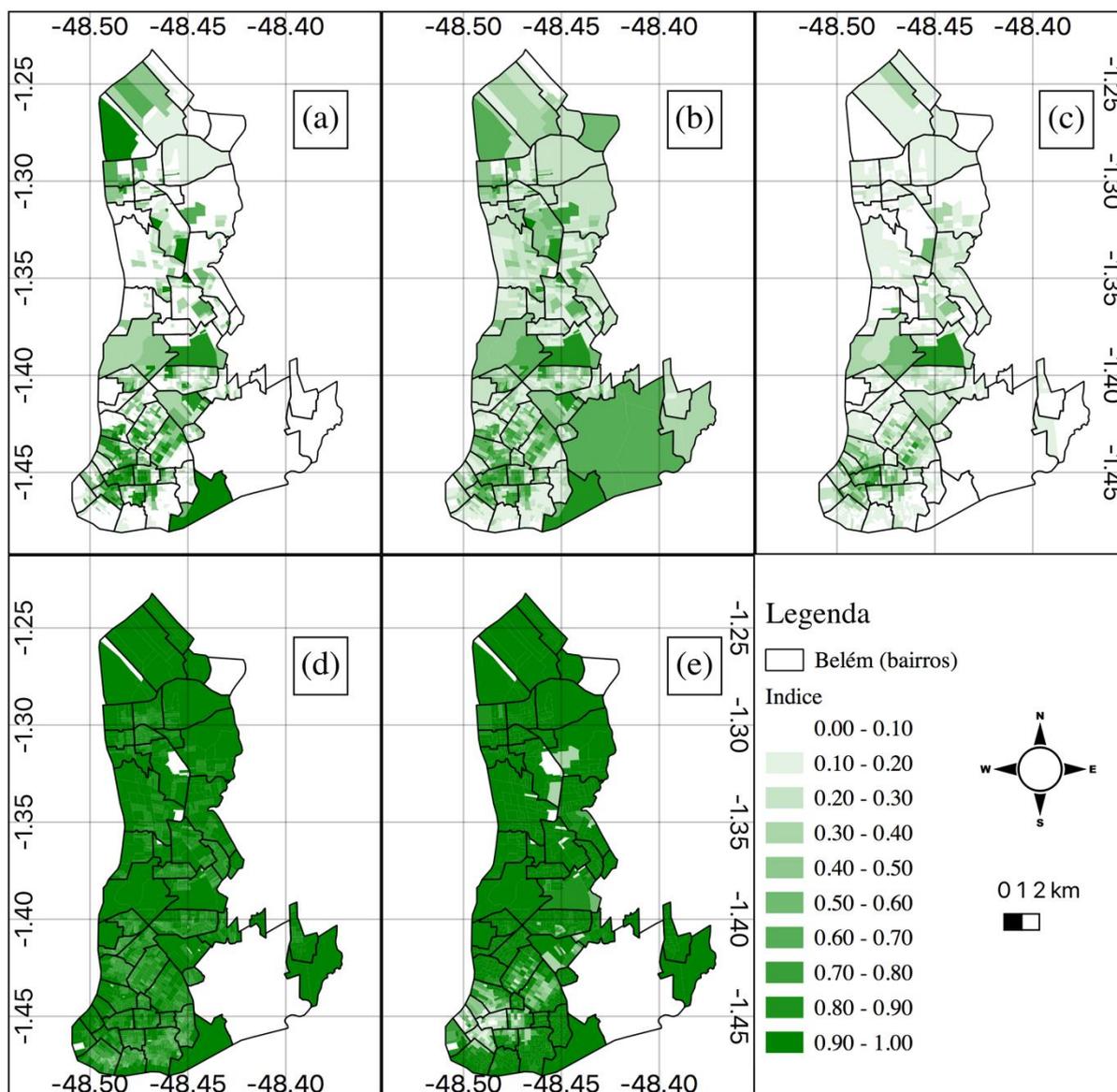
$$X_{ver} = \frac{D_{CA} - D_{AP}}{D_{CA} + D_{AP}} \quad (\text{Equação 2.7})$$

$$I_{ver} = \frac{X_{ver} - X_{ver,min}}{X_{ver,min} - X_{ver,max}} \quad (\text{Equação 2.8})$$

Onde “D_{CA}” e “D_{AP}” são o número de domicílios do tipo casa e prédios, respectivamente, em cada setor.

A espacialização dos cinco índices é exibida na Figura 2.3. A normalização entre 0 e +1 foi pensada do ponto de vista climático, um valor mais próximo a zero indica uma situação mais prejudicial ao clima, uma situação que contribui para o processo de mudança climática, enquanto que quanto mais próximo a +1, menor será a contribuição para este processo. Focando na região da PLP, a área alvo deste capítulo, observa-se que o centro desta área é dominado por setores bem vegetados, com alta renda média, baixa densidade e verticalizado, e o entorno dessa área é composto por residências com pouca vegetação, baixa renda, maior densidade demográfica e principalmente residências do tipo casa. Alguns setores aparecem completamente em branco (Figura 2.3.d e 2.3.e), estes lugares não possuem dados.

Figura 2.3- Distribuição espacial do índice de arborização (a), NDVI (b), renda (c), densidade (d) e verticalização (e).



Fonte: Autor.

Cada um destes índices influencia de forma diferente a atmosfera, por esse motivo foi feita a média ponderada. O peso atribuído a cada um destes índices foi definido com base na literatura e nos conhecimentos empíricos dos pesquisadores sobre Belém e, principalmente, sobre a PLP, local onde este estudo foi realizado. Estudos mostraram que a intensidade das ilhas de calor pode ser reduzidas em 10°C apenas com vegetação (ALEXANDRI; JONES, 2008; GUO et al., 2015; TAN; LAU; NG, 2016), logo, I_{veg} foi considerado o mais importante, recebendo peso 4. Como o I_{ndvi} é um complemento ao I_{veg} , ele também recebeu peso 4. A renda média, em muitos casos, não tem um impacto direto sobre o clima, como é o caso da

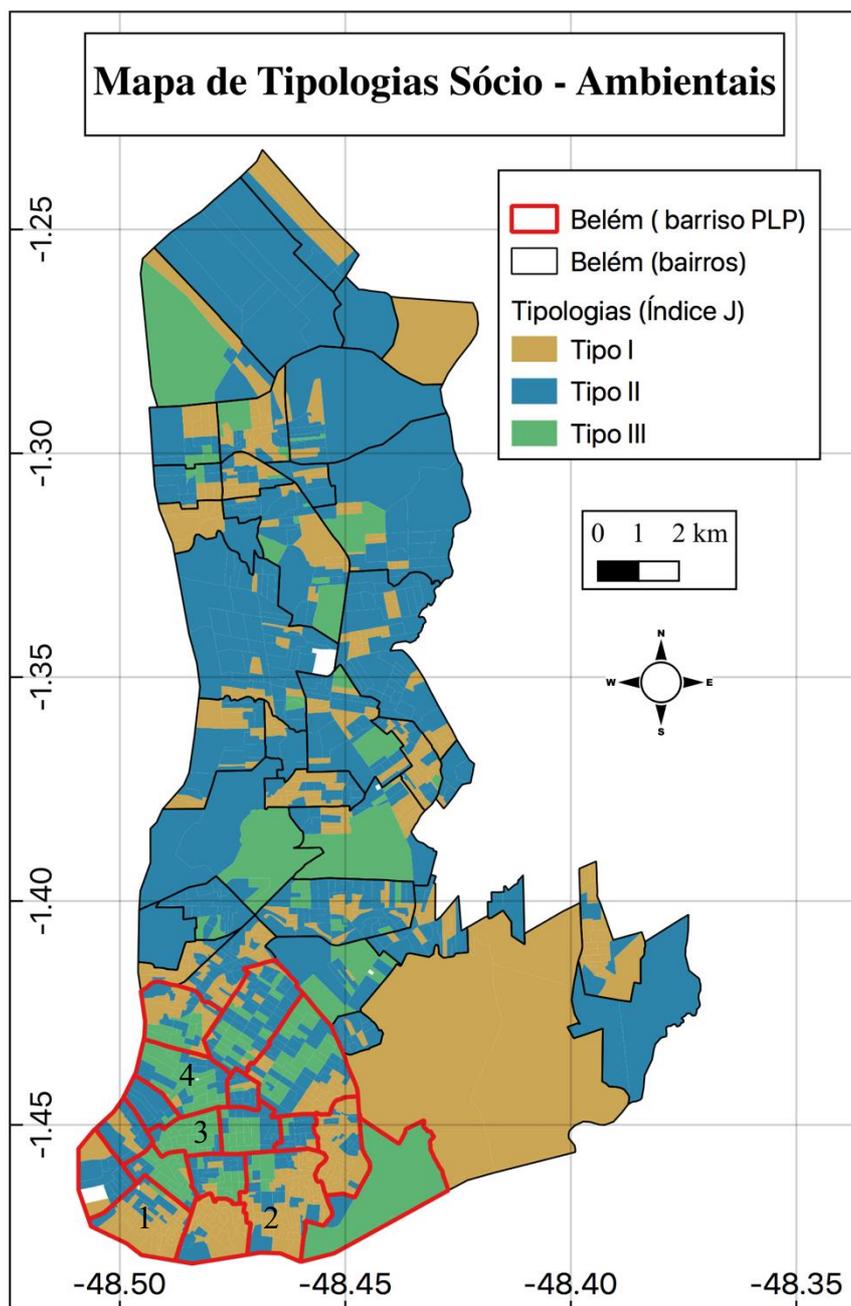
vegetação, e na periferia da PLP muitas casas são construídas com madeira, material com menor capacidade calorífica, ou seja, aquece menos do que o concreto, porém, a renda ainda interfere na organização do bairro (tamanho das ruas, distanciamento entre as casas, etc.), vegetação e na vida das pessoas e por estes motivos, este foi considerado o segundo índice mais importante, recebendo peso 3 (HUANG; ZHOU; CADENASSO, 2011). A densidade demográfica na PLP não varia de forma muito significativa, porém é possível observar que há diferença entre o centro e a periferia desta área, portanto foi atribuído peso 2 a este índice. Por fim, não apenas na PLP, mas em toda Belém não se observam os chamados “cânions urbanos”, longos corredores formados por prédios altos (KUSAKA; KIMURA, 2004; NAKATA-OSAKI; CRISTINA; SOUZA, 2016; PERINI; MAGLIOCCO, 2014), os prédios estão em um padrão mais espalhados e em áreas com vegetação, assim, este índice foi considerado o menos importante com peso 1. A combinação dos índices e seus pesos pela Equação 2.9 resulta no Índice J.

$$J = \frac{4*I_{arb}+4*I_{ndvi}+3*I_{ren}+2*I_{den}+1*I_{ver}}{14} \quad (\text{Equação 2.9})$$

O Índice J foi dividido em três categorias e como ele é a média dos outros cinco parâmetros, o valor máximo registrado para J foi de 0.87. Assim, as três tipologias definidas foram: **Tipo I (0 < J ≤ 0.29)**, locais que predominam baixa vegetação, baixa renda, densidade elevada e mais prédios (apesar de que no caso da PLP e de Belém, estes setores são compostos por casas, porém como os outros índices foram baixos, o valor de J também foi baixo); **Tipo II (0.29 < J ≤ 0.58)**, setores mistos, com índices, no geral, moderados; e **Tipo III (0.58 < J ≤ 0.87)**, onde há mais vegetação, alta renda, baixa densidade e mais casas (no caso PLP, estes setores também são onde estão localizados os prédios mais altos).

A espacialização do Índice J é exibida na Figura 2.4, o Mapa de Tipologias Sócio – Ambientais. Os locais para aplicação do questionário foram escolhidos com base neste mapa (marcados no mapa por números). Foram selecionados os bairros do Jurunas (1) e Guamá (2) do Tipo I e Nazaré (3) e Umarizal (4) do Tipo III. Com isso, foi possível analisar se a percepção variou de acordo com as características das amostras da população.

Figura 2.4- Mapa de tipologias construído a partir do Índice J para a principal zona urbana do município de Belém. Tipo I (marrom): $0 < J \leq 0.29$; Tipo II (azul): $0.29 < J \leq 0.58$; Tipo III (verde): $0.58 < J \leq 0.87$. Os números marcam os locais onde os questionários foram aplicados: Jurunas (1), Guamá (2), Nazaré (3) e Umarizal (4).



2.2. Resultados

2.2.1. Caracterização da Amostra da População

A Tabela 2.2 apresenta algumas características dos entrevistados de acordo com a tipologia dos bairros. Os entrevistados foram pessoas de diferentes idades, desde 20 até 50 anos, e de ambos os sexos. No entanto, as participantes do sexo feminino nos locais do Tipo I demonstraram menor interesse em participar.

Tabela 2.2- Caracterização da amostra de acordo com a tipologia (Tipo I e Tipo III).

| <i>a) Idade</i> | <i>Tipo I</i> | <i>Tipo III</i> | <i>b) Sexo</i> | <i>Tipo I</i> | <i>Tipo III</i> |
|-----------------|---------------|-----------------|------------------|---------------|-----------------|
| 20-25 | 6 | 5 | Feminino | 6 | 11 |
| 25-30 | 4 | 5 | Masculino | 19 | 11 |
| 30-35 | 4 | 4 | Total | 25 | 22 |
| 35-40 | 6 | 2 | | | |
| 40-45 | 3 | 2 | | | |
| 45-50 | 2 | 4 | | | |
| Total | 25 | 22 | | | |

De acordo com o Mapa de Tipologias, os habitantes do Tipo I seriam pessoas com nível de educação baixo, sendo essa hipótese extraída do questionário. Esta parte da amostra é composta por trabalhadores autônomos (como carpinteiros e mecânicos automotivos), vendedores, feirantes, motoristas, em outras palavras, profissões que não demandam um nível educacional elevado. Estas pessoas passam a maior parte do dia em locais abertos (52% de participantes do Tipo I afirmaram esta informação) ou em local fechado sem refrigeração (28% do total) e 48% utilizam transporte público no dia a dia. A maioria dos entrevistados deste tipo (80%) também informaram terem morado a vida toda, ou ao menos nos últimos 10 anos, no local da entrevista ou no mesmo bairro.

Por outro lado, a amostra dos habitantes do Tipo III é composta por arquitetos, engenheiros de diversas especialidades, professores, dentistas, entre outros. São pessoas que tiveram a oportunidade de adquirir ensino superior e possuem renda per capita maior, em relação ao Tipo I, como era esperado pelo Mapa. Grande parte deles passa a maior parte do tempo em local fechado com refrigeração (77%), apenas 9% em local aberto e a maioria possui transporte privado (90%). Além disso, muitos se mudaram para o local de estudo nos últimos 10 anos (59%), alguns vindo de outros estados do Brasil.

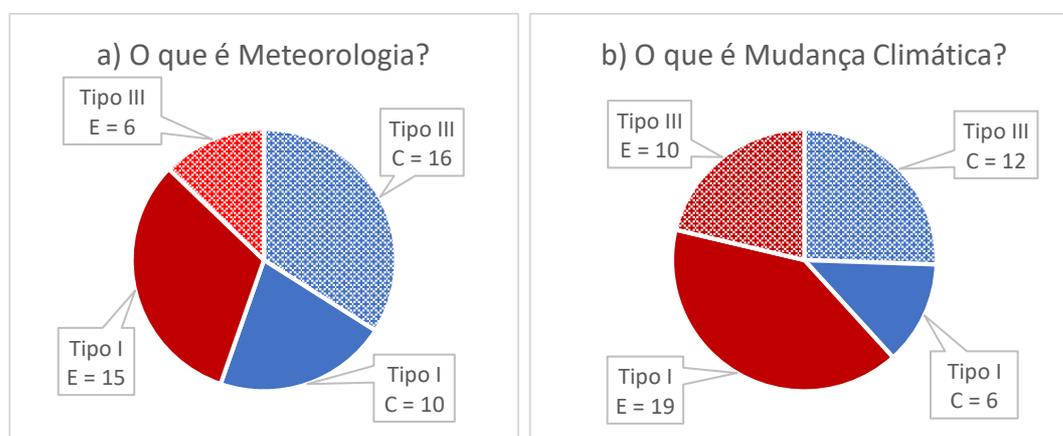
2.2.2. Percepção e o Clima de Belém

2.2.2.1. Percepção Atmosférica

Ao serem perguntados sobre a definição de meteorologia e mudança climática, a maioria dos participantes do Tipo I não souberam definir corretamente os dois conceitos (Figura 2.5). Os entrevistados do Tipo III souberam definir com maior precisão o conceito de Meteorologia, porém o número de pessoas desta tipologia que não souberam a definição de Mudança Climática foi consideravelmente maior. A principal resposta para meteorologia observada em ambos os tipos foi “previsão de tempo” e no caso da mudança climática foi uma simples variação de tempo (“ontem estava frio e hoje está quente”).

Este resultado exibe uma clara falta de conhecimento sobre questões básicas para a meteorologia e, como discutido anteriormente, pode impactar a percepção destas pessoas para estes elementos (SHI et al., 2016). No entanto, tal situação é compreensível, afinal, as vidas destas pessoas não dependem diretamente do tempo e do clima (apesar de poder impactar de alguma forma), esses elementos fazem parte de suas rotinas e eles não sentem a necessidade de aprender mais sobre estes temas (BATTAGLINI et al., 2009; SPENCE et al., 2011).

Figura 2.5- Quantidade de respostas corretas (C, azul) e erradas (E, vermelho) nos bairros Tipo I (sólido) e Tipo III (pontilhado).



A pergunta seguinte foi se o participante percebeu mudança no clima de Belém, porém as respostas para a definição de Mudança Climática demonstram uma clara falta de conhecimento sobre a diferença entre tempo e clima, logo, foi necessário que os entrevistadores explicassem a diferença entre estes conceitos para evitar respostas imprecisas e/ou erradas para a pergunta atual.

A grande maioria dos entrevistados perceberam alguma mudança no clima de Belém, 90% do Tipo I e 86% do Tipo III (Tabela 2.3). Aqueles que não perceberam alteração no

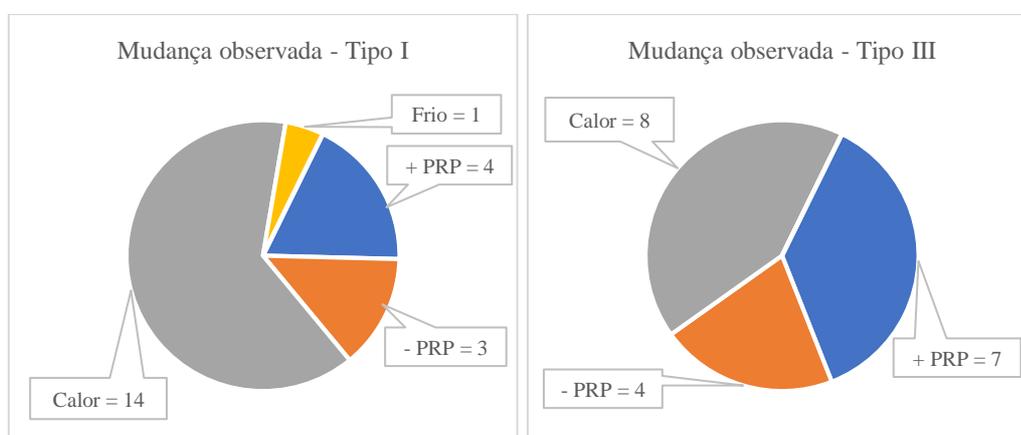
clima trabalhavam em locais fechados e este pode ter sido o principal motivo para esta resposta, pois o trabalho nesse tipo de ambiente pode desconectar a pessoa do ambiente externo, tornando-a insensível as variações externas, especialmente se houver sistema de refrigeração no local (TAYLOR; DESSAI; BRUINE DE BRUIN, 2014). Como o objetivo deste trabalho envolve percepção e adaptação a mudança climática, a participação das pessoas que responderam negativamente a esta pergunta terminou neste ponto.

A maioria dos entrevistados (Tipo I e Tipo III) notou que o clima de Belém está ficando cada vez mais quente (Figura 2.6). A segunda alteração mais notada foi aumento da precipitação, seguida por redução da precipitação, ou seja, de acordo com os participantes, a variação da precipitação em Belém tem aumentado. Apenas um entrevistado respondeu que Belém está mais fria e como esta resposta foi incomum, os entrevistadores perguntaram o motivo da pessoa achar isso, porém ela não soube informar um motivo. Uma possibilidade é a alteração física no local de moradia/trabalho, favorecendo a circulação de vento e reduzindo a temperatura do ar. Além destas mudanças, outras duas opções relativas à velocidade do vento também foi fornecida para os participantes, contudo ninguém percebeu alterações no vento e por isso estas opções não constam na Figura 2.6.

Tabela 2.3- Número de respostas positivas e negativas com relação a mudança climática.

| <i>O clima está mudando?</i> | <i>Tipo I</i> | <i>Tipo III</i> |
|------------------------------|---------------|-----------------|
| <i>Sim</i> | 23 | 19 |
| <i>Não</i> | 2 | 3 |
| <i>Total</i> | 25 | 22 |

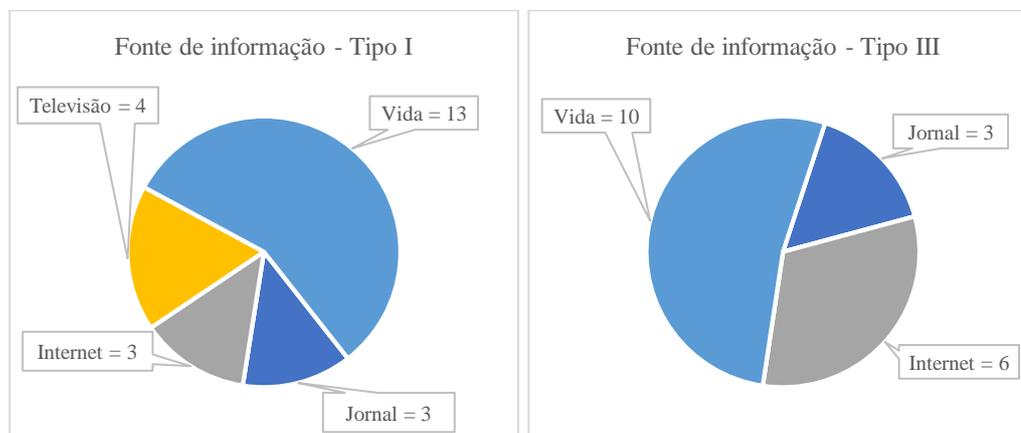
Figura 2.6: Número de entrevistados que observaram uma determinada mudança no clima em cada tipologia. Itens sem respostas foram omitidos desta figura.



Os entrevistados perceberam estas mudanças, principalmente, por meio de experiências de vida, 57% do Tipo I e 53% do Tipo III (Figura 2.7). No tópico de caracterização da amostra, os participantes do Tipo I informaram ter morado no mesmo local durante a maior parte de suas vidas, logo, eles presenciaram diversas mudanças na paisagem ao seu redor, como redução da vegetação, asfaltamento das vias e canalização de rios. Estas mudanças de paisagem podem influenciar significativamente as condições atmosféricas (CHAN; CHAU; LEUNG, 2017; SANTAMOURIS; KOLOKOTSA, 2015) e os moradores perceberam uma redução no conforto ambiental devido ao aumento da temperatura. Por este motivo, os habitantes do Tipo I acreditam no ser humano como único responsável pelas mudanças climáticas percebidas (68% do Tipo I e 58% do Tipo III) ou tem responsabilidade dividida com natureza (4.5% e 31.6% do Tipo I e III, respectivamente). Para o restante, apenas a natureza é responsável pelas mudanças.

Outras importantes fontes de informação para os entrevistados foram jornais e internet, em locais do Tipo III, e apenas em locais do Tipo I a televisão foi mencionada como fonte de informação. Em locais onde a paisagem não sofreu muitas alterações, estes diferentes meios de comunicação são fundamentais para aumentar a percepção sobre mudanças climáticas das pessoas, através do noticiário de eventos meteorológicos (secas, tempestades, ondas de calor), cenários de mudanças climáticas e seus impactos nos diferentes locais do mundo (BOYKOFF; BOYKOFF, 2007; HARRISON, 1982; HOWE et al., 2012). Para os habitantes do Tipo III, a facilidade de acesso à internet por meio de celulares, *notebooks* e *tablets* proporciona para este meio de comunicação uma posição de maior destaque na influência da percepção desta parcela da amostra da população estudada.

Figura 2.7- Principais fontes de informação sobre o clima.

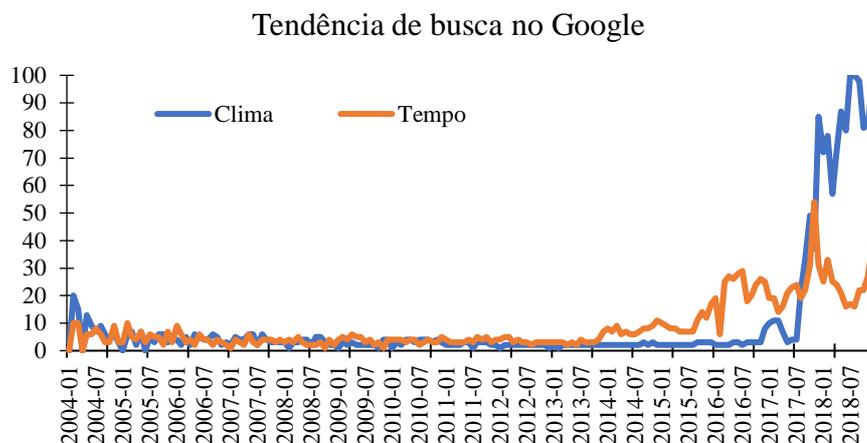


A maioria dos entrevistados, de ambas tipologias, começou a notar mudanças no clima a partir de 5 – 10 anos atrás. Alguns eventos meteorológicos importantes ocorreram neste período, como a redução na temperatura máxima (temperatura diurna mais amena) associada a um evento de La Niña em 2010 (NOAA, 2019) que pode ter deixado as pessoas mais sensíveis ao aumento da temperatura no ano seguinte e ativando a percepção atmosférica. Ademais, diversos tornados e furacões causaram grandes danos na América do Norte e ondas de calor causaram até mortes na Europa durante esta última década (WMO, 2019). Além de fenômenos meteorológicos, em 2015 e 2017 ocorreram as COPs (Conferência das Partes das Nações Unidas) 21 e 23, importantes eventos onde foram discutidos os termos do Acordo de Paris (centrado no combate às mudanças climáticas) e que receberam grande atenção dos meios de comunicação, assim como os fenômenos meteorológicos mencionados antes. A Figura 2.8 exibe como houve um aumento na busca pelos termos “clima” e “tempo” no Google, exatamente durante esta última década.

Capstick et al. (2015) apresentaram resultados similares, mas para os Estados Unidos da América. Os autores apontaram que importantes eventos, ou até filmes, podem aumentar a percepção da população com relação a mudanças climáticas. No entanto, o oposto também pode ocorrer, pois casos como o “*Climategate*” (no qual uma troca de correspondência eletrônica entre importantes pesquisadores sobre mudança climática vazou para o público, revelando comportamentos questionáveis com relação à manipulação de informação) podem espalhar ceticismo entre a população e alterar a percepção (GRUNDMANN, 2013; LEISEROWITZ et al., 2013).

Além de começarem a perceber nos últimos 10 anos, os entrevistados também informaram que o período mais fácil de perceber tais alterações é o segundo semestre (Tabela 2.4). Durante esta época do ano, os principais sistemas de grande escala, a Zona de Convergência Intertropical, ZCIT, e a Zona de Convergência do Atlântico Sul, ZCAS (SANTOS; LUCIO; SILVA, 2017), não estão influenciando as condições atmosféricas de Belém, mas sim elementos locais, como a urbanização e a diferença de temperatura entre o rio e a cidade (GERMANO et al., 2017; MATOS; COHEN, 2016).

Figura 2.8- Tendência de busca (em todo estado do Pará) pelos termos "clima" (azul) e "tempo" (laranja).



Fonte: Google Trends (2019)

Tabela 2.4- Semestre no qual os entrevistados perceberam com maior facilidade as mudanças mencionadas.

| <i>Semestre</i> | <i>Tipo I</i> | <i>Tipo III</i> |
|------------------------|----------------------|------------------------|
| <i>Primeiro</i> | 2 | 6 |
| <i>Segundo</i> | 16 | 10 |
| <i>Ambos</i> | 4 | 3 |
| <i>Total</i> | 22 | 19 |

2.2.2.2. *Evolução do Clima*

Neste tópico será analisado se as mudanças observadas pelos participantes estão de acordo com o registrado pela estação meteorológica do INMET, afinal, a maioria deles não percebeu tais alterações com base em dados científicos.

A Figura 2.9 exibe a comparação entre a estação meteorológica de Belém e a média das outras quatro estações. O resultado para Belém indica uma possível influência da urbanização na evolução do clima: a temperatura do ar está aumentando (Figura 2.9.a, 2.9.b e 2.9.c) devido as mudanças no balanço de energia causadas pelos diferentes materiais de construção presentes na área urbana (COUTTS; BERINGER; TAPPER, 2007; DEBBAGE; SHEPHERD, 2015; STEWART; OKE, 2012; TAHA, 1997; WENG, 2009); e redução da VV (Figura 2.9.e) devido ao aumento da rugosidade da superfície, o qual também afeta o transporte de calor, umidade e poluição para fora e para dentro da cidade (ALIABADI et al., 2017; ARNFIELD, 2003; VARQUEZ; NAKAYOSHI; KANDA, 2014).

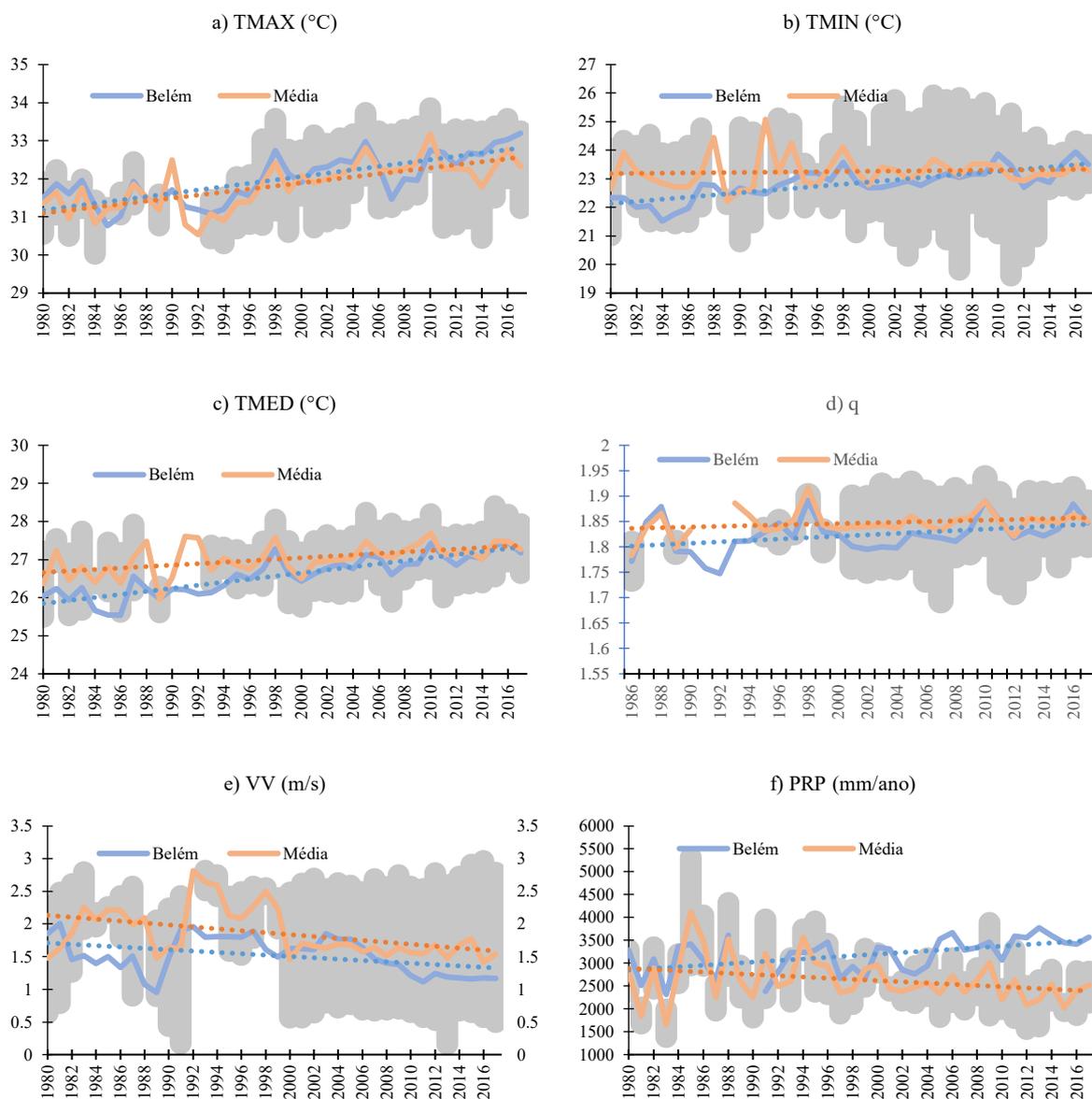
A Umidade Específica (q) apresentou tendência de aumento nos anos estudados. O esperado para um cenário urbano é a redução da umidade atmosférica, devido à redução de

áreas verdes (implicando na menor taxa de evapotranspiração) e aumento da temperatura, porém alguns fatores podem estar contribuindo para o aumento da umidade específica em Belém. De acordo com dados na Administração de Oceano e Atmosfera dos Estados Unidos (NOAA), o Oceano Atlântico Equatorial Sul tem apresentado tendência positiva de temperatura da superfície do mar nos últimos anos (NOAA, 2020), ou seja, mais umidade é enviada para a atmosfera e como Belém sofre influência direta deste oceano, o aumento de q pode ter sido causado por este fator. Além disso, o aumento da temperatura (como o observado em Belém) também foi relacionado com aumento na pressão relativa do vapor d'água, implicando no aumento de q (HUANG; NI; GRIMMOND, 2019; ISAAC; VAN WIJNGAARDEN, 2012).

Estes resultados estão de acordo com a percepção da parcela da população entrevistadas de ambas as tipologias, porém as outras estações também estão experimentando tendências similares, mesmo estando localizadas em áreas urbanas menores do que Belém.

O uso/cobertura do solo na Amazônia Oriental mudou, a floresta natural foi removida para dar lugar a agricultura, pastagem e urbanização (HANSEN et al., 2008; VALERIANO et al., 2012). Apesar de ainda haver discussão sobre o impacto destas mudanças na Amazônia como um todo, os resultados dos modelos indicam aumento da temperatura e redução da umidade na Amazônia Oriental (GANDU; COHEN; SOUZA, 2004; MARENGO et al., 2018; SANTOS; LUCIO; SILVA, 2015; SATYAMURTY et al., 2010; VICTORIA et al., 2002). As tendências observadas em Belém e nas outras estações podem estar sendo forçadas por estas alterações no uso/cobertura do solo, porém, enquanto a PRP está reduzindo na média das estações, concordando com Gandu et al (2004) e Marengo et al (2018), em Belém está aumentando (Figura 2.9.f).

Figura 2.9- Média anual de: a) temperatura máxima (TMAX, °C); b) temperatura mínima (TMIN, °C); c) temperatura média (TMED, °C); d) umidade específica (q); e) velocidade do vento (VV, m/s); e f) acumulado anual de precipitação (PRP, mm/ano). A linha sólida representa o valor anual e a pontilhada a tendência para Belém (azul) e a média das outras estações (laranja). O sombreado cinza marca o intervalo entre o valor máximo e mínimo observado em todas as estações, exceto Belém.



Analisando as informações em cada semestre (Tabela 2.5, os gráficos são apresentados no Apêndice B) observa-se que a temperatura do ar (TMAX, TMIN e TMED) está aumentando em ambos os semestres, tanto em Belém, quanto na média das outras estações. No caso de Belém, o aumento no segundo semestre é mais intenso do que no primeiro (indicado pelo valor de inclinação da reta, o número multiplicador de “x”), podendo colaborar para a maior percepção de mudança climática neste semestre. Além disso, nota-se como a TMAX é maior no segundo semestre (indicado pelo valor a direita do “x”), devido a

redução da nebulosidade e aumento da incidência de radiação solar na superfície, e a TMIN é maior no primeiro semestre, consequência da manutenção de uma temperatura mais elevada pela quantidade maior de vapor d'água na atmosfera durante este semestre (PYRGOU; SANTAMOURIS; LIVADA, 2019; SAYEMUZZAMAN; MEKONNEN; JHA, 2015). Essa variação entre TMAX e TMIN relativa a qual semestre cada uma é maior contribui para que a TMED não seja diferente entre os dois períodos do ano. A tendência de q também segue o observado no anual, aumentando em ambos os semestres, provavelmente devido ao aumento da temperatura do ar e/ou advecção de umidade do Oceano Atlântico (SATYAMURTY; COSTA; MANZI, 2013). A VV segue o padrão esperados pela Figura 2.9 de tendência negativa (marcada pela cor vermelha) em ambos os períodos do ano.

Novamente, a tendência de PRP em Belém, nos dois semestres, é de aumento e nas outras estações é de redução, com parâmetros da reta de regressão linear similares entre as séries de dados. Todas as estações encontram-se em latitudes próximas e são afetadas pelos mesmos sistemas meteorológicos ao longo do ano (ZCIT, ZCAS, Linhas de Instabilidade, Complexos Convectivos de Mesoescala, etc.), logo, o primeiro semestre é o mais chuvoso em todos as séries temporais (OLIVEIRA et al., 2018; OLIVEIRA; VITORINO; SÁ, 2015; FERREIRA et al., 2015; MORAES et al., 2015; SODRÉ et al., 2015).

Tabela 2.5- a) Equação da linha de tendência de cada variável: temperatura máxima (TMAX), mínima (TMIN) e média (TMED), umidade específica (q), velocidade do vento (VV) e precipitação (PRP). Em vermelho estão marcadas as tendências negativas; b) coeficiente de correlação das equações de tendência.

| a) | BELÉM | | MÉDIA | |
|-------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | 1º Semestre | 2º Semestre | 1º Semestre | 2º Semestre |
| TMAX | $y = 0.0356x + 30.711$ | $y = 0.0509x + 31.568$ | $y = 0.0398x + 30.557$ | $y = 0.0445x + 31.572$ |
| TMIN | $y = 0.0305x + 22.407$ | $y = 0.0447x + 21.783$ | $y = 0.0072x + 23.169$ | $y = 0.0126x + 23.236$ |
| TMED | $y = 0.0325x + 25.682$ | $y = 0.047x + 25.932$ | $y = 0.0141x + 26.408$ | $y = 0.019x + 27.069$ |
| q | $y = 0.0015x + 1.8426$ | $y = 0.001x + 1.7627$ | $y = 0.0006x + 1.8628$ | $y = 0.0012x + 1.8004$ |
| VV | $y = -0.0118x + 1.52$ | $y = -0.008x + 1.8851$ | $y = -0.0097x + 1.8252$ | $y = -0.0142x + 2.3181$ |
| PRP | $y = 14.842x + 2010.8$ | $y = 3.7267x + 783.28$ | $y = -12.337x + 2372.3$ | $y = -2.6131x + 579.45$ |

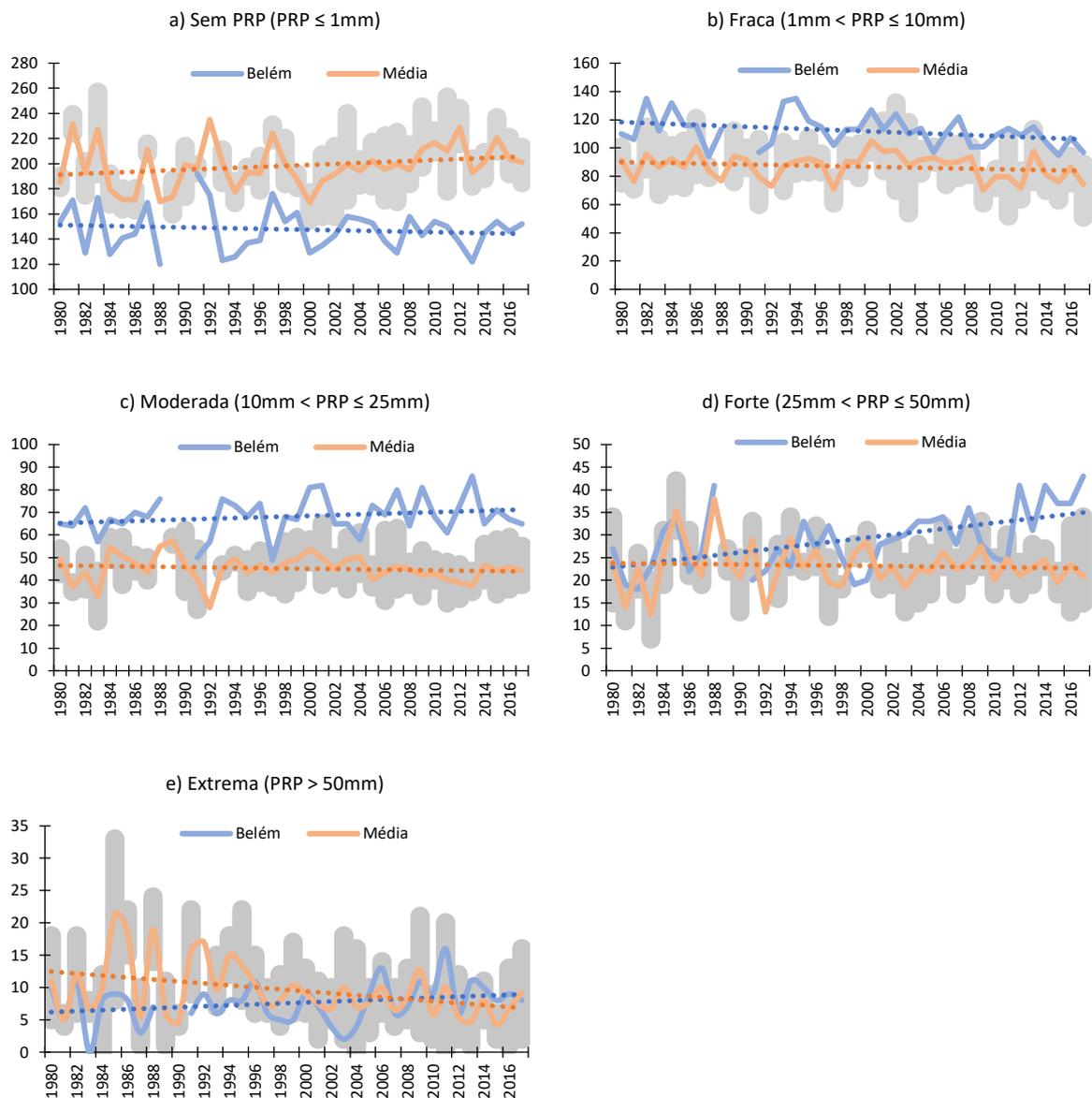
| b) | BELÉM | | MÉDIA | |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 1º Semestre | 2º Semestre | 1º Semestre | 2º Semestre |
| TMAX | 0.339 | 0.715 | 0.43 | 0.598 |
| TMIN | 0.471 | 0.617 | 0.019 | 0.038 |
| TMED | 0.556 | 0.791 | 0.119 | 0.256 |
| q | 0.158 | 0.058 | 0.026 | 0.139 |
| VV | 0.219 | 0.064 | 0.125 | 0.258 |
| PRP | 0.283 | 0.056 | 0.076 | 0.056 |

Separando a PRP em cinco categorias (Sem PRP: $PRP \leq 1\text{mm}$; Fraca: $1\text{mm} < PRP \leq 10\text{mm}$; Moderada: $10\text{mm} < PRP \leq 25\text{mm}$; Forte: $25\text{mm} < PRP \leq 50\text{mm}$; Extrema: $50\text{mm} < PRP$), é possível investigar com mais precisão como ela mudou ao longo dos anos (Figura 2.10). A frequência de dias com pouca PRP (Figura 2.10.b) em Belém está reduzindo com o tempo, porém o número de dias com eventos mais fortes de PRP está aumentando (Figura 2.10.c – 2.10.e). Enquanto isso, as outras estações exibem tendência de redução da frequência de eventos fortes de precipitação e aumento na frequência de dias sem PRP. As tendências observadas na média das estações são esperadas neste cenário de mudança do uso/cobertura do solo, visto que a remoção da floresta resulta em importantes alterações na dinâmica atmosférica, balanço de energia e ciclo hidrológico, podendo reduzir a PRP sobre estas áreas costeiras da Amazônia (GANDU; COHEN; SOUZA, 2004).

O aumento na rugosidade da superfície devido as construções da área urbana, mantem um sistema convectivo por mais tempo sobre a área urbana, onde ele continua a se desenvolver com a ajuda de um movimento ascendente do ar (convecção) mais intenso devido ao calor extra armazenado na superfície da área urbana (pelo concreto, asfalto, ferro, entre outros matérias comuns a estes locais) e ao continuo suprimento de umidade originado pela circulação de brisa criada pelo diferencial de temperatura entre a cidade e os rios que a cercam (Rio Guamá e a Baía do Guajará). Todos estes elementos contribuem para o desenvolvimento e manutenção de tempestades severas, capazes de gerar grandes acumulados de PRP causando transtorno para a população da RMB (COHEN et al., 2014; GERMANO et al., 2017; JAUREGUI; ROMALES, 1996; KINGFIELD et al., 2018; MATOS; COHEN, 2016; MIAO et al., 2009; NIYOGI et al., 2011; SHEPHERD, 2005, 2013; SILVA DIAS et al., 2004).

O comportamento das demais variáveis meteorológicas analisadas, mostra que a estação de Belém possivelmente não esteja dentro da área de influência de uma ilha de calor, visto que a tendência destas variáveis meteorológicas de Belém segue o comportamento observado pela média das outras estações. Dessa forma, analisar os dados da estação meteorológica de Belém parece não ser suficiente para afirmar que a urbanização é responsável pelo aumento da temperatura do ar e redução da umidade. No entanto, a PRP não segue a tendência da média da região e a urbanização de Belém pode estar influenciando esta variável. Para responder esta pergunta, o uso da modelagem atmosférica passa a ser uma ferramenta essencial e será apresentada no Capítulo 3.

Figura 2.10- Frequência de dias com precipitação em determinado intervalo: Sem PRP (a), Fraca (b), Moderada (c), Forte (d) e Extrema (e). Informações para Belém (azul) e a média das outras estações (laranja). Linha pontilhada corresponde a tendência linear.



A análise semestral da frequência dos diferentes intervalos de PRP é apresentada Tabela 2.6 (os gráficos são apresentados no Apêndice C). A tendência das diferentes categorias de precipitação em Belém e para a médias da demais cidades, tanto para o primeiro como para o segundo semestre, definem os períodos chuvoso e menos chuvoso nessa região.

A média das estações exibe tendência de aumento dos dias sem PRP, enquanto que em Belém, apenas no segundo semestre é observado aumento na frequência de dias sem PRP. Por outro lado, observa-se aumento no número de dias com eventos fortes de chuva, em Belém, em ambos os semestres. A percepção de mais e menos chuva comentada pelos participantes (Figura 2.6) pode ser devido às tendências observadas no segundo semestre, pois este período

do ano está ficando mais seco, porém as tempestades estão mais fortes e, como foi visto anteriormente, este tipo de evento, por frequentemente causar prejuízo às pessoas, estimula a percepção com respeito a meteorologia. Além disso, uma tempestade severa durante um longo período sem chuva se destaca na memória das pessoas (SHAO et al., 2017; TAKAGI; ANH; DANH THAO, 2017), logo, influencia a percepção das mesmas.

Tabela 2.6- a) Equação da linha de tendência em cada semestre da frequência de dias com PRP em um determinado intervalo (Sem PRP: $PRP \leq 1\text{mm}$; Fraca: $1\text{mm} < PRP \leq 10\text{mm}$; Moderada: $10\text{mm} < PRP \leq 25\text{mm}$; Forte: $25\text{mm} < PRP \leq 50\text{mm}$; Extrema: $50\text{mm} < PRP$) em Belém e na média das outras estações. Valores em vermelho indicam tendência negativa; b) coeficiente de correlação das equações de tendência.

| a) | BELÉM | | MÉDIA | |
|-----------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | 1º Semestre | 2º Semestre | 1º Semestre | 2º Semestre |
| Sem PRP | $y = -0.3361x + 49.02$ | $y = 0.2347x + 96.41$ | $y = 0.1715x + 62.82$ | $y = 0.2167x + 128.0$ |
| Fraca | $y = -0.1303x + 65.93$ | $y = -0.261x + 56.91$ | $y = 0.0115x + 53.97$ | $y = -0.1711x + 35.94$ |
| Moderada | $y = 0.2242x + 42.34$ | $y = -0.0832x + 23.99$ | $y = -0.0325x + 33.29$ | $y = -0.0375x + 13.29$ |
| Forte | $y = 0.2242x + 18.43$ | $y = 0.0971x + 4.53$ | $y = -0.0249x + 19.81$ | $y = -0.0087x + 4.15$ |
| Extrema | $y = 0.0405x + 5.82$ | $y = 0.0352x + 0.35$ | $y = -0.1383x + 11.53$ | $y = -0.0115x + 1.07$ |

| b) | Belém | | Média | |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 1º Semestre | 2º Semestre | 1º Semestre | 2º Semestre |
| Sem PRP | 0.201 | 0.048 | 0.027 | 0.083 |
| Fraca | 0.069 | 0.082 | 0.0004 | 0.141 |
| Moderada | 0.15 | 0.046 | 0.007 | 0.018 |
| Forte | 0.205 | 0.118 | 0.003 | 0.004 |
| Extrema | 0.023 | 0.033 | 0.116 | 0.033 |

2.2.3. Impacto e Adaptação a Mudança Climática em Belém

Alguns dos habitantes de Belém perceberam mudanças no clima local e a percepção deles não estava errada. Resultados da análise da estação meteorológica do INMET demonstraram que a urbanização pode estar influenciando a atmosfera, os dias estão ficando mais quentes e os eventos de precipitação mais fortes e tais alterações estão causando problemas para os participantes do questionário.

Mais da metade dos entrevistados afirmaram sofrer algum impacto devido as alterações climáticas reportadas por eles (Tabela 2.7). Dos que responderam positivamente, problemas de saúde (gripe, estresse, desidratação, cansaço e indisposição) foram os mais mencionados pelos participantes do Tipo I, mas para os habitantes do Tipo III o principal

impacto foi financeiro, seguido por saúde e inundação. Os problemas associados à saúde são esperados, pois se apenas o efeito da mudança climática global for levada em consideração, 30 – 40% do período diurno deve se tornar quente demais (KJELLSTROM et al., 2016), porém a atmosfera de um centro urbano pode exacerbar este problema, levando, inclusive, a morte de pessoas (BAI et al., 2018; FREITAG; NAIR; NIYOGI, 2018; FRUMKIN, 2002; HARLAN et al., 2006; MUIS et al., 2015; VARGO et al., 2016; WARD et al., 2016).

Tabela 2.7- Quantidade de participantes que sofreram ou não algum tipo de impacto devido à mudança climática mencionada anteriormente.

| <i>Impacto</i> | <i>Tipo I</i> | <i>Tipo III</i> |
|-----------------------|----------------------|------------------------|
| <i>Sim</i> | 16 | 13 |
| <i>Não</i> | 7 | 6 |
| <i>Total</i> | 23 | 19 |

A maioria dos participantes não conseguiu se adaptar a estas mudanças, 80% do Tipo I responderam negativamente a adaptação e 60% do Tipo III (Tabela 2.8). Os poucos que conseguiram se adaptar, fizeram isso por meio de mais banho e bebendo mais água, no caso daqueles do Tipo I, e evitando sair no sol ou com o uso mais frequentes de ar condicionados e/ou ventiladores, no caso dos participantes do Tipo III.

As respostas negativas se deram por falta de conhecimento sobre como se adaptar ou por falta de tempo e/ou falta de dinheiro para investir nesse assunto. A falta de conhecimento pode ser observada também na forma de adaptação do Tipo III. O uso mais frequente de ar condicionado e/ou ventilador aumenta o consumo de energia, aumentando a conta a ser paga e resultando no principal impacto mencionado por eles: o financeiro. Além, é claro, de gerar mais calor para a atmosfera, contribuindo para o aumento da temperatura do ar (MARTILLI, 2014). Tem-se então a formação de um ciclo prejudicial para a pessoa, no qual a única estratégia de adaptação pensada é parte do problema a ser adaptado. Daí a importância deste tipo de estudo, conhecer a população para evitar planos ineficientes que podem representar mais prejuízos à população.

Tabela 2.8- Quantidade de participantes que conseguiram ou não se adaptar a mudança mencionada anteriormente.

| <i>Adaptação</i> | <i>Tipo I</i> | <i>Tipo III</i> |
|-------------------------|----------------------|------------------------|
| <i>Sim</i> | 4 | 7 |
| <i>Não</i> | 19 | 12 |
| <i>Total</i> | 23 | 19 |

Apesar de mais da metade não conseguir adaptar suas casas para este novo cenário climático, eles conseguiram sugerir estratégias de como Belém poderia mudar para reduzir o impacto da urbanização. Para eles, o aumento das áreas verdes, um transporte público mais eficiente (principalmente para os habitantes do Tipo I), melhor saneamento público e campanhas para informar a população sobre como lidar com as mudanças climáticas, são caminhos para tornar Belém mais confortável para todos. De fato, tais sugestões são pertinentes e podem beneficiar significativamente a população, como foi observado por (GÜLTEN; AKSOY; ÖZTOP, 2016; SANTOS; PIMENTEL, 2012).

2.3. Sumário e Conclusão

1. Independente da tipologia na qual o questionário foi aplicado, as pessoas entrevistadas perceberam alterações no clima de Belém. De acordo com eles, há aumento da temperatura e maior variabilidade da precipitação. Além disso, para maior parte dos participantes, estas alterações foram causadas pela ação humana, mais especificamente, o avanço e desenvolvimento da urbanização;
2. A percepção climática está de acordo com o observado pela estação meteorológica do INMET. A estação meteorológica registrou aumento na frequência de eventos extremos de precipitação, um indicativo de influência da urbanização no clima de Belém. Porém, com relação à temperatura do ar, estações em localidades próximas também demonstraram tendência de aumento, indicando a modulação por um fenômeno de escala maior;
3. Estas novas características do clima de Belém têm causado alguns transtornos à população e estes problemas variam de acordo com a tipologia na qual o entrevistado foi classificado. Os habitantes do Tipo I relataram problemas de saúde (estresse, gripe, desidratação) como o principal transtorno, enquanto que os entrevistados do Tipo III relataram, além de problemas de saúde, problemas financeiros;
4. Apesar destes problemas, grande parte dos entrevistados não soube se adaptar a este novo cenário climático e em certos casos a adaptação de alguns deles passa a ser parte do problema causado pela mudança climática (como se adaptar com aumento do uso de ventilador/ar condicionado e problemas financeiros). Porém, quando a pergunta é adaptação de Belém, a maioria soube sugerir estratégias para que a cidade pudesse mudar e reduzir os problemas originados pela mudança climática local.

5. Esta é uma questão que abrange o individual e o coletivo. O impacto das alterações que uma pessoa realiza no seu cotidiano pode não ser significativa em uma escala municipal, porém pode estimular outros a fazerem o mesmo e o coletivo, a comunidade inteira, irá se beneficiar. O inverso também é verdadeiro, os governadores podem produzir leis e estimular as mudanças de cada indivíduo.

CAPÍTULO 3 INFLUÊNCIA DA URBANIZAÇÃO NO DESENVOLVIMENTO DE TEMPESTADE SEVERA

Ao redor do mundo, diversos estudos já mostraram que a substituição do meio natural por um meio urbano e o crescimento deste último estão associados a alterações na dinâmica atmosférica local. Belém (e os municípios vizinhos cujas principais áreas urbanas estão cornubadas) talvez seja um destes casos de alteração atmosférica, pois como foi visto no Capítulo 2, parte de sua população notou que com o crescimento da urbanização, o clima local tem se alterado e pela análise dos dados da estação meteorológica do INMET, a precipitação, em especial os eventos extremos de precipitação, pode estar sendo modulada pelas características da área urbana.

Este Capítulo visa adicionar mais evidência à hipótese de influência da urbanização nos eventos de precipitação local. Para isso, a modelagem atmosférica foi a ferramenta empregada e diferentes cenários de uso do solo foram construídos com base em informações de satélite. Apesar de outros estudos abordarem esta relação, urbanização – atmosfera, o presente estudo é o primeiro a abordar as características de Belém com uma fidelidade mais próxima ao real.

3.1. Materiais e Métodos

3.1.1. Área de Estudo

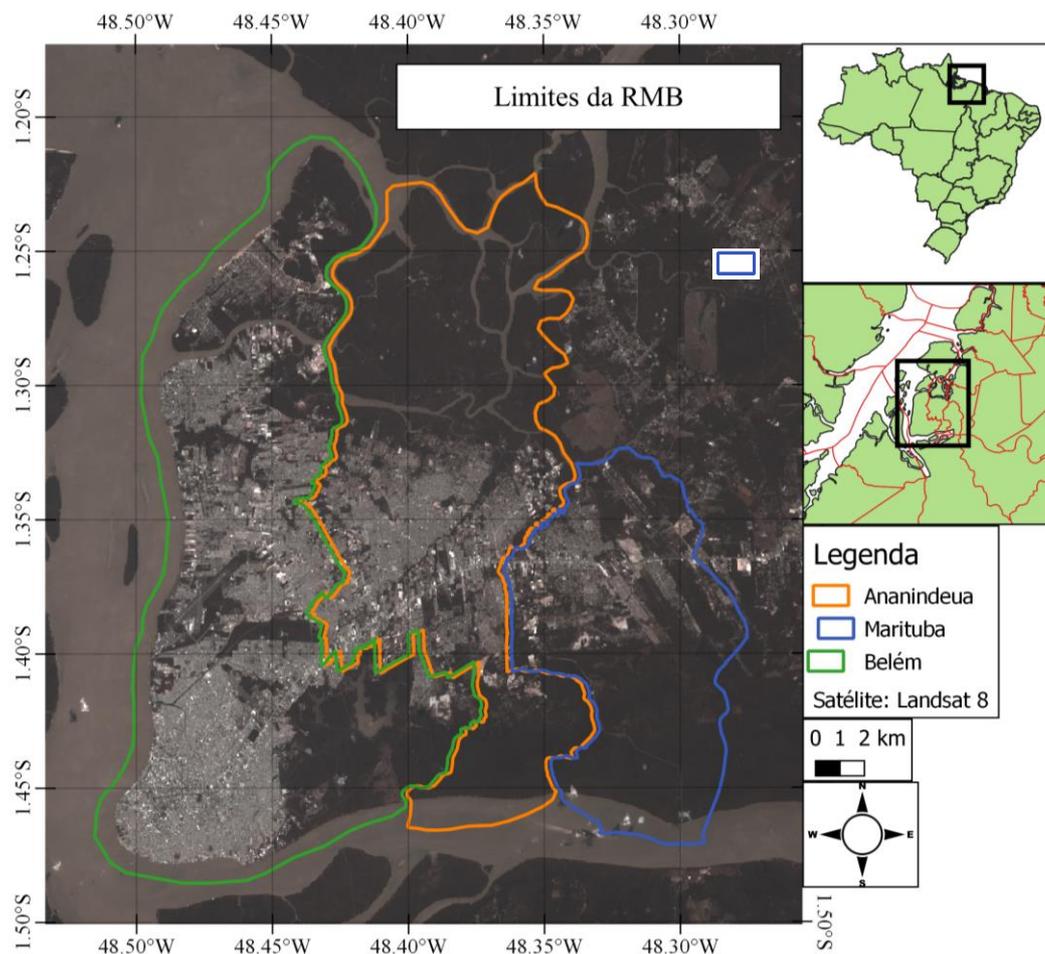
Neste capítulo, a área de estudo será expandida em relação ao capítulo anterior. O estudo da influência da cidade na atmosfera e no desenvolvimento de uma tempestade foi realizado para as principais áreas urbanas cornubadas das cidades de Belém, Ananindeua e Marituba. Esta é a maior área urbana contínua da Região Metropolitana de Belém (RMB) e por este motivo possui maior capacidade de influenciar a atmosfera do que apenas o núcleo urbano de um destes municípios. Apesar da RMB abranger outras cidades, a partir deste momento, esta sigla será referência apenas para as três citadas anteriormente, mais especificamente, a principal área urbana dos mesmos pode ser visualizada na Figura 3.1.

O município de Ananindeua encontra-se a leste de Belém. O jovem município começou apenas como estação da linha da Estrada de Ferro Bragança em meados do século XIX. A partir da criação desta estação, a região começou a ganhar importância e a receber muitas pessoas, até que 1943 recebeu o título de município. A região que no começo era principalmente voltada a agricultura, hoje é moradia para um total estimado para 2017 de

516.057 habitantes (470.819 na área urbana), espalhados em uma área de 190,451km² (2.477,55 habitantes por km²). Ananindeua faz fronteira a leste com o município de Marituba, criado em 1994, sendo o mais novo dos três apresentados e também nascido devido a estrada de ferro. Além de mais novo, Marituba é o menor, com 103,343km² e uma estimativa de 127.858 habitantes (107.123 na área urbana) em 2017 (1.047,44km²) (IBGE, 2020b).

Estas são as três principais cidades da Região Metropolitana de Belém (RMB), mescladas em uma única mancha urbana. Juntas, elas abrigam uma população de 2.096.190 habitantes em uma área total de 1.353,252km². Alguns pesquisadores já desenvolveram trabalhos procurando identificar possíveis alterações no microclima local devido a urbanização. Corrêa (2011) e Silva Júnior et al. (2013) identificaram em seus trabalhos assinaturas claras do microclima urbano na RMB, como: elevação da temperatura do ar com a expansão da área urbana, ilha de calor e regiões com mais prédios apresentando temperatura do ar mais elevada. Esta é uma área viva e em constante expansão, logo, estudos como estes (incluindo esta tese) devem ser incentivados, pois são fundamentais para garantir o desenvolvimento sustentável da metrópole.

Figura 3.1- Área de estudo com as cidade de Marituba (azul), Ananindeua (laranja) e parte da cidade de Belém (verde).



Fonte: Autor.

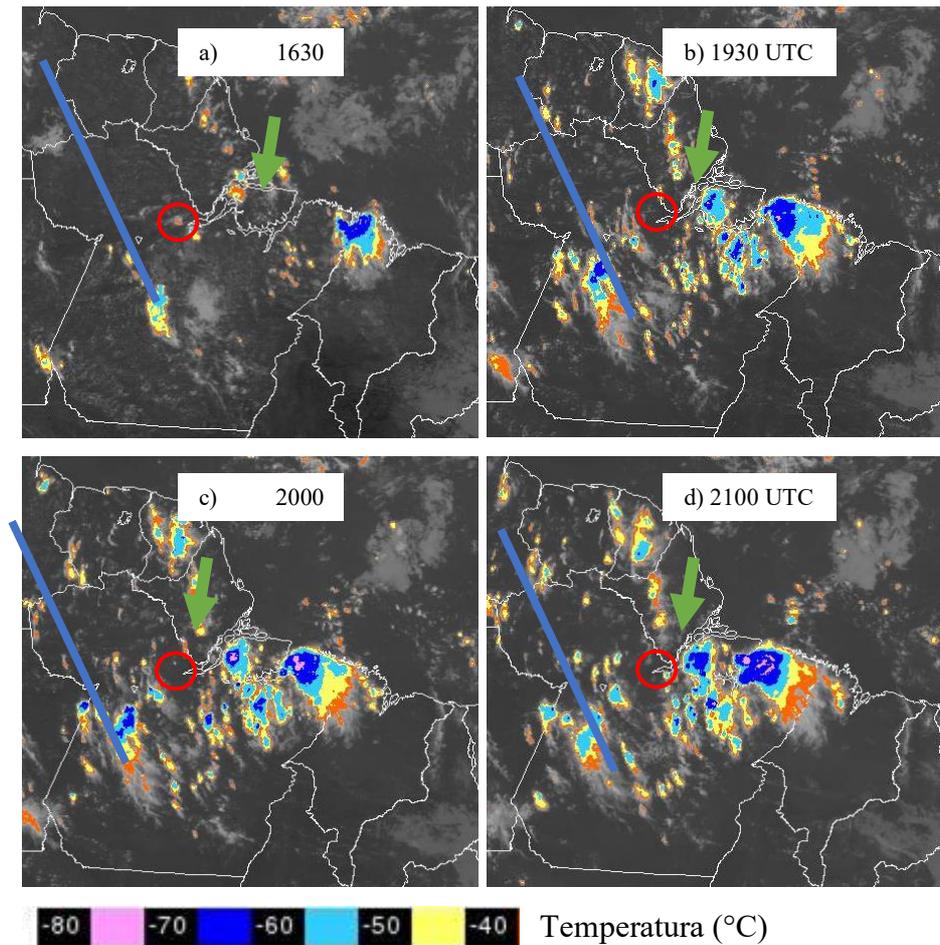
3.1.2. Estudo de Caso

Para o estudo de tempestades convectivas, as estações meteorológicas do INMET não são ideais, devido à baixa frequência de observações diárias, em comparação a escala espacial e temporal do sistema convectivo (ORLANSKI, 1975; RAY, 1986). Em 2011, Belém sediou uma campanha do Projeto CHUVA, coordenado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e pela Universidade de São Paulo (USP), cujo objetivo foi estudar os processos de nuvem dos principais sistemas meteorológicos do Brasil (MACHADO et al., 2014). Durante este período, diversos instrumentos foram instalados em Belém e o monitoramento das condições atmosféricas foi amplificado. Então, buscou-se selecionar um caso de tempestade ocorrido durante esta campanha.

O caso selecionado ocorreu no dia 07 de junho de 2011 (Figura 3.2). A tempestade em questão se formou no Oceano Atlântico, pouco após as 1200 UTC, próxima à costa do nordeste brasileiro (não mostrado). As 1630 UTC (Figura 3.2.a, indicado pela seta verde) a

tempestade chega ao estado do Pará, ainda em estágio de desenvolvimento. Neste mesmo horário, observa-se a presença de uma fraca Linha de Instabilidade (LI, linha azul) à frente da tempestade. As 1930 UTC (Figura 3.2.b) a tempestade se desloca mais para oeste e se intensifica.

Figura 3.2- Imagens do satélite GOES-12 exibindo a evolução da tempestade estudada nos seguintes horários UTC: 1630 (a), 1930 (b), 2000 (c) e 2100 (d). O círculo vermelho marca a RMB, a linha azul marca a Linha de Instabilidade e o sistema estudado é indicado pela seta verde.



Fonte: CPTEC/DSA (2019).

A tempestade atinge seu estágio maduro quando chega na região da RMB. Neste momento, as nuvens que compõem este sistema meteorológico alcançam seu maior desenvolvimento vertical, indicado pela cor rosa, ou seja, o topo da nebulosidade possui temperatura entre -80 e -70°C. No horário seguinte, as 2100 UTC, a tempestade continua seu trajeto para oeste, sobre a Ilha do Marajó, onde inicia seu processo de dissipação. Ao longo de todo este processo, a LI permaneceu ativa a frente do sistema estudado e devido a circulação atmosférica promovida pelas múltiplas células de tempestades que compõem a LI, ar seco e

frio de altitude pode ter sido trazido para a superfície e colaborado para a dissipação do sistema alvo através da interrupção do fornecimento de ar quente e úmido.

Enquanto ativo sobre a RMB, a tempestade causou forte precipitação (38mm registrados pelo INMET e 27mm pelo disdrômetro do Projeto Chuva), alagamentos, queda de muro e congestionamentos. Portanto, tem-se uma situação causadora de transtornos para os habitantes da RMB e bem registrada do ponto de vista meteorológico. Dessa forma, este caso de tempestade severa foi escolhido para a análise da influência da urbanização no desenvolvimento de uma tempestade utilizando-se como ferramenta a modelagem numérica atmosférica.

3.1.3. Definição da Área Urbana da RMB

Para se obter um resultado mais preciso e próximo ao observado em um estudo sobre o uso do solo, é fundamental que a superfície seja bem descrita. Nesta tese, a área urbanizada da RMB utilizada na modelagem atmosférica foi calculada a partir de cenas do Landsat 5 (imagem capturada no dia 17 de julho de 1986) e Landsat 8 (imagem capturada no dia 06 de julho de 2017) utilizando a metodologia discutida por Sekertekin et al (2018), na qual diferentes formas de se estimar a área urbana de um local a partir de imagem de satélite foram comparadas e o índice com melhor resultado foi o Index-based Built-up Index (IBI, Equação 3.1):

$$IBI = \frac{[NDBI - (\frac{SAVI + MNDWI}{2})]}{[NDBI + (\frac{SAVI + MNDWI}{2})]} \quad (\text{Equação 3.1})$$

As bandas 5 (frequência do infravermelho próximo, o qual é empregado na estimativa de vegetação) e 6 (frequência do infravermelho de onda curta, utilizado no discernimento de solo úmido e seco e no discernimento de tipos diferentes de solo) são utilizadas para calcular o Normalized Difference Built-up Index (NDBI), definido por:

$$NDBI = \frac{\text{Banda 6} - \text{Banda 5}}{\text{Banda 6} + \text{Banda 5}} \quad (\text{Equação 3.2})$$

A banda 5 e 4 (frequência do vermelho visível) formam o Soil Adjust Vegetation Index (SAVI), definido por:

$$SAVI = \frac{[(Banda\ 5 - Banda\ 4) \times (1 + L)]}{(Banda\ 5 + Banda\ 4 + L)} \quad (\text{Equação 3.3})$$

O parâmetro L, o fator de ajuste do dossel, foi considerado 0.5 (HUETE, 1988). O último parâmetro para o cálculo do IBI é o Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI), o qual é constituído das bandas 3 (frequência do verde visível) e banda 6:

$$MNDWI = \frac{(Banda\ 3 - Banda\ 6)}{(Banda\ 3 + Banda\ 6)} \quad (\text{Equação 3.4})$$

Antes destes 3 índices serem aplicados na Equação 3.1, eles foram normalizados entre 0 e 1. O último processo consistiu na binarização do resultado do IBI. A função graythresh do Matlab (MATLAB, 2020) realiza o método de Otsu no histograma da imagem do IBI, definindo um valor limite no qual a superfície pode ser considerada impermeável. Então, todos os valores acima desse limite foram considerados 1 (impermeável) e todos abaixo de zero (permeável). Este resultado binarizado definiu a área urbana da RMB em 1986 (Landsat 5) e em 2017 (Landsat 8) e foi inserido no modelo, discutido em mais detalhes no tópico a seguir.

3.1.4. O modelo numérico Weather Research and Forecasting - (WRF)

A influência da urbanização na atmosfera foi investigada a partir de simulações com o WRF (versão 3.8). Este é um modelo gratuito e de código aberto desenvolvido pelo *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) nos Estados Unidos (SKAMAROCK et al., 2008). Ele possui uma extensa biblioteca de parametrizações (representação matemática e física de processos da natureza) e configurações, permitindo que o mesmo possa simular casos em diferentes escalas temporais e espaciais.

O modelo possui dois módulos principais: o WPS (*WRF Preprocessing System*), neste módulo, a grade, os dados de entrada, a topografia, o uso do solo, temperatura da superfície do mar, entre outros, são preparados para serem utilizados pelo modelo; o segundo módulo é WRF em si, no qual as configurações físicas e dinâmicas são definidas e todos os cálculos das parametrizações acontecem. Outros módulos existem, como ARWpost (pós-processamento), WRF-Chem (química) e HWRF (furacões), mas estes são específicos para determinadas situações e não foram utilizados neste trabalho.

Para simular a tempestade ocorrida no dia 07 de junho de 2011, o WRF foi configurado com uma grade de 600 x 600 pontos e 1km de resolução horizontal. Na vertical,

o modelo foi configurado com 56 níveis verticais², com topo em 50hPa. A Figura 3.4.a apresenta o domínio desta grade.

As condições iniciais e laterais utilizadas por esta grade foram fornecidas pelo Global Forecast System (GFS, 0.5° de resolução, <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>) e a temperatura da superfície do mar, para o dia 07 de junho de 2011, foi aquela disponibilizada pelo *Multi-scale Ultra-high Resolution* (MUR – SST, 1km de resolução <https://mur.jpl.nasa.gov/index.php>). Além destes dados, também foram utilizados dados obtidos das radiossondagens lançadas pelo Projeto Chuva, com frequência de 6h, desde 18 UTC do dia 06 de junho até as 00 UTC do dia 8 de junho, e das estações meteorológicas do INMET localizadas dentro da grade do modelo.

O objetivo desta simulação é analisar a influência de diferentes cenários de urbanização da RMB na atmosfera, para isso, dois elementos são importantes: a caracterização da superfície e a parametrização de urbanização utilizada. A partir do cálculo da área impermeável da RMB em 1986 e 2017 (descrito no item anterior) foram definidas 4 classes de urbanização para representar a RMB:

- 1- Baixa densidade: impermeabilidade entre 0 e 0.3, 70% de vegetação natural, edificações com $5\text{m} \pm 1\text{m}$ de altura;
- 2- Média densidade: impermeabilidade entre 0.3 e 0.6, 30% (50%) de vegetação natural, edificações com $10\text{m} \pm 3\text{m}$ de altura;
- 3- Alta densidade – favela: impermeabilidade entre 0.8 e 1, 10% (30%) de vegetação natural, edificações com $7.5\text{m} \pm 1\text{m}$ de altura;
- 4- Alta densidade – vertical: impermeabilidade entre 0.7 – 0.8, 10% de vegetação natural, edificações com $60\text{m} \pm 25\text{m}$ de altura.

A densidade referida nas quatro classes diz respeito a impermeabilização do solo. Os valores de vegetação entre parênteses foram utilizados para representar o cenário de 1986 e a quarta classe foi inserida apenas no cenário de 2017. Estes parâmetros são estimativas do autor, com base em seu conhecimento sobre a região, pois a RMB carece deste tipo de

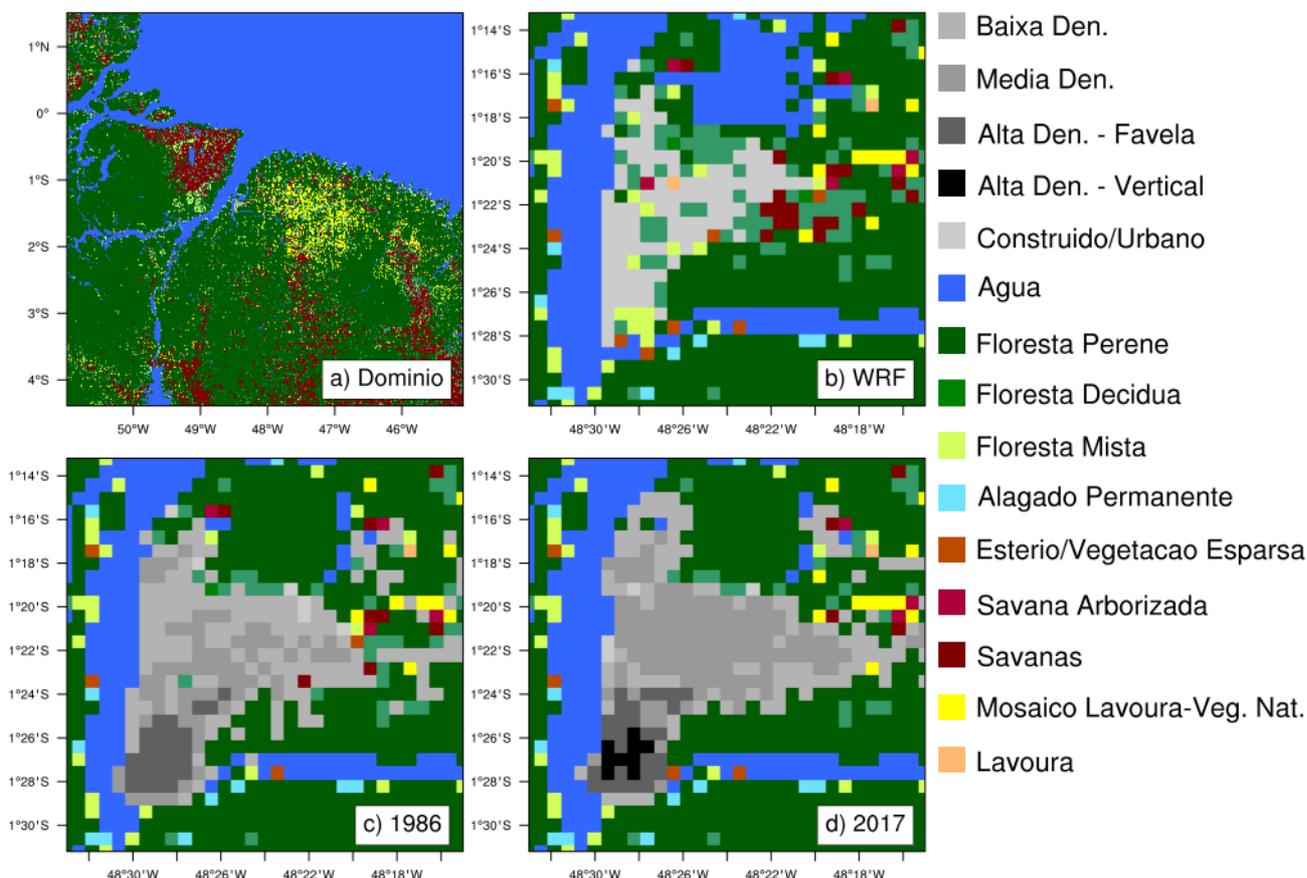
² O modelo WRF utiliza coordenada eta para definir seus níveis verticais. Esta coordenada utiliza a pressão no nível médio do mar como referência e define a topografia como uma série de cubos, permitindo uma melhor simulação próximo a terrenos montanhosos. Neste trabalho, os níveis definidos foram: 1.0000, 0.9862, 0.9785, 0.9715, 0.9644, 0.9581, 0.9514, 0.9443, 0.9380, 0.9312, 0.9241, 0.9171, 0.9104, 0.9038, 0.8971, 0.8900, 0.8826, 0.8546, 0.8271, 0.8017, 0.7760, 0.7518, 0.7287, 0.7064, 0.6852, 0.6649, 0.6454, 0.6270, 0.6095, 0.5921, 0.5767, 0.5568, 0.5393, 0.4949, 0.4565, 0.4211, 0.3867, 0.3590, 0.3287, 0.3012, 0.2774, 0.2552, 0.2233, 0.1888, 0.1575, 0.1297, 0.1052, 0.0837, 0.0660, 0.0502, 0.0376, 0.0277, 0.0192, 0.0118, 0.0057, 0.0000.

informação. Outros parâmetros físicos necessários para a caracterização da superfície, como emissividade ($0,9 \text{ W.m}^{-2}$), albedo (0,25) e comprimento da rugosidade (2m) são os mesmos utilizados por Souza (2012). Além dos cenários de 1986 e 2017, um cenário no qual toda a área urbana da RMB foi substituída por floresta também foi considerado, possibilitando a análise da influência da urbanização no desenvolvimento de um estudo de caso de tempestade severa em um intervalo de vários anos.

A Figura 3.4 exhibe como é importante esse tipo de processo. O uso do solo padrão do WRF (Figura 3.4.b) é muito diferente do real e pode gerar resultados diferentes do observado. Com a adição da área impermeável e das quatro classes de urbanização, a RMB se expande e deixa de ser apenas construído/Urbano e a região da PLP aparece mais claramente, como uma área de alta densidade. A principal diferença entre os cenários de 1986 (Figura 3.4.c) e 2017 (Figura 3.4.d) está na expansão da classe de Média Densidade no interior da RMB, a expansão da Baixa Densidade para leste e norte, e a inclusão da Alta Densidade na região da PLP.

Figura 3.3- (a) Domínio da grade utilizada nas simulações com o WRF; b) classificação original do uso do solo no modelo WRF; c) uso do solo no cenário de 1986; d) uso do solo no cenário de 2017.

Índice de Uso do Solo



O segundo item importante para este tipo de trabalho é a parametrização escolhida, neste caso, a parametrização de urbanização. As simulações deste estudo utilizaram a *Building Environment Parametrization*, BEP (MARTILLI; CLAPPIER; ROTACH, 2002). Este esquema insere as edificações dentro das camadas do modelo, possibilitando o cálculo do impacto dos tetos, das paredes e das ruas na temperatura, velocidade do vento e energia cinética, gerando um resultado mais próximo ao real.

As outras parametrizações utilizadas foram: microfísica de nuvem de Ferrier/Eta (FERRIER et al., 2002); radiação *Rapid Radiative Transfer Model*, RRTM (IACONO et al., 2008); esquema de superfície de Monin – Obukhov (JANJIC, 1996)(JANJIC, 1996); esquema de camada limite de Mellor – Yamada – Janjic (JANJIC, 1994); e modelo de superfície Noah (CHEN et al., 1996). Devido à alta resolução horizontal da grade (1km), não foi necessário utilizar parametrização de cúmulos.

O modelo foi integrado em três diferentes períodos para cada cenário: 30 horas, começando as 18 UTC do dia 6 de junho; 24 horas, começando as 00h do dia 7 de junho; e 18

horas, começando as 06 UTC do dia 7 de junho. Todas as simulações terminaram as 00 UTC do dia 8 de junho. Para este dia em questão (7 de junho de 2011), os dados disponíveis do GFS não estavam completos, então cada simulação foi realizada com apenas duas informações do GFS, uma no início da rodada (as 18UTC do dia 06, e as 00UTC e 06UTC do dia 07) e a outra no final (as 00UTC do dia 08). Assim, todos os resultados relativos a modelagem atmosférica correspondem ao ensemble das três integrações, a média das três integrações, reduzindo as incertezas de cada simulação do modelo (KALNAY, 2019).

Todos os resultados apresentados foram obtidos do WRF ou calculados externamente pelo *NCAR Command Language* (NCL). A exceção é o Número de Richardson e a Umidade Específica (q , apresentada no Capítulo 2), calculados fora do NCL, mas com dados do modelo. O primeiro foi calculado pela equação:

$$Ri_B = \left(\frac{g}{\theta_{VS}} \right) \frac{\theta_{VS}(z) - \theta_{VS}}{U(z)^2 + V(z)^2} z \quad (\text{Equação 3.5})$$

Onde “g” é a aceleração da gravidade, “z” a altura acima do solo, “ $\theta_{V(z)}$ ” a temperatura potencial virtual na altura “z”, “ θ_{VS} ” a temperatura potencial virtual próximo a superfície e “U(z)” e “V(z)” a velocidade do vento zonal e meridional na altura “z” (RICHARDSON; BASU; HOLTSLAG, 2013). A altura “z” considerada neste trabalho foi de 4000m (altura onde ocorreu o máximo cisalhamento do vento). Como foi mencionado anteriormente, os principais parâmetros para o desenvolvimento e manutenção de uma tempestade são cisalhamento do vento e flutuabilidade, o Ri_B expressa o balanço entre essas duas forças.

Com o balanço ideal entre essas duas forças, a flutuabilidade irá transportar de forma mais eficiente o calor e umidade de superfície para o interior da tempestade e o cisalhamento do vento contribuirá para a organização da tempestade (ou sistema de tempestades, no caso de uma linha de instabilidade), além de intensificar o transporte de superfície para o interior da tempestade (HAGEN; BARTENSCHLAGER; FINKE, 1999).

Weisman e Klemp (1982) realizaram um experimento com mais de 80 casos de tempestades, em latitudes médias. Eles concluíram que Ri_B entre 10 e 50 corresponde a tempestades severas, com chance para a formação de tornados. Valores superiores a 50 podem estar associados a sistemas com múltiplas células de tempestade e/ou tempestades secundárias. Ao longo dos anos, o Ri_B continuou sendo utilizado como um dos principais parâmetros para o estudo de tempestades severas (BOCHEVA et al., 2018; GROPP; DAVENPORT, 2018).

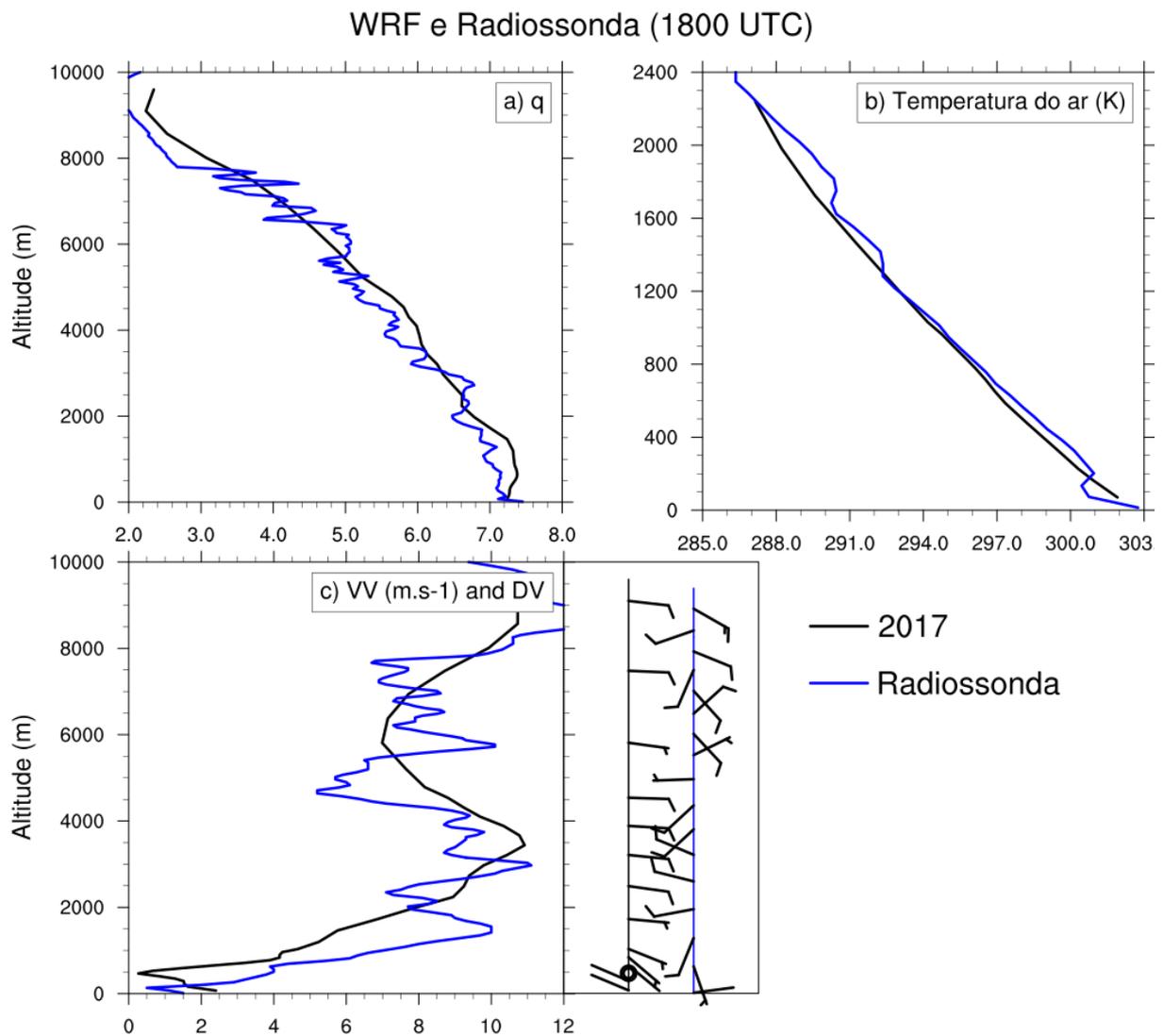
3.2. Resultados

3.2.1. Validação do Modelo

O aumento da frequência de eventos fortes de PRP, como demonstram os resultados apresentados no Capítulo 2 (Figura 2.10 e Tabela 2.6), podem estar associados a urbanização e a modelagem atmosférica é uma excelente ferramenta neste tipo de investigação.

O primeiro passo neste tipo de estudo é avaliar o desempenho do modelo. Para isso, os resultados do WRF utilizando o cenário de 2017, foi considerado controle e foi validado com dados obtidos através do lançamento de radiossondas e do radar meteorológico instalado durante o experimento de campo do Projeto Chuva em Belém. O perfil vertical de temperatura do ar, umidade específica e velocidade do vento simulados pelo WRF seguiu a tendência observada pela radiossonda, apesar de haver diferenças quantitativas (Figura 3.4). No geral, o modelo foi levemente mais frio que o observado, mas a umidade específica e a velocidade do vento alternaram constantemente entre superestimação e subestimação. O modelo simulou ventos de leste em quase toda a altura da atmosfera, apenas em uma camada próxima da superfície foram registrados ventos de noroeste. A radiossonda registrou ventos de oeste (com contribuição de sul), porém em uma camada maior e mais elevada da atmosfera. Ventos de leste foram observados na superfície e acima de 5km de altitude.

Figura 3.4- Perfil vertical de: a) umidade específica (q); b) temperatura do ar; c) velocidade (VV) e direção do vento (DV) para medidas feitas pela radiossonda (azul) e simulado pelo WRF no cenário de controle (preto), as 1800 UTC.

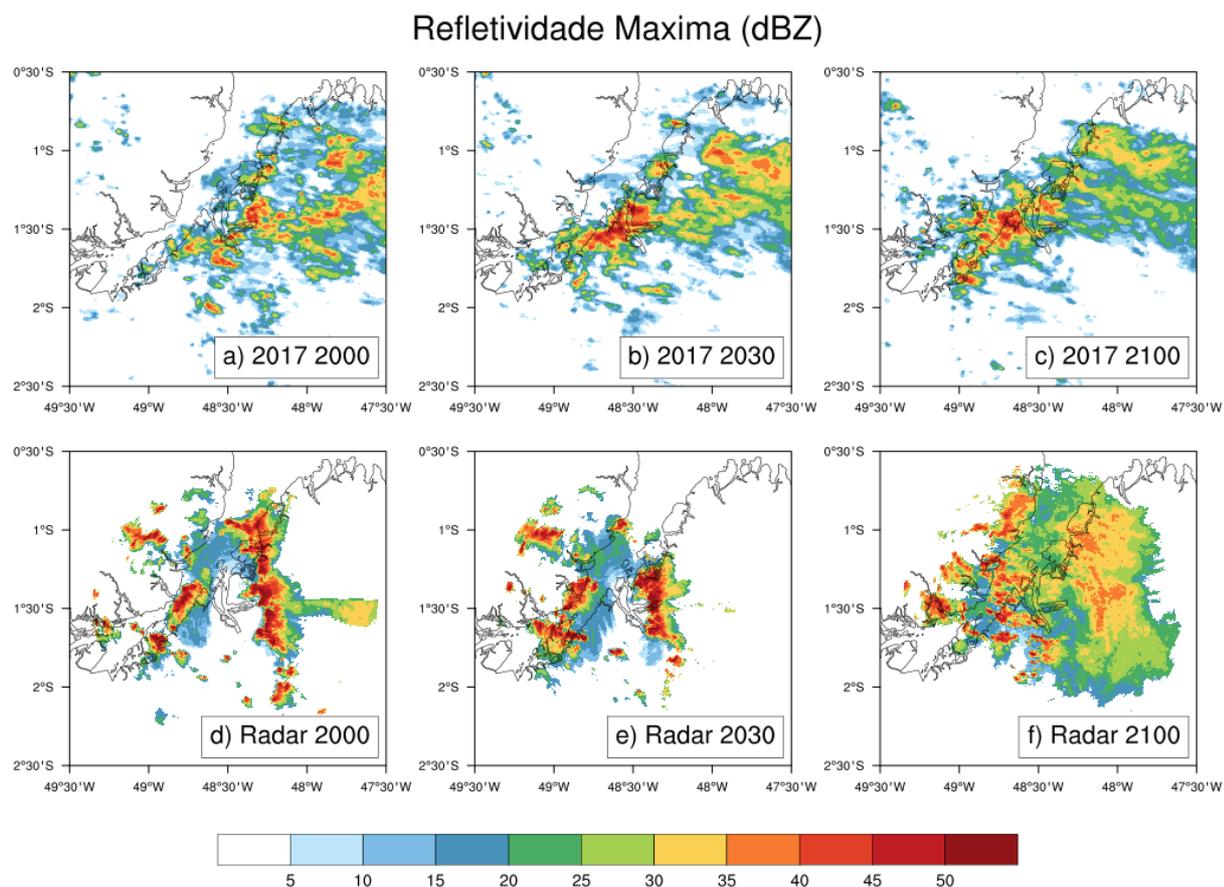


O segundo parâmetro a ser analisado é a refletividade do radar e do WRF. Essa informação é gerada pela reflexão do sinal emitido pelo radar pelas gotículas de água das nuvens. Quanto mais densa for a nuvem, mais gotículas de água ela tem e maior será a sua refletividade, como é o caso de uma nuvem de tempestade severa.

A análise da refletividade máxima do modelo e observada pelo radar (Figura 3.5) mostra que o WRF não simulou corretamente a orientação do sistema, mas o horário de chegada e a direção da movimentação do sistema foram capturados pelo modelo. As 2000 UTC o sistema tem orientação latitudinal (norte – sul), com grandes células de tempestade ao longo de toda a sua extensão (representadas pelas áreas com alta refletividade). No mesmo horário, o WRF simula um sistema orientado diagonalmente (nordeste – sudoeste), com uma

tempestade principal sobre a RMB e outras menores próximas. Às 2030 UTC o sistema encontra-se principalmente sobre a RMB e o modelo simula uma tempestade similar sobre a mesma área. As 2100 UTC, tanto o radar como o modelo mostram que o sistema continua seu trajeto para oeste, se dividindo em aglomerados menores de nuvem sobre o rio, em direção à Ilha do Marajó, a oeste da RMB.

Figura 3.5- Refletividade máxima (dBZ) simulada pelo WRF (a,b,c) e observada pelo radar (d,e, f) às 2000 UTC (coluna da esquerda), 2030 UTC (coluna do meio) e 2100 UTC (coluna da direita).



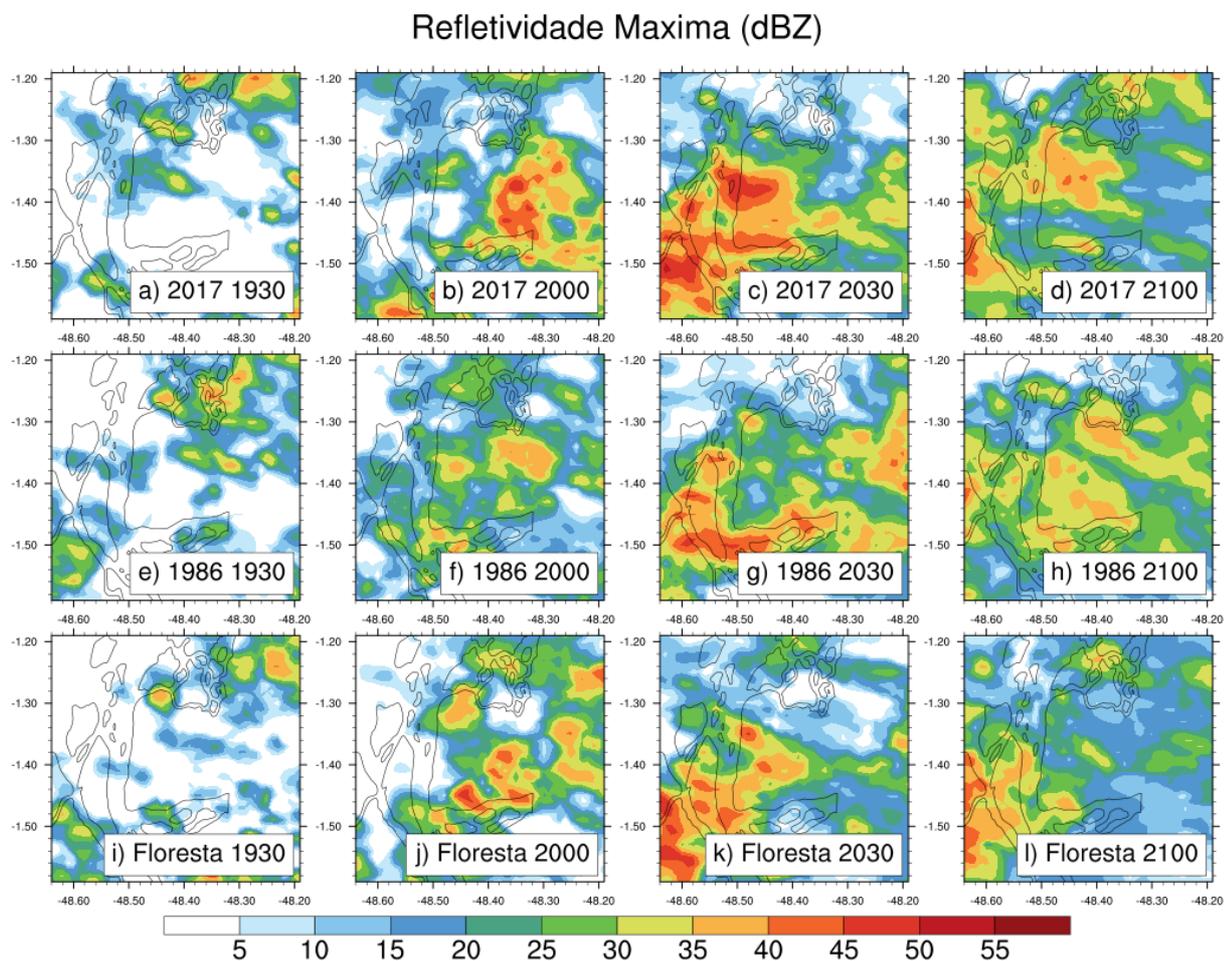
O balanço entre o cisalhamento do vento e a flutuabilidade de uma parcela de ar, conhecido como Número de Richardson (Ri_B , Equação 3.5), é um importante parâmetro no estudo de tempestades. O Ri_B calculado às 1800 UTC (este foi o último horário com lançamento de radiossonda antes da tempestade) para o WRF foi 22 e para o observado 28. Weisman e Klemp (1982) concluíram que estes valores representam um bom balanço entre estas forças, ideal para sistemas formados por supercélulas (como uma Linha de Instabilidade de longa duração) e supercélulas sem desenvolvimento de tornados, o qual pode ser o caso da tempestade sobre a RMB. Então, apesar das diferenças notadas, o modelo conseguiu simular de forma satisfatória a tempestade sobre a área de estudo.

3.2.2. Refletividade e Balanço de Energia

A Figura 3.7 apresenta a refletividade máxima para os experimentos de 2017, 1986 e Floresta. Antes da chegada da tempestade na RMB, às 1930 UTC, todos os cenários apresentam semelhante distribuição da refletividade, com maior quantidade de nebulosidade no centro e ao norte da RMB (Figuras 3.7.a, 3.7.e, 3.7.i). Às 2000 UTC, uma grande área com refletividade superior a 35 dBZ pode ser observada no cenário de 2017 (Figura 3.7.b), porém o mesmo não é observado em 1986 quando a tempestade encontra-se com menor intensidade (Figura 3.7.f). Já no cenário de floresta tem-se novamente a tempestade mais intensa com menor extensão, situada principalmente no Sudeste da RBM (Figura 3.7.j).

As 2030 UTC, tem-se a tempestade mais intensa e propagando na direção a baía do Marajó em todos os cenários quando comparada ao horário precedente. Entretanto, a tempestade de 2017 apresenta-se bem mais intensa e abrangendo maior área da RMB, quando comparada aos resultados dos demais cenários, indicando uma possível influência da cobertura do solo (urbanização) no desenvolvimento desta tempestade.

Figura 3.6- Refletividade máxima (dBZ) para o cenário de 2017 (linha de cima), 1986 (linha do meio) e floresta (linha de baixo) no horário de 1930 UTC (primeira coluna), 2000 UTC (segunda coluna), 2030 (terceira coluna) e 2100 (quarta coluna).



O corte longitudinal (em 1.38°S) da refletividade máxima e velocidade vertical do vento passando através da RMB permite analisar a estrutura vertical da tempestade nos três casos (Figura 3.8). Em todos os cenários tem-se a refletividade mostrando a tempestade propagando de leste para oeste, sendo de maior intensidade no cenário de 2017. Adicionalmente, observa-se as correntes verticais ascendentes (linhas contínuas) e descendentes (linhas tracejadas) mostrando a predominância das correntes ascendentes antes da tempestade chegar na RMB em todos os cenários (Figura 3.8.a, 3.8.e e 3.8.i).

No momento em que a tempestade chega na RMB as 2000 UTC, diferenças significativas podem ser observadas entre as simulações. A corrente ascendente mantém-se em 2017 (Figura 3.8.b), formando uma torre de nebulosidade próxima à fronteira leste da RMB. Em 1986 (Figura 3.8.f), a tempestade não se forma tão organizada quanto em 2017, apresentando 3 colunas com nebulosidade e sem uma corrente ascendente bem definida. Uma

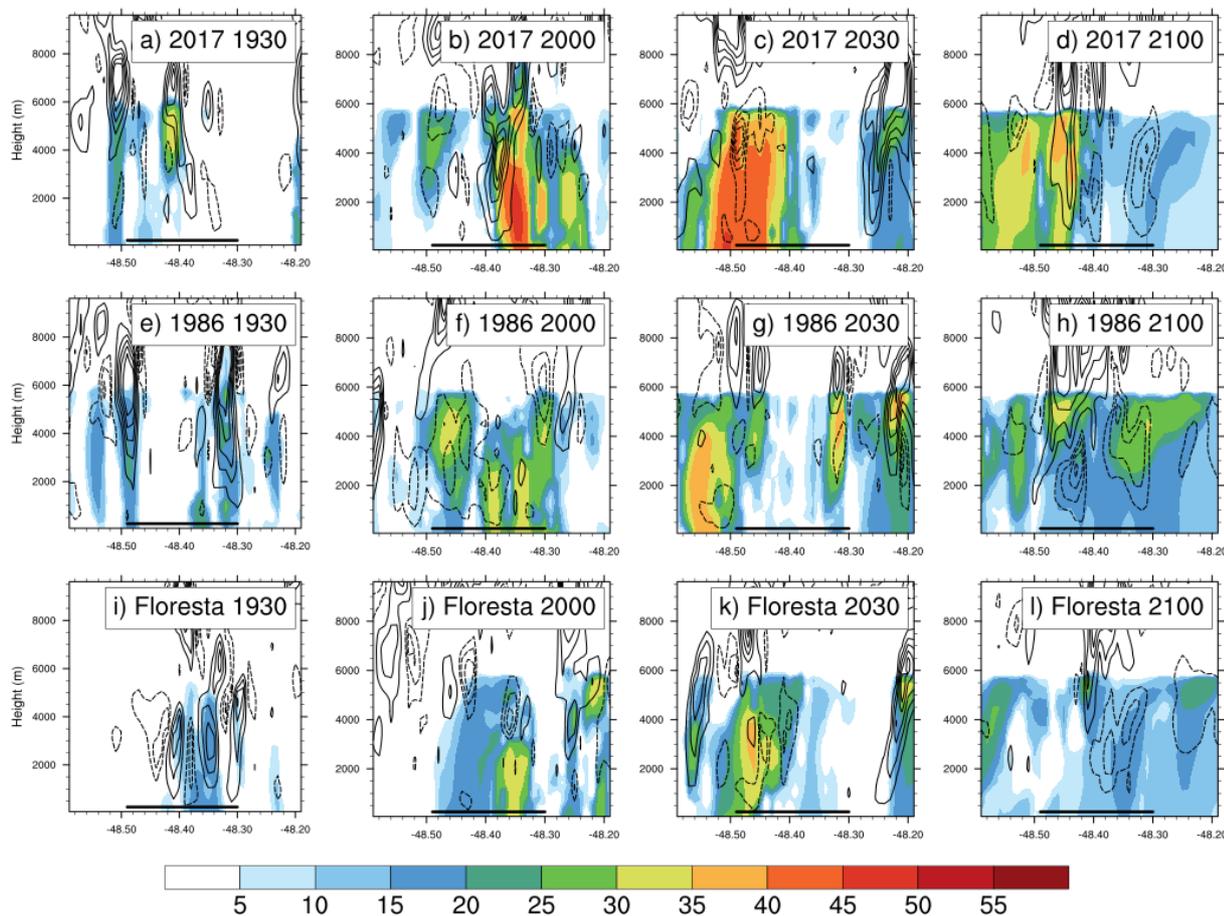
estrutura similar a 2017 pode ser observada na Floresta (Figura 3.8.j), porém com menor altura e menor refletividade.

No horário seguinte, as 2030 UTC, a tempestade continua seu movimento para oeste em todos os cenários. Porém a tempestade de 2017 (Figura 3.8.c) é mais larga, com uma área maior com refletividade superior a 35 dBZ e a presença de velocidade negativa no topo da nebulosidade, provavelmente associada a precipitação. Na Floresta a tempestade abrange uma área menor (Figura 3.8.k), com um núcleo apresentando refletividade superior a 30 dBZ e também observa-se velocidade negativa na retaguarda desta região, porém, a possível precipitação associada possui intensidade leve, pois não há alto valor de refletividade associado a mesma. Em 1986 (Figura 3.8.g), a tempestade encontra-se sobre o rio, a oeste da RMB, sem velocidade vertical significativa associada a refletividade.

No último horário exibido (2100 UTC), apenas nuvens altas podem ser observadas sobre a RMB em 1986 (Figura 3.8.h) e na Floresta (Figura 3.8.l). Em 2017 (Figura 3.8.d), ainda é possível observar velocidade vertical positiva sobre a RMB, mantendo a nebulosidade em uma coluna mais profunda da atmosfera.

Figura 3.7- Corte longitudinal através da latitude 1.38°S da refletividade (dBZ, sombreado) e a velocidade vertical do vento (m/s, linhas). A linha próxima ao eixo X representa a RMB. Velocidade vertical negativa (linha tracejada) varia entre -5m/s e 0m/s, a cada 0.5m/s, e a velocidade vertical positiva (linha contínua) varia entre 0m/s e +5m/s, a cada 1m/s. A linha de velocidade vertical de 0m/s foi omitida.

Refletividade (dBZ) e Velocidade Vertical (m s-1) | Lat: -1.38



O desenvolvimento de uma tempestade ocorre devido ao transporte de umidade e energia (calor) da superfície para níveis mais altos da atmosfera por esta corrente ascendente e pode ser expresso através da Temperatura Potencial Equivalente (θ_E). Este parâmetro corresponde a temperatura de que uma parcela teria caso fosse trazida adiabaticamente para um nível de referência (em geral, 1000 hPa) e toda sua umidade condensada, liberando calor latente e aquecendo a parcela. Assim, uma parcela de ar seco e frio apresentará baixo θ_E em comparação a uma parcela de ar quente e úmida (MIYAMOTO; NOLAN, 2018; WHITE et al., 2019).

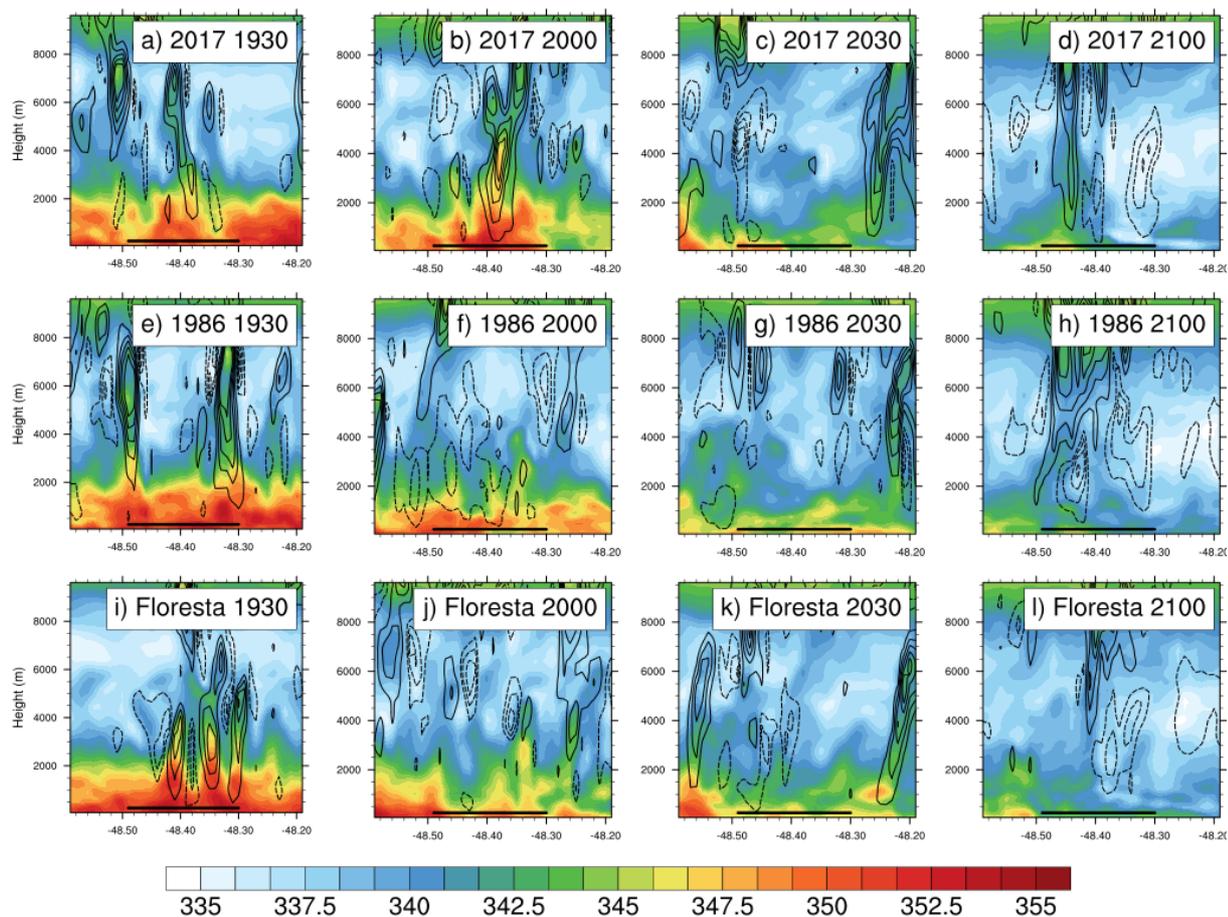
No cenário de 2017 nota-se como as características de θ_E da superfície são transportadas pela corrente ascendente, no mesmo local onde a nebulosidade é formada (Figura 3.9.c). No entanto, esse movimento ascendente gera corrente descendente de ar,

transportando ar seco e frio de altitude para a superfície, observável pela redução de θ_e nas camadas mais baixas do modelo.

Este transporte de ar seco e frio pode resultar no enfraquecimento e/ou dissipação do sistema, mas também pode ser útil para manter o sistema ativo. Quando a precipitação começa e esse movimento descendente (subsistência) se inicia (devido a queda das gotículas de chuva), a vanguarda da corrente é úmida por causa da água e ao chegar na superfície, essa corrente se move para os lados e ao entrar em contato com o escoamento básico, converge e pode novamente transportar para cima energia e a umidade que estava na vanguarda, regenerando a tempestade antiga ou gerando uma nova célula, de qualquer forma, o sistema permanece ativo por mais tempo. No caso de 2017, a tempestade é mais larga e mais profunda, a quantidade de gotículas de água é consideravelmente maior do que nos outros cenários, e a subsistência gerada pela precipitação é mais forte. No horário de 2030 UTC, no cenário de 2017 (Figuras 18.c e 19.c), há movimento descendente dentro da região com nebulosidade (provavelmente associado a precipitação) e redução de θ_e nas camadas baixas, porém a leste dessa região há um aumento gradual de θ_e , uma nova corrente ascendente e nebulosidade, evidenciando este processo de manutenção do sistema.

Figura 3.8- Corte longitudinal através da latitude 1.38°S de Temperatura Potencial Equivalente (θ_E) e a velocidade vertical do vento (m/s, linhas). A linha próxima ao eixo X representa a RMB. Velocidade vertical negativa (linha tracejada) varia entre -5m/s e 0m/s, a cada 0.5m/s, e a velocidade vertical positiva (linha contínua) varia entre 0m/s e +5m/s, a cada 1m/s. A linha de velocidade vertical de 0m/s foi omitida.

Temp. Pot. Equi. (K) e Velocidade Vertical (m s-1) | Lat: -1.38



Os resultados das Figuras 3.8 e 3.9 indicam que o desenvolvimento da tempestade é intensificado pelo cenário de 2017. Centros urbanos têm importantes características que podem influenciar a atmosfera local e alterar de formas diferentes o desenvolvimento de tempestades.

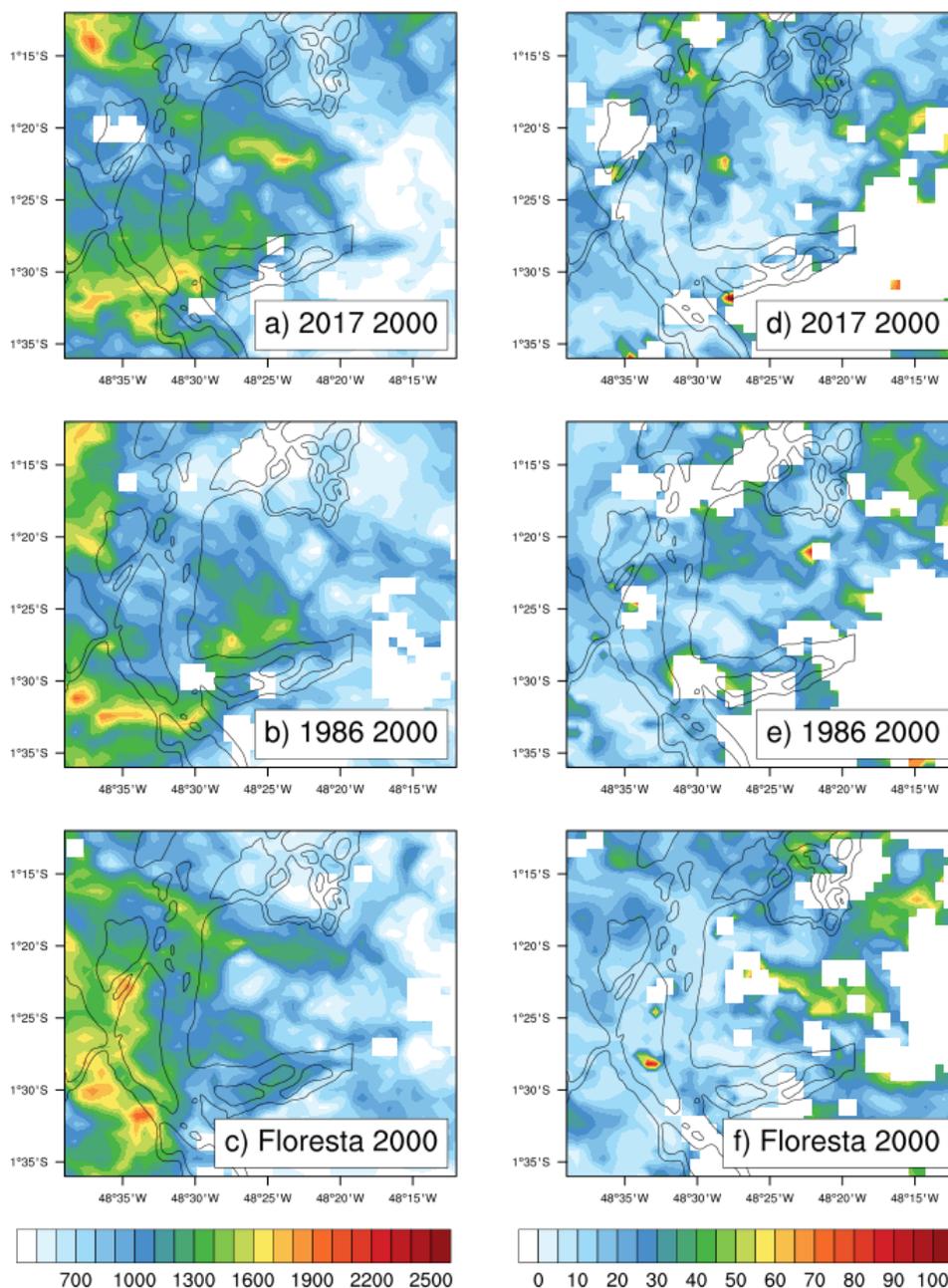
A Energia Potencial Convectiva Disponível (CAPE, em inglês) é um importante indicador do potencial para o desenvolvimento de tempestade, pois é uma estimativa da fluabilidade de uma parcela de ar na atmosfera. Uma parcela com alto valor de CAPE terá grande chance de se elevar na atmosfera, transportando calor e umidade para as camadas mais altas. Com o aumento de CAPE, este movimento (convecção) se intensifica e a tempestade cresce e se torna mais severa, produzindo mais precipitação e ventos de rajadas intensos e

capazes de danificar telhados, árvores, e linhas de transmissão de energia (GARSTANG et al., 1998).

De acordo com estudos anteriores, convecção moderada é esperada com CAPE entre 1000 e 2500 J/kg e convecção forte acima de 2500 J/kg (ROGASH; RACY, 2002; VAN KLOOSTER; ROEBBER, 2009). A força atuando contra a CAPE e prevenindo a elevação de uma parcela de ar é a Inibição de Convecção (CIN, em inglês), em outras palavras, é a energia necessária para uma parcela alcançar o seu nível de convecção livre (FRANK; COLBY JR, 1984). A estimativa de CAPE e CIN pelo modelo é apresentada na Figura 3.10. O centro da RMB apresenta um valor significativo de CAPE no cenário de 2017, característica que não observa nos demais cenários. A região sul e sudoeste da RMB é uma área comum com CAPE acima de 1000 J/kg para todos os cenários, especialmente para o de 1986, e onde CIN é, em geral, baixo.

Figura 3.9- CAPE (coluna da esquerda, J/kg) e CIN (coluna da direita, J/kg) em cada cenário às 2000 UTC.

CAPE e CIN



A variação dos valores de CAPE e CIN são resultados da diferença do balanço de energia gerado pela mudança nas características da superfície de cada cenário. Devido aos componentes de um centro urbano (matérias das construções, falta de vegetação, veículos, equipamentos, etc) e ao, conseqüente, maior armazenamento de energia, o fluxo de calor sensível da superfície também é intensificado (HOLLEY et al., 2014). O fluxo de calor sensível nas duas simulações com urbanização, 2017 e 1986) foi superior ao cenário com

apenas floresta (Figura 3.11), porém a maior área com classe urbana de “média densidade” e as características das classes de “alta densidade – favela” e “alta densidade” foram responsáveis por um fluxo de calor sensível mais intenso e com maior duração no cenário de 2017, se comparado com 1986. Todavia, o fluxo de calor latente foi maior no cenário de floresta (Figura 3.12), como esperado devido a reduzida área de vegetação nos cenários com urbanização. Este maior fluxo de calor latente pode ter sido o responsável pela intensificação da tempestade sobre a região da RMB no cenário de floresta.

Figura 3.10- Fluxo de calor sensível da superfície para a atmosfera (W/m^2 , sombreado) para 2017 (linha de cima), 1986 (linha do meio) e Floresta (linha de baixo) às 1930, 2000, 2030 e 2100 UTC.

Fluxo de calor sensível na superfície ($W.m^{-2}$)

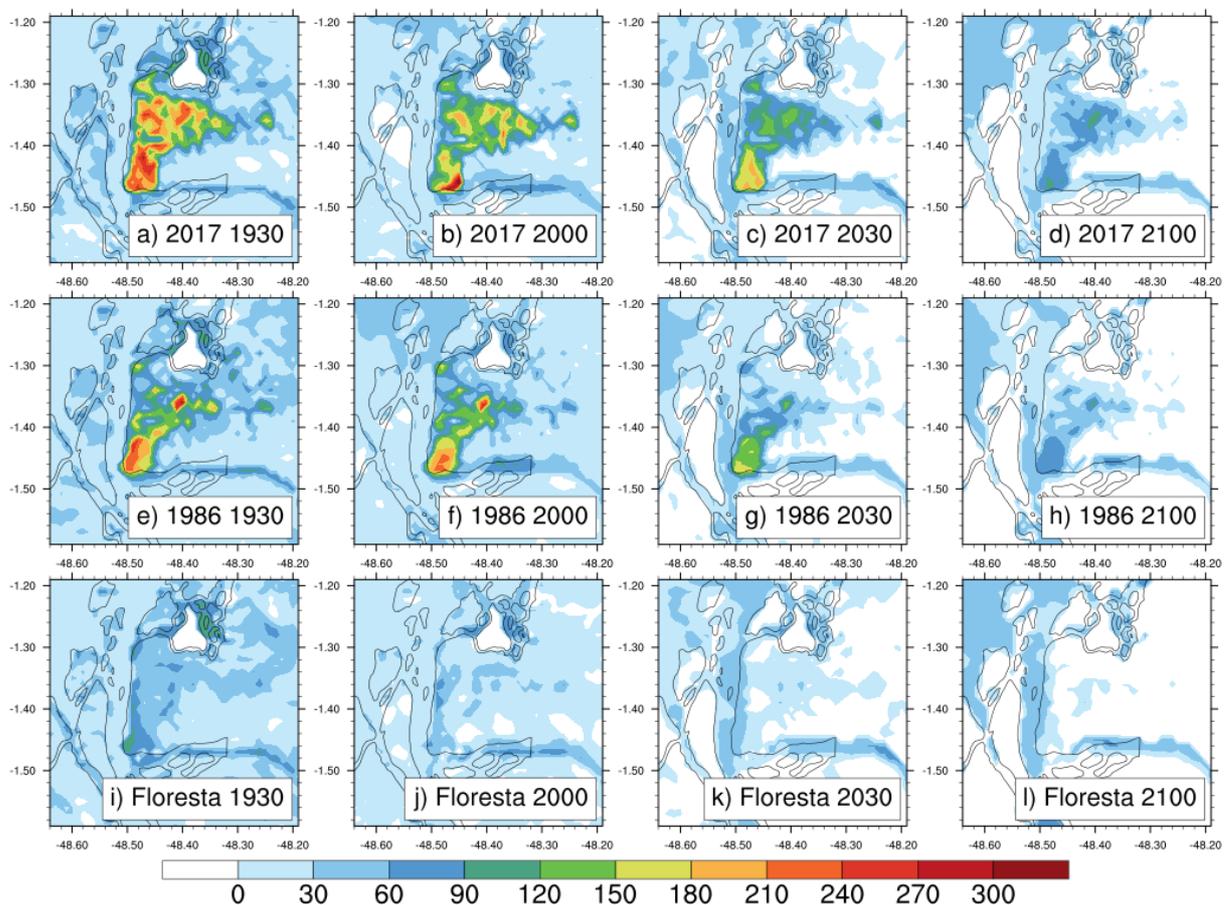
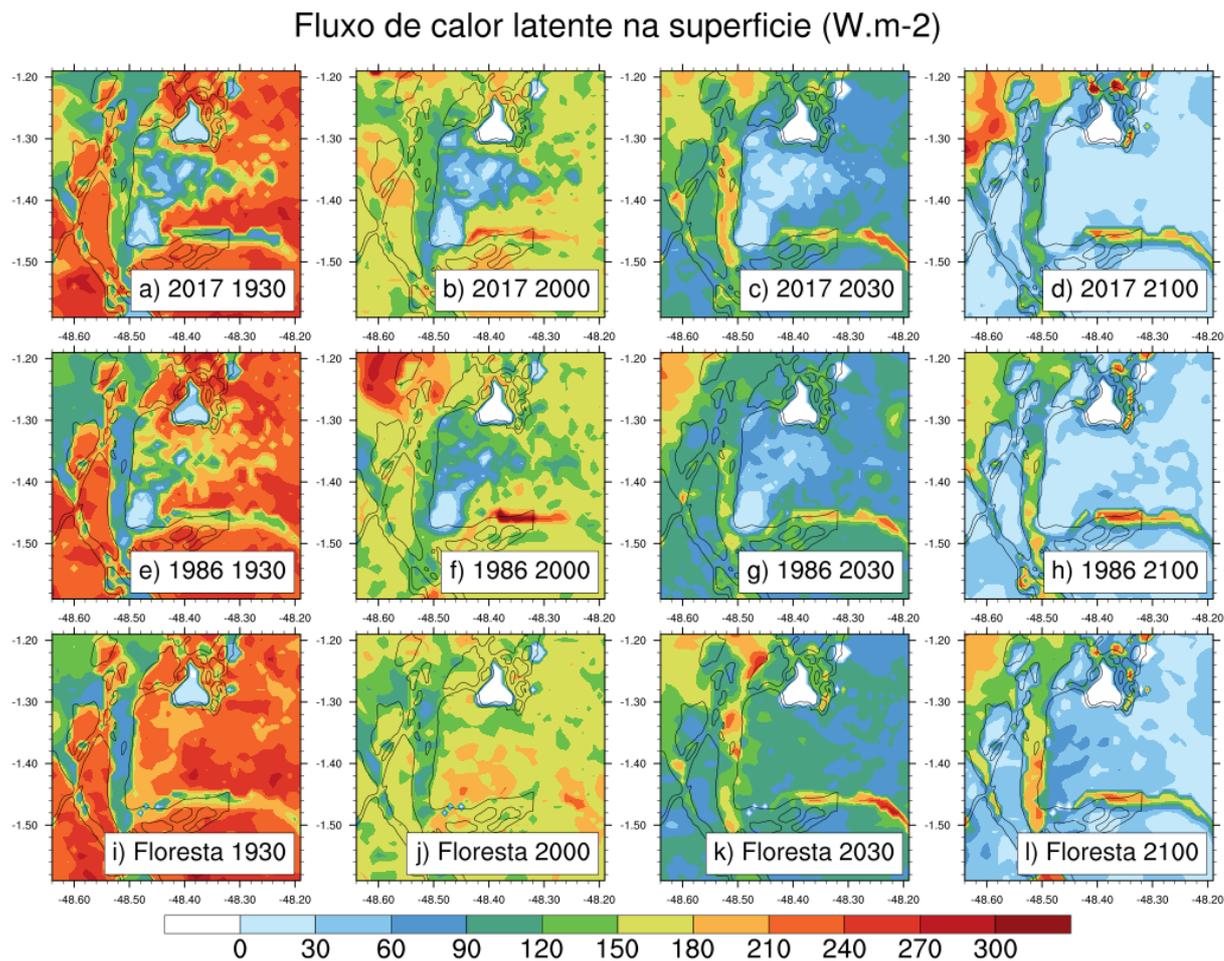


Figura 3.11- Fluxo de calor latente da superfície para a atmosfera (W/m^2 , sombreado) para 2017 (linha de cima), 1986 (linha do meio) e Floresta (linha de baixo) às 1930, 2000, 2030 e 2100 UTC.



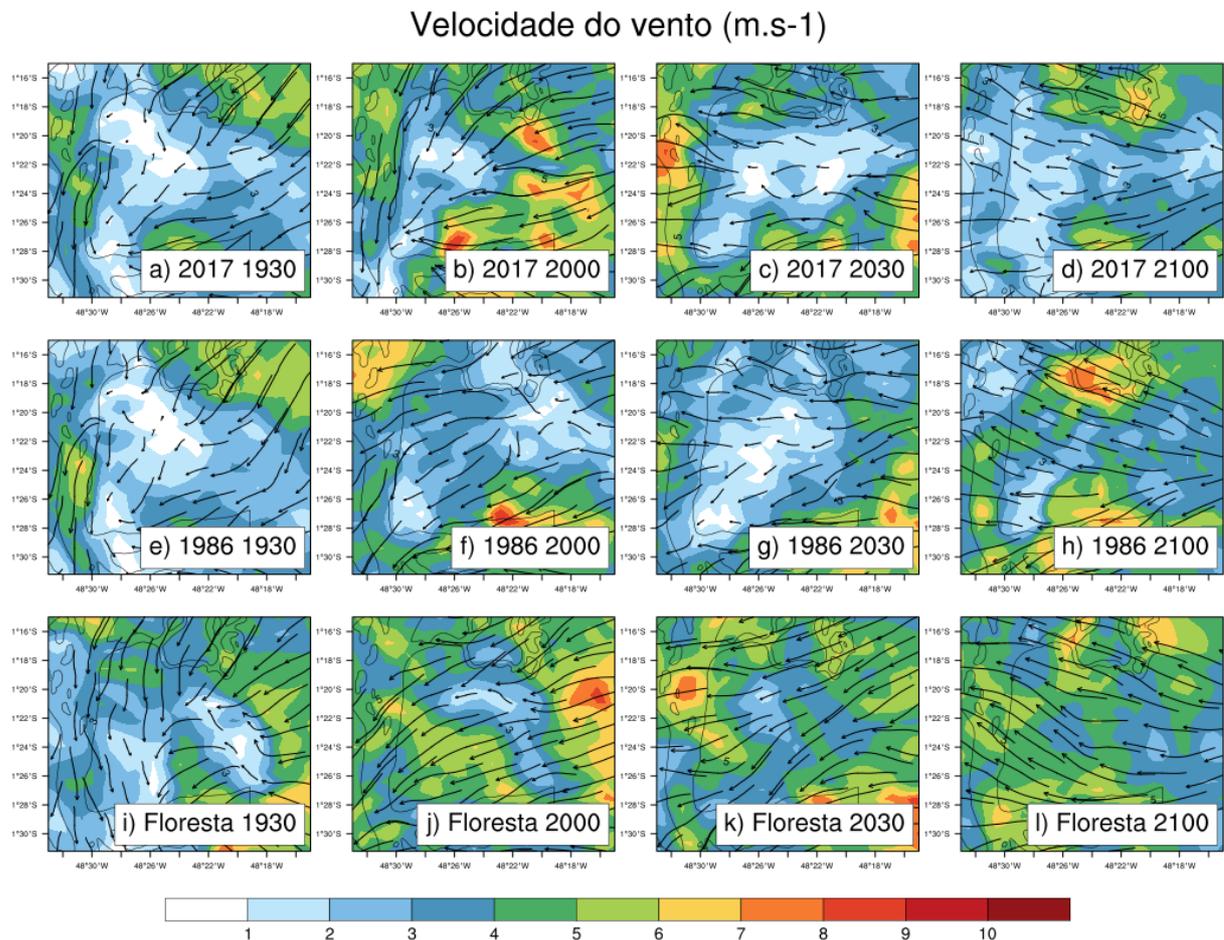
Santos et al. (2014) realizaram um estudo histórico (24 anos) de energia convectiva local e concluíram que a atmosfera da RMB está frequentemente favorável ao desenvolvimento de tempestades, com CAPE superior a $1000 J/kg$ sendo observada na maioria dos casos estudados. A CAPE no caso apresentado no presente estudo foi superior a $1000 J/kg$ nos cenários de 2017 e 1986, porém a tempestade foi diferente em cada situação, indicando a influência de algum outro mecanismo no seu desenvolvimento.

3.2.3. Variação Vertical e Horizontal do Vento

As diferentes alturas das construções dos centros urbanos aumentam a rugosidade da superfície, reduzem a velocidade do vento e aumentam a convergência em toda região, mantendo o sistema mais tempo sobre este local, permitindo-o se tornar mais forte (HABERLIE; ASHLEY; PINGEL, 2015; LIN et al., 2008; SHEPHERD, 2013; VARQUEZ; NAKAYOSHI; KANDA, 2014). Observa-se na Figura 3.13 como a velocidade do vento

horizontal é maior em todos os horários no cenário de floresta na RMB, e a convergência também é menor. Dos cenários urbanos, a velocidade é menor no cenário de 2017, aumentando a convergência de energia e umidade no interior da RMB e consequente intensificação da tempestade. No caso de 1986, a convergência é menor sobre a área urbana e a tempestade se desloca para oeste, sobre o rio. Após a tempestade, o escoamento do vento assume uma característica de leste em todos os cenários, mas continua sendo mais lento em 2017, contribuindo para que a tempestade permaneça ativa neste caso.

Figura 3.12- Velocidade do vento horizontal (sombreado) e vetor direção e velocidade do vento (setas) em 10m de altura em 2017 (linha de cima), 1986 (linha do meio) e Floresta (linha de baixo) às 1930, 2000, 2030 e 2100 UTC.



O perfil vertical da velocidade e direção do vento horizontal (Figura 3.14) confirma o encontrado através da Figura 3.13. A velocidade do vento, em superfície, é menor em 2017 devido a maior quantidade de prédios altos. Além disso, a variação da velocidade e da direção do vento com altura é maior em 2017, em outras palavras, o cisalhamento do vento é mais forte. Este é um importante fator no desenvolvimento de uma tempestade, pois são indicativos

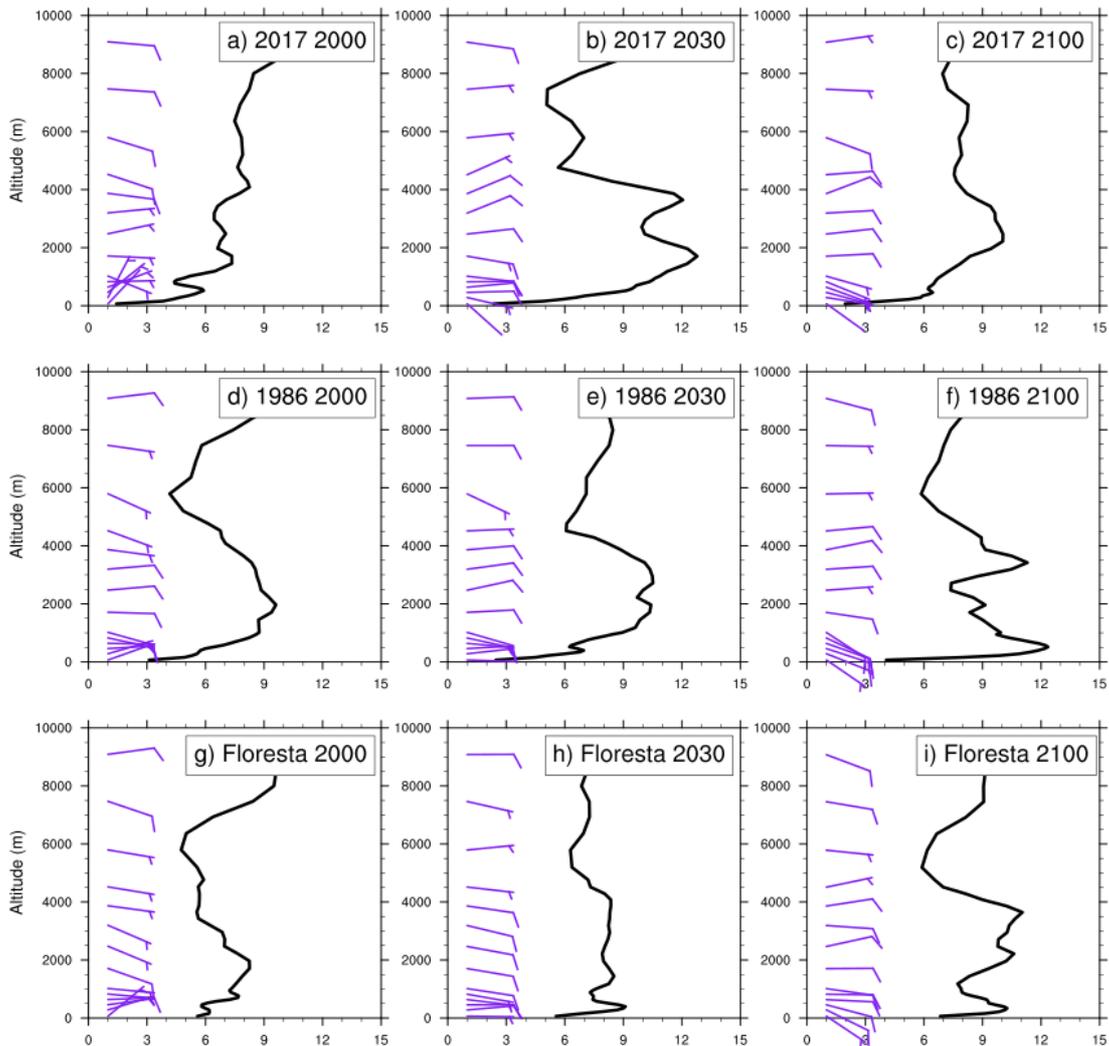
de movimento ascendente da corrente de ar associada à tempestade e, no caso da direção, de rotação desta corrente. Estes elementos são responsáveis por manter a tempestade ativa por um período mais longo (DRAGER; VAN DEN HEEVER, 2017; MELO et al., 2019; ROTUNNO; KLEMP; WEISMAN, 1988; TOMPKINS, 2001; WEISMAN; KLEMP, 1982).

Assim, são dois elementos importantes para uma tempestade: cisalhamento do vento e energia (CAPE). O balanço entre essas duas forças organiza a tempestade de forma a originar novas células na vanguarda do sistema antigo, mantendo-a ativa por mais tempo, enquanto que o desequilíbrio pode levar a dissipação da tempestade e/ou divisão da tempestade (CHEN et al., 2011; NIYOGI et al., 2011). O balanço entre o cisalhamento do vento e CAPE em 2017 e no observado pela radiossonda foi ideal (Ri_B igual a 22 e 28, respectivamente), ou seja, havia calor em superfície elevando o ar quente e úmido para camadas mais elevadas da atmosfera e o cisalhamento vertical do vento contribuiu para a manutenção e intensificação desse movimento ascendente, além de evitar que esta corrente se incline em demasia para a vanguarda ou retaguarda da tempestade (WEISMAN; ROTUNNO, 2004).

Os cenários de 1986 e de Floresta, o valor de Ri_b foi 0.001 e 0.001, ou seja, o cisalhamento foi mais forte do que a CAPE e a tempestade não conseguiu se desenvolver com a mesma intensidade do que em 2017.

Figura 3.13- Perfil vertical, no ponto da radiossonda, de velocidade do vento horizontal (linha preta) e direção do vento (barbelas) para os cenários de 2017 (linha de cima), 1986 (linha do meio) e floresta (linha de baixo) às 2000, 2030 e 2100 UTC. Cada traço menor nas barbelas de vento representa 5kts e os maiores 10 kts.

Velocidade e direção do vento



3.3. Sumário e Conclusão

1. O WRF conseguiu simular de forma satisfatória o sistema convectivo selecionado, permitindo que teste de sensibilidade fossem feitos com diferentes usos e coberturas do solo;
2. Os resultados indicam que a urbanização da RMB pode estar influenciando o desenvolvimento de tempestades severas na região, corroborando os resultados do Capítulo 2 relativos a estação meteorológica e a percepção de parte dos moradores de Belém de aumento da precipitação;

3. Diferenças significativas foram encontradas de acordo com as características urbanas atribuídas a RMB. No cenário de urbanização de 2017, a tempestade se intensifica sobre a área de estudo. Em 1986, a tempestade não se desenvolve sobre a RMB e sim a oeste, sobre o rio. Na Floresta, apesar de haver o desenvolvimento sobre a RMB, a tempestade abrange uma área menor e é menos intensa. A diferença observada foi causada pelo aumento do cisalhamento do vento e maior CAPE em 2017, elementos fundamentais para o desenvolvimento e intensificação de tempestades severas.
4. Finalmente, a Tabela 3.1 resume os resultados apresentados neste Capítulo. A simulação 2017 é a mais quente dos três cenários, implicando em um maior fluxo de calor sensível da superfície para a atmosfera, elevada CAPE e CIN menor. O fluxo de calor latente é mais elevado em todos os horários na Floresta, contribuindo para que a CAPE encontrada às 1930 UTC seja a mais elevada e mantendo a atmosfera úmida e favorável à formação de nebulosidade. A maior velocidade do vento horizontal e vertical em 1986 em comparação à simulação 2017, principalmente às 1930 UTC, favoreceram o desbalanceamento do cisalhamento do vento e CAPE, ajudando o sistema a se intensificar após a área urbana.

Tabela 3.1- Diferença entre 2017 (controle) e 1986 e Floresta em quatro horários UTC para as seguintes variáveis: Temperatura Potencial Equivalente (θ_e , °K), CAPE (J/kg), CIN (J/kg), fluxo vertical de calor latente (LH, W/m²) e calor sensível (S, W/m²), vento horizontal em 10m (VH, m/s) e vento vertical próximo à superfície (w, m/s) multiplicado por 10⁴.

| | Hora | θ_e | CAPE | CIN | LH | S | VH | w*10 ⁴ |
|-----------------|------|------------|---------|--------|--------|-------|-------|-------------------|
| 2017 -1986 | 1930 | 0.64 | -106.86 | 0.91 | -31.47 | 37.37 | -0.8 | -2.68 |
| | 2000 | 1.27 | 153.31 | -9.57 | -17.26 | 19.2 | 0.14 | 10.92 |
| | 2030 | 1.37 | 27.53 | -14.46 | -15.93 | 24.06 | 0.64 | 5.14 |
| | 2100 | 0.13 | 62.91 | 3.42 | -13.7 | 12.12 | -0.69 | -2.54 |
| 2017 - Floresta | 1930 | -0.95 | -247.36 | -1.27 | -94.91 | 83.98 | -0.82 | 6.86 |
| | 2000 | 0.47 | 125.57 | -6.51 | -81.92 | 77.17 | -1.11 | 33.15 |
| | 2030 | 1.83 | 59.45 | -3.52 | -64.82 | 65.74 | -1.34 | 54.88 |
| | 2100 | 1.16 | 62.42 | 6.74 | -40.88 | 41.21 | -1.63 | 22.3 |

4 CONCLUSÃO GERAL

Caso os cenários de mudanças climáticas propostos pelo IPCC se tornem realidade, diversos locais no mundo irão sofrer com os impactos destas mudanças. Períodos de estiagem se tornarão mais comuns, mais fortes e prolongados, tempestades severas serão frequentes, ondas de calor serão mais intensas, a agricultura será prejudicada, a escassez de alimentação poderá ser um problema e o ser humano sofrerá, especialmente aqueles que moram em centros urbanos, locais com potencial extra de mudança climática e onde a inúmeros fatores influenciam na vulnerabilidade de diferentes setores da população.

A principal área urbana de Belém, local de moradia de mais de 90% da população do município, já começa a sentir os efeitos da sua urbanização no clima. Esta tese abordou de forma direta a relação entre a urbanização, o clima e a população de forma pioneira através de metodologias meteorológicas e sociais.

Os resultados mostraram que, ao longo dos anos, Belém está ficando mais quente e mais seca, resultado esperado para uma região altamente urbanizada, mas, estações meteorológicas em localidades próximas e menos urbanizadas registraram tendências similares, inviabilizando a total correlação entre estas variáveis e as características urbanas de Belém. Por outro lado, o aumento de dias com eventos fortes de precipitação é exclusivo de Belém.

Outros trabalhos que estudaram o clima urbano de Belém não analisaram a variação da precipitação com a urbanização. Assim, através da modelagem numérica com o WRF e um detalhamento inédito do uso do solo para o município de Belém, onde as características do uso do solo em 2017 mostraram intenso desenvolvimento de tempestades severas, em comparação as características de uso do solo em 1986 (as quais enfraquecem a tempestade sobre a área urbana e a deslocam mais para cima dos rios próximos) e da Floresta (as quais mantem a tempestade sobre a área urbana, porém enfraquecida), como foi registrado pela estação meteorológica. Esta intensificação ocorre devido ao aumento da CAPE, induzido pela maior emissão de calor sensível pela superfície, e aumento do cisalhamento do vento, devido a maior rugosidade da superfície causada pela maior quantidade de prédios altos.

Todos estes resultados meteorológicos estão de acordo com o relatado por parte da população local. A partir de um Mapa de Tipologias Sócio – Ambientais desenvolvido para identificar locais com características populacionais e ambientais próximos, foi realizado um questionário sobre percepção ambiental, o primeiro do seu tipo em Belém. Os resultados indicaram que a maior parcela da população entrevistada também notou um aumento da

temperatura e da precipitação em Belém e que eles estão cientes da participação humana nestas alterações devido a expansão da urbanização, mesmo que grande parte dos participantes não saibam os conceitos científicos básicos sobre o assunto. A percepção dessas mudanças climáticas se deu, principalmente, por meio de experiências de vida, pois tais alterações impactaram a vida dos entrevistados, através de diferentes problemas de saúde, financeiro e alagamento. No entanto, as poucas estratégias de adaptação pessoal a esta nova condição meteorológica não demonstraram ser eficientes, algumas podendo até contribuir para o problema inicial (como o aumento do uso de ventilador aumentando a conta de luz e gerando mais despesas financeiras).

Os resultados apresentam hipóteses importantes sobre algumas características do município de Belém que ainda não haviam sido exploradas e podem ser aplicados em projetos futuros de planejamento urbano com o objetivo de melhorar o conforto e segurança ambiental da população local.

REFERÊNCIAS

- ABREU, C. **Capítulos da história colonial: 1500 – 1800**. Brasília,DF: Senado Federal, 1998.
- ADGER, W. N.; ARNELL, N. W.; TOMPKINS, E. L. Adapting to climate change: Perspectives across scales. **Global Environmental Change**, v. 15, n. 2, p. 75–76, 2005.
- ALEXANDRI, E.; JONES, P. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. **Building and Environment**, v. 43, n. 4, p. 480–493, 2008.
- ALFACE, A. B. *et al.* Sugarcane spatial-temporal monitoring and crop coefficient estimation through NDVI. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 5, p. 330–335, 6 maio 2019.
- ALIABADI, A. A. *et al.* Effects of roof-edge roughness on air temperature and pollutant concentration in urban Canyons. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 164, n. 2, p. 249–279, 2017.
- ALVES, E. D. L. Ilha de calor urbana em cidade de pequeno porte e a influencia de variáveis geourbanas. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 20, p. 97–116, 2017.
- ANGUELOVSKI, I.; CHU, E.; CARMIN, J. Variations in approaches to urban climate adaptation: Experiences and experimentation from the global South. **Global Environmental Change**, v. 27, n. 1, p. 156–167, 2014.
- 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 of Climatology**, v. 23, n. 1, p. 1–26, 2003.
- AYERS, J.; FORSYTH, T. Community-based adaptation to climate change: strengthening resilience through development. **Environment: Science and Policy for Sustainable Development**, v. 51, n. 4, p. 22–31, set. 2009.
- AZEVEDO, T. *et al.* Ilhas de calor e aedes aegypti : um estudo preliminar para a cidade de Santa Bárbara d'oeste, SP – Bra, utilizando sensoriamento remoto. *In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE ECOLOGIA URBANA*, 2012, Buenos Aires, Argentina. **Anais[...]** Buenos Aires, Argentina: 2012. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/268207670%0AIlhas>. Acesso em 04/04/2020.
- BAI, X. *et al.* Six research priorities for cities and climate change. **Nature**, v. 555, n. 7694, p. 23–25, 2018.
- BARROS, N. S. *et al.* As unidades de desenvolvimento humano na região metropolitana de belém. *In: BRASIL. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Territórios em números: insumos para políticas públicas a partir da análise do IDHM e do IVS de UDHs e regiões metropolitanas brasileiras*. BrasíliaDF: IPEA, 2017. p. 227–260.

BASSETT, T. J.; FOGELMAN, C. Deja vu or something new? The adaptation concept in the climate change literature. **Geoforum**, v. 48, p. 42–53, 2013.

BASTOS, T. X. *et al.* Aspectos climáticos de Belém nos últimos cem anos. **Série Documentos (Embrapa Amazônia Oriental)**, v. 128, p. 31, 2002.

BATTAGLINI, A. *et al.* European winegrowers' perceptions of climate change impact and options for adaptation. **Regional Environmental Change**, v. 9, n. 2, p. 61–73, 2009.

BELÉM. Prefeitura Municipal de Belém. **Plano diretor do município de Belém**, 2008.

BIAGINI, B. *et al.* A typology of adaptation actions: A global look at climate adaptation actions financed through the Global Environment Facility. **Global Environmental Change**, v. 25, n. 1, p. 97–108, 2014.

BLASING, T. J. **Recent greenhouse gas concentration**. Disponível em: http://cdiac.ess-dive.lbl.gov/pns/current_ghg.html. Acesso em: 31 out. 2017.

BOCHEVA, L. *et al.* Severe convective supercell outbreak over western Bulgaria on July 8, 2014. **Időjárás**, v. 122, n. 2, p. 177–202, 2018.

BODEN, T. A.; MARLAND, G.; ANDRES, R. J. **Global, regional, and national fossil-Fuel CO2 emissions**. Disponível em: <https://cdiac.ess-dive.lbl.gov>. Acesso em: 21 out. 2019.

BORGES, L. S.; SOUZA, E. B. Classificação de eventos extremos aplicando o método dos percentis. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CLIMATOLOGIA, 4., 2011, João Pessoa. **Anais[...]** João Pessoa, 2011. Disponível em: <http://www.sbmet.org.br/sic2011/arq/03712968541430371296854.pdf>. 03/08/2018.

BORNSTEIN, R.; LIN, Q. Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: Three case studies. **Atmospheric Environment**, v. 34, n. 3, p. 507–516, 2000.

BOYKOFF, M. T.; BOYKOFF, J. M. Climate change and journalistic norms: A case-study of US mass-media coverage. **Geoforum**, v. 38, n. 6, p. 1190–1204, 2007.

BRASIL ESCOLA. **A urbanização de Belém no final do século XIX**. Disponível em: <http://meuartigo.brasilecola.uol.com.br/historia-do-brasil/a-urbanizacao-belem-no-final-seculo-xix-1.htm>. Acesso em: 11 set. 2017.

CAMPOS, T. L. O. B.; MOTA, M. A. S.; SANTOS, S. R. Q. Eventos extremos de precipitação em Belém-PA: uma revisão de notícias históricas de jornais. **Ambiente & Água**, v. 9, n. 3, p. 445–458, 2014.

CAPSTICK, S. *et al.* International trends in public perceptions of climate change over the past quarter century. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 6, n. 1, p. 35–61, 1 jan. 2015.

CARDOSO, A. C. D.; VENTURA NETO, R. A evolução urbana de belém: trajetória de ambiguidades e conflitos sócio-ambientais. **Cadernos Metrópole (PUCSP)**, v. 1, p. 55–76, 2013.

CHAN, S. Y.; CHAU, C. K.; LEUNG, T. M. On the study of thermal comfort and perceptions of environmental features in urban parks: A structural equation modeling approach. **Building and Environment**, v. 122, p. 171–183, 2017.

CHEN, F. *et al.* Modeling of land surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 101, n. D3, p. 7251–7268, 20 mar. 1996.

CHEN, F. *et al.* The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems. **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 2, p. 273–288, 2011.

CHEN, F.; YANG, X.; ZHU, W. WRF simulations of urban heat island under hot-weather synoptic conditions: the case study of Hangzhou city, China. **Atmospheric Research**, v. 138, p. 364–377, 2014.

COHEN, J. C. P. *et al.* Radar-observed spatial and temporal rainfall variability near the Tapajós-Amazon confluence. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, p. 23–30, 2014.

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

FRANK, P.; COLBY JR., F. P. **Convective inhibition as a predictor of convection during Ave-Sesame Iimonthly Weather review**, 1984. Disponível em: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0493%281984%29112%3C2239%3ACIAAPO%3E2.0.CO%3B2>. Acesso em: 13/04/2020.

COOPERATIVE PROGRAM FOR OPERATIONAL METEOROLOGY, EDUCATION AND TRAINING - COMET. **MetEd**. Disponível em: <https://www.meted.ucar.edu/>. Acesso em: 20 mar. 2020.

CONDORELLI, G. E. *et al.* Comparative aerial and ground based high Throughput phenotyping for the genetic dissection of NDVI as a proxy for drought adaptive traits in Durum wheat. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, p. 893, Jun. 2018. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00893>.

CORRÊA, L. V. **Análise dos efeitos térmicos de superfície na cidade de Belém utilizando imagens de satélite**. Orientadora: Maria Isabel Vitorino. 2011. 80f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

COSTA, A. C. *et al.* Variações termo-higrométricas e estudo de ilha de calor urbana na cidade de Bragança-PA e circunvizinhança. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 2, p. 571–584, 2016.

COUTTS, A. M.; BERINGER, J.; TAPPER, N. J. Impact of increasing urban density on local climate: Spatial and temporal variations in the surface energy balance in Melbourne, Australia. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 46, n. 4, p. 477–493, 2007.

CPTEC/DSA. **Imagens de satélite GOES-12.** Disponível em: <http://satelite.cptec.inpe.br/home/index.jsp>. Acesso em: 27 dez. 2019.

CUI, Y. *et al.* Influence of urbanization factors on surface urban heat island intensity: a comparison of countries at different developmental phases. **Sustainability (Switzerland)**, v. 8, n. 8, p. 706, 2016. <https://doi.org/10.3390/su8080706>.

D'ALMEIDA, C. *et al.* The effects of deforestation on the hydrological cycle in Amazonia: a review on scale and resolution. **International Journal of Climatology**, v. 27, n. 5, p. 633–647, abr. 2007.

DAVID, R. E.; MCGREGOR, G. R.; ENFIELD, K. B. Humidity: A review and primer on atmospheric moisture and human health. **Environmental Research**, v. 144, n. 2, p. 106–116, Jan. 2016.

DEBBAGE, N.; SHEPHERD, J. M. The urban heat island effect and city contiguity. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 54, p. 181–194, Nov. 2015.

DORIGON, L. P.; AMORIM, M. C. C. T. Estrutura térmica da superfície de Paranavaí/PR através do LANDSAT 7. **Caderno Prudentino de Geografia**, v. 35, p. 110–129, 2013.

DRAGER, A. J.; VAN DEN HEEVER, S. C. Characterizing convective cold pools. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 9, n. 2, p. 1091–1115, Jun. 2017.

DU, Y. *et al.* Effects of lift-up design on pedestrian level wind comfort in different building configurations under three wind directions. **Building and Environment**, v. 117, p. 84–99, 2017.

ERIKSEN, S. E. H.; BROWN, K. Sustainable adaptation to climate change. **Climate and Development**, v. 3, n. August, p. 3–6, 2011.

FERREIRA, D. B. S. *et al.* Spatial and temporal variability of rainfall in Eastern Amazon during the rainy season. **The Scientific World Journal**, v. 2015, ID 209783, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/209783>.

FERRIER, B. *et al.* Implementation of a new grid-scale cloud and precipitation scheme in the NCEP Eta model. *In*: CONF. ON WEATHER ANALYSIS AND FORECASTING, 19th.; CONF. ON NUMERICAL WEATHER PREDICTION, 15th. **Anais[...]**. Seattle: American Meteorological Society, 2002. Disponível em: https://ams.confex.com/ams/SLS_WAF_NWP/webprogram/Paper47241.html. Acesso em: 13/04/2020.

FLATOW, D. **Density, carbon emissions, transportation and energy efficiency.** Disponível em: https://soa.utexas.edu/sites/default/disk/global_challenges/global_challenges/09_02_su_flatow_dana_paper_ml.pdf. Acesso em: 1 out. 2019.

FREITAG, B. M.; NAIR, U. S.; NIYOGI, D. Urban modification of convection and Rainfall in complex terrain. **Geophysical Research Letters**, v. 45, n. 5, p. 2507–2515, 2018.

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.

FRUMKIN, H. Urban sprawl and public health. **Public Health Reports**, v. 117, n. 3, p. 201–217, 2002.

GANDHI, G. M. *et al.* Ndvi: vegetation change detection using remote sensing and gis – a case study of Vellore district. **Procedia Computer Science**, v. 57, p. 1199–1210, 2015.

GANDU, A. W.; COHEN, J. C. P.; SOUZA, J. R. S. de. Simulation of deforestation in eastern Amazonia using a high-resolution model. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, n. 1–3, p. 123–135, 2004.

GARCIA-CARRERAS, L. *et al.* The impact of convective cold pool outflows on model biases in the Sahara. **Geophysical Research Letters**, v. 40, n. 8, p. 1647–1652, 2013.

GARSTANG, M. *et al.* Amazon coastal squall lines. Part I: structure and kinematics. **Monthly Weather Review**, v.122, n.4, p. 608-622, 1994.

GARSTANG, M. *et al.* Convective cloud downdrafts as the cause of large blowdowns in the Amazon rainforest. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 67, n. 1–4, p. 199–212, 1998.

GERMANO, M. F. *et al.* Analysis of the breeze circulations in Eastern Amazon: an observational study. **Atmospheric Science Letters**, v. 18, n. 2, p. 67–75, 2017.

GHIL, M. Natural climate variability. *In*: MUNN, T. E.; MACCRACKEN, M. (eds.). **Encyclopedia of global environmental change**. Hoboken, New Jersey: John Wiley, 2002. p. 544–549.

GIANNAROS, T. M. *et al.* Numerical study of the urban heat island over Athens (Greece) with the WRF model. **Atmospheric Environment**, v. 73, p. 103–111, July. 2013.

GOOGLE TRENDS. **Google trends**. Disponível em: www.google.com/trends. Acesso em: 13 abr. 2019.

GRIMMOND, S. Urbanization and global environmental change: local effects of urban warming. **The Geographical Journal**, v. 173, n. 1, p. 83–88, Mar. 2007.

GROPP, M. E.; DAVENPORT, C. E. The Impact of the Nocturnal Transition on the Lifetime and Evolution of Supercell Thunderstorms in the Great Plains. **Weather and Forecasting**, v. 33, n. 4, p. 1045–1061, Ago. 2018.

GRUNDMANN, R. “Climategate” and the scientific ethos. **Science, Technology, & Human Values**, v. 38, n. 1, p. 67–93, 23 Jan. 2013.

GÜLTEN, A.; AKSOY, U. T.; ÖZTOP, H. F. Influence of trees on heat island potential in an urban canyon. **Sustainable Cities and Society**, v. 26, p. 407–418, 2016.

GUO, G. *et al.* Impacts of urban biophysical composition on land surface temperature in urban heat island clusters. **Landscape and Urban Planning**, v. 135, p. 1–10, 2015.

HABERLIE, A. M.; ASHLEY, W. S.; PINGEL, T. J. The effect of urbanisation on the climatology of thunderstorm initiation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 141, n. 688, p. 663–675, 2015.

HAGEN, M.; BARTENSCHLAGER, B.; FINKE, U. Motion characteristics of thunderstorms in southern Germany. **Meteorological Applications**, v. 6, n. 3, p. 227–239, 1999.

HANSEN, M. C. *et al.* Comparing annual MODIS and PRODES forest cover change data for advancing monitoring of Brazilian forest cover. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 10, p. 3784–3793, 2008.

HARLAN, S. L. *et al.* Neighborhood microclimates and vulnerability to heat stress. **Social Science and Medicine**, v. 63, n. 11, p. 2847–2863, 2006.

HARRISON, M. R. The media and public perceptions of climate change. **American Meteorological Society**, v. 63, p. 730–738, 1982.

HEISLER, G. M. Mean wind speed below building height in residential neighborhoods with different tree densities. **ASHRAE transactions**, v. 96, n. 1, p. 1389–1396, 1990.

HEROLD, N.; KALA, J.; ALEXANDER, L. V. The influence of soil moisture deficits on Australian heatwaves. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 6, p. 064003, Jun. 2016.

HOLLEY, D. M. *et al.* A climatology of convective available potential energy in Great Britain. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 14, p. 3811–3824, 2014.

HONG, B.; LIN, B. Numerical studies of the outdoor wind environment and thermal comfort at pedestrian level in housing blocks with different building layout patterns and trees arrangement. **Renewable Energy**, v. 73, p. 18–27, 2015.

HOWARD, L. **The climate of London**. [S.l.] International Association for Urban Climate, 2008.

HOWE, P. D. *et al.* Global perceptions of local temperature change. **Nature Climate Change**, v. 3, n. 4, p. 352–356, 2012.

HUANG, B.; NI, G. H.; GRIMMOND, C. S. B. Impacts of urban expansion on relatively smaller surrounding cities during heat waves. **Atmosphere**, v. 10, n. 7, p. 364, 2019. <https://doi.org/10.3390/atmos10070364>.

HUANG, G.; ZHOU, W.; CADENASSO, M. L. Is everyone hot in the city? Spatial pattern of land surface temperatures, land cover and neighborhood socioeconomic characteristics in Baltimore, MD. **Journal of Environmental Management**, v. 92, n. 7, p. 1753–1759, 2011.

HUETE, A. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295–309, Ago. 1988.

IACONO, M. J. *et al.* Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: calculations with the AER radiative transfer models. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 113, n. 13, p. 2–9, 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA-IBGE. **Cidades**. Belém. Disponível em: <http://cod.ibge.gov.br/3AW>. Acesso em: 9 mar. 2020a.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA-IBGE. **Cidades**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 10 mar. 2020b.

ICHINOSE, T.; SHIMODOZONO, K.; HANAKI, K. Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. **Atmospheric Environment**, v. 33, n. 24–25, p. 3897–3909, 1999.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA-INMET. **Clima**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/graficosClimaticos>. Acesso em: 12 jan. 2020.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE-IPCC. Annex I: glossary. *In*: MATTHEWS, J. B. R. (ed.). **Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change**. [S.l.]: 2018b. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/sr15/> Acesso em: 04/04/2020.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE-IPCC. **Climate change 2014 synthesis report summary chapter for policymakers**. Ipcc, 2014. p. 31.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE-IPCC. **Summary for policymakers - global warming of 1.5oC, an IPCC special report**. [S.l.]: IPCC, 2018a.

ISAAC, V.; VAN WIJNGAARDEN, W. A. Surface water vapor pressure and temperature trends in North America during 1948–2010. **Journal of Climate**, v. 25, n. 10, p. 3599–3609, maio 2012.

JANJIC, Z. I. The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. **Monthly Weather Review**, v. 122, p.927-945, 1994.

JANJIC, Z. I. The surface layer in the NCEP eta model. *In*: CONFERENCE ON NUMERICAL WEATHER PREDICTION, Eleventh, 1996, Norfolk, Vancouver. **Annales[...]** Norfolk, Vancouver: American Meteorological Society, 1996.

JAUREGUI, E.; ROMALES, E. Urban effects on convective precipitation in Mexico City. **Atmospheric Environment**, v. 30, n. 20, p. 3383–3389, 1996.

JENERETTE, G. D. *et al.* Regional relationships between surface temperature, vegetation, and human settlement in a rapidly urbanizing ecosystem. **Landscape Ecology**, v. 22, n. 3, p. 353–365, 2007.

KALNAY, E. Historical perspective: earlier ensembles and forecasting forecast skill. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 145, n. S1, p. 25–34, 2019.

KINGFIELD, D. M. *et al.* Effects of city size on thunderstorm evolution revealed through a multiradar climatology of the central United States. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 57, n. 2, p. 295–317, 2018.

KJELLSTROM, T. *et al.* Heat, human performance, and occupational health: a key issue for the assessment of global climate change impacts. **Annual Review of Public Health**, v. 37, n. 1, p. 97–112, 2016.

KONISKY, D. M.; HUGHES, L.; KAYLOR, C. H. Extreme weather events and climate change concern. **Climatic Change**, v. 134, n. 4, p. 533–547, 2016.

KUBOTA, T. *et al.* Wind tunnel tests on the relationship between building density and pedestrian-level wind velocity: development of guidelines for realizing acceptable wind environment in residential neighborhoods. **Building and Environment**, v. 43, n. 10, p. 1699–1708, 2008.

KUSAKA, H.; KIMURA, F. Thermal effects of urban Canyon structure on the Nocturnal heat Island: numerical experiment using a mesoscale model coupled with an urban Canopy model. **Journal of Applied Meteorology**, v. 43, n. 12, p. 1899–1910, 2004.

LEE, T. M. *et al.* Predictors of public climate change awareness and risk perception around the world. **Nature Climate Change**, v. 5, n. 11, p. 1014–1020, 27 Nov. 2015.

LEI, M.; NIYIOGI, D. Modeling based analysis of urban influences on severe thunderstorms. *In: AMERICAN GEOPHYSICAL UNION. Anais[...]*. West Lafayette: [s.n.], 2010. Disponível em: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2010AGUFM.B21E0370L>. Acesso em: 13/04/2020.

LEISEROWITZ, A. A. *et al.* Climategate, public opinion, and the loss of trust. **American Behavioral Scientist**, v. 57, n. 6, p. 818–837, 2013.

LI, Z.; ZUIDEMA, P.; ZHU, P. Simulated convective invigoration processes at trade wind cumulus cold pool Boundaries. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 71, n. 8, p. 2823–2841, 2014.

LIMA, M. A.; WILSON, J. W. Convective storm initiation in a moist tropical environment. **Monthly Weather Review**, v. 136, n. 6, p. 1847–1864, 2008.

LIN, C. Y. *et al.* Numerical study of the impact of urbanization on the precipitation over Taiwan. **Atmospheric Environment**, v. 42, n. 13, p. 2934–2947, 2008.

LOUREIRO, R. S. de *et al.* Estudo dos eventos extremos de precipitação ocorridos em 2009 no estado do Pará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. spe, p. 83–94, dez. 2014.

LUJALA, P.; LEIN, H.; RØD, J. K. Climate change, natural hazards, and risk perception: the role of proximity and personal experience. **Local Environment**, v. 20, n. 4, p. 489–509, 2015.

MACHADO, L. A. T. *et al.* The chuva project: how does convection vary across Brazil? **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 95, n. 9, p. 1365–1380, 2014.

MALLICK, J.; RAHMAN, A. Impact of population density on the surface temperature and micro-climate of Delhi. **Current Science**, v. 102, n. 12, p. 1708–1713, 2012.

MARENGO, J. A. *et al.* Changes in climate and land use over the Amazon region: current and future variability and trends. **Frontiers in Earth Science**, v. 6, p. 1–21, Dec. 2018.

MARTILLI, A. An idealized study of city structure, urban climate, energy consumption, and air quality. **Urban Climate**, v. 10, n. P2, p. 430–446, 2014.

MARTILLI, A.; CLAPPIER, A.; ROTACH, M. W. An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 104, p. 261–304, 2002.

MARU, Y. T. *et al.* A linked vulnerability and resilience framework for adaptation pathways in remote disadvantaged communities. **Global Environmental Change**, v. 28, p. 337–350, 2014.

MATLAB. **Graythresh.** Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/graythresh.html>. Acesso em: 10 jan. 2019.

MATOS, A. P.; COHEN, J. C. P. Circulação de brisa fluvial e a banda de precipitação Na margem Leste da baía de Marajó. **Ciência e Natura**, v. 38, p. 21, 2016.

MCWILLIAMS, K. L. **The influence of urbanization on tornado development in the central United States: a case study of 30 metropolitan statistical areas.** [S.l.] George Washington University, 2010.

MELO, A. M. Q. *et al.* Ozone transport and thermodynamics during the passage of squall line in Central Amazon. **Atmospheric Environment**, v. 206, n. June 2018, p. 132–143, 2019.

METOFFICE. **What is meteorology?** Disponível em: <https://www.metoffice.gov.uk/about-us/what/what-is-meteorology>. Acesso em: 11 jan. 2020.

MIAO, S. *et al.* Impacts of urbanization on a summer heavy rainfall in Beijing. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN CLIMATE, Seventh.* **Anais[...]**. Japan: Yokohama, 2009.

MIAO, S. *et al.* Impacts of urban processes and urbanization on summer precipitation: A case study of heavy rainfall in Beijing on 1 august 2006. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 50, n. 4, p. 806–825, 2011.

MIYAMOTO, Y.; NOLAN, D. S. Structural changes preceding rapid intensification in tropical cyclones as shown in a large ensemble of idealized simulations. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 75, n. 2, p. 555–569, Fev. 2018.

MÖLDERS, N.; OLSON, M. A. Impact of urban effects on precipitation in high latitudes. **J. Hydrometeor**, v. 5, n. 1980, p. 409–429, 2004.

MOLION, L. C. B. Climatologia dinâmica da região Amazônica: mecanismos de precipitação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 2, n. 1, p. 107–117, 1987.

MOLLER, A. R. *et al.* The operational recognition of supercell thunderstorm environments and storm structures. **Weather and Forecasting**, v.9, n.3, p. 327-347, 1994.

MORAES, B. C. *et al.* Climatologia de precipitação na Amazônia. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 5, p. 1359–1373, 2015.

MOTE, T. L.; LACKE, M. C.; SHEPHERD, J. M. Radar signatures of the urban effect on precipitation distribution: a case study for Atlanta, Georgia. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 20, p. 2–5, 2007.

MUIS, S. *et al.* Flood risk and adaptation strategies under climate change and urban expansion: a probabilistic analysis using global data. **Science of The Total Environment**, v. 538, p. 445–457, Dez. 2015.

NAKATA-OSAKI, C. M.; CRISTINA, L.; SOUZA, L. de. Impacto da geometria do cânion urbano na intensidade de ilha de calor noturna: análise através de um modelo simplificado adaptado a um SIG. **Ambiente Construído**, p. 73–87, 2016.

NIYOGI, D. *et al.* Urban modification of thunderstorms: an observational storm climatology and model case study for the Indianapolis urban region. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 50, n. 5, p. 1129–1144, 2011.

NOAA. **MEI**. Disponível em: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/>. Acesso em: 27 dez. 2019.

NOAA. **Tropical South Atlantic**. Disponível em: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/tsa.data>. Acesso em: 4 abr. 2020.

NUNES, L. H. O papel da mídia na difusão da informação climática : o El Niño de 1997-98. **Geografia**, v. 32, p. 29–50, 2007.

OLIVEIRA, F. L.; NUNES, L. H. A percepção climática no município de Campinas , SP : confronto entre o morador urbano e o rural Resumo Introdução. **Geosul**, v. 22, n. 43, p. 77–102, 2007.

OLIVEIRA, J. M. G. C. A verticalização nos limites da produção do espaço: parâmetros comparativos entre Barcelona e Belém. *In*: COLÓQUIO INTERNACIONAL DE GEOCRÍTICA. **Anais[...]**. Porto Alegre, Brasil: [s.n], 2007.

OLIVEIRA, J. V.; VITORINO, M. I.; SÁ, L. D. A. Implication of Madden-Julian oscillation phase on the Eastern Amazon climate. **Atmospheric Science Letters**, v. 16, n. 3, p. 318–323, Jul. 2015.

OLIVEIRA, J. V. *et al.* Differences in precipitation and evapotranspiration between forested and deforested areas in the Amazon rainforest using remote sensing data. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, n. 6, p. 239, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7411-9>.

OLIVEIRA, M. C. F. *et al.* Climatologia urbana da cidade de Belém-Pará, através das precipitações e temperaturas do ar, das normais climatológicas de 1941 a 1970, 1971 a 2000 e da normal provisória de 2001 a 2015. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, p. 803–819, 2016.

ORLANSKI, I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 56, p. 527–530, 1975.

PATHIRANA, A. *et al.* Impact of urban growth-driven landuse change on microclimate and extreme precipitation - A sensitivity study. **Atmospheric Research**, v. 138, p. 59–72, 2014.

PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇA CLIMÁTICA-PBMC. **Impactos, vulnerabilidades e adaptação**. Rio de Janeiro: PBMC, 2013.

PEDUZZI, P. *et al.* Assessing global exposure and vulnerability towards natural hazards: the Disaster Risk Index. **Natural Hazards and Earth System Science**, v. 9, p. 1149–1159, 2009.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, n. 5, p. 1633–1644, 11 Out. 2007.

PERINI, K.; MAGLIOCCO, A. Effects of vegetation, urban density, building height, and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort. **Urban Forestry and Urban Greening**, v. 13, n. 3, p. 495–506, 2014.

PONTES, M. L. C. *et al.* Dinâmica das áreas de várzea do município de Belém/PA e a influência da precipitação pluviométrica na formação de pontos alagamentos / Dynamics of lowland areas in the city of Belém/PA and the influence of rainfall in the flooding points formation. **Caderno de Geografia**, v. 27, n. 49, p. 285, maio 2017.

PYRGOU, A.; SANTAMOURIS, M.; LIVADA, I. Spatiotemporal analysis of diurnal temperature range: effect of urbanization, cloud cover, solar radiation, and precipitation. **Climate**, v. 7, n. 7, p. 89, Jul. 2019.

RAY, P. S. **Mesoscale meteorology and forecasting**. [S.l.]: American Meteorological Society, 1986. DOI: 10.1007/978-1-935704-20-1.

RIBEIRO, H. V.; RYBSKI, D.; KROPP, J. P. Effects of changing population or density on urban carbon dioxide emissions. **Nature Communications**, v. 10, n. 1, p. 1–9, 2019.

RICHARDS, P.; VANWEY, L. Where deforestation leads to urbanization: how resource extraction is leading to urban growth in the Brazilian Amazon. **Nature and Society**, v. 105, p. 803–823, 2015.

RICHARDSON, H.; BASU, S.; HOLTSLAG, A. A. M. Improving Stable Boundary-Layer Height Estimation Using a Stability-Dependent Critical Bulk Richardson Number. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 148, n. 1, p. 93–109, 2013.

RODRIGUES, M. L. *et al.* A percepção ambiental como instrumento de apoio na gestão e na formulação de políticas públicas ambientais Environmental awareness as a support tool in the management and formulation of environmental public policies. **Saúde e Sociedade**, v. 21, p. 96–110, 2012.

ROGASH, J. A.; RACY, J. Some meteorological characteristics of significant tornado events occurring in proximity to flash flooding. **Weather and Forecasting**, v. 17, n. 1, p. 155–159, fev. 2002.

ROTUNNO, R. On the evolution of thunderstorm rotation. **Monthly Weather Review**, v. 109, p. 577–586, 1981.

ROTUNNO, R.; KLEMP, J. B.; WEISMAN, M. L. **A Theory for strong, long-lived squall lines** *journal of the atmospheric sciences*, 1988. Disponível em: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0469%281988%29045%3C0463%3AATFSL%3E2.0.CO%3B2>. Acesso em: 04/04/2020.

SAAD, S. I. *et al.* Can the deforestation breeze change the rainfall in Amazonia? A case study for the BR-163 highway region. **Earth Interactions**, v. 14, n. 18, p. 1–25, 2010.

SADECK, C. C. de A. *et al.* A percepção social e a gestão do risco natural de cheias em áreas urbanizadas em Belém-PA. **Revista de Geografia**, v. 34, n. 1, p. 268–289, 2017.

SANTAMOURIS, M.; KOLOKOTSA, D. On the impact of urban overheating and extreme climatic conditions on housing, energy, comfort and environmental quality of vulnerable population in Europe. **Energy and Buildings**, v. 98, p. 125–133, 2015.

SANTOS, J. S.; MOTA, M. A. S.; ROCHA, E. J. P. Classificação climatológica da energia potencial disponível para a convecção na cidade de Belém-PA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. spe, p. 60–72, dez. 2014.

SANTOS, E. B.; LUCIO, P. S.; SILVA, C. M. Santos e. Precipitation regionalization of the Brazilian Amazon. **Atmospheric Science Letters**, v. 16, n. 3, p. 185–192, 2015.

SANTOS, E. B.; LUCIO, P. S.; SANTOS E SILVA, C. M. Synoptic patterns of atmospheric circulation associated with intense precipitation events over the Brazilian Amazon. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 128, n. 1–2, p. 343–358, 2017.

SANTOS, F. DE O.; PIMENTEL, M. R. DOS S. Edificações e conforto térmico: a moradia como fonte de aprendizagem. **Caminhos da Geografia**, v. 13, p. 265–285, 2012.

SANTOS, I. R. *et al.* Educação ambiental e resíduos sólidos: percepção ambiental de alunos do ensino básico público em Belém/PA. In: FORUM INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 9., Porto Alegre. **Anais[...]** Porto Alegre, Brasil: 2018. Disponível em: <http://www.institutoventuri.org.br/ojs/index.php/firs/article/view/795/626>. Acesso em: 15/04/2020.

SANTOS, M. R. S.; VITORINO, M. I.; PIMENTEL, M. A. S. Vulnerabilidade e mudanças climáticas: análise socioambiental em uma mesorregião da Amazônia. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 12, n. 5, p. 842, 23 Ago. 2017.

SATYAMURTY, P. *et al.* Rainfall trends in the Brazilian Amazon basin in the past eight decades. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 99, n. 1–2, p. 139–148, 2010.

SATYAMURTY, P.; COSTA, C. P. W. da; MANZI, A. O. Moisture source for the Amazon basin: a study of contrasting years. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 111, n. 1–2, p. 195–209, 2013.

SAVOLAINEN, R. Approaches to socio-cultural barriers to information seeking. **Library & Information Science Research**, v. 38, n. 1, p. 52–59, Jan. 2016.

SAYEMUZZAMAN, M.; MEKONNEN, A.; JHA, M. K. Diurnal temperature range trend over North Carolina and the associated mechanisms. **Atmospheric Research**, v. 160, p. 99–108, Jun. 2015.

SEKERTEKIN, A.; ABDIKAN, S.; MARANGOZ, A. M. The acquisition of impervious surface area from LANDSAT 8 satellite sensor data using urban indices: a comparative analysis. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 190, n. 7, p. 381, Jun. 2018. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6767-3>.

SHAO, W. *et al.* Understanding perceptions of changing hurricane strength along the US Gulf coast. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 4, p. 1716–1727, Mar. 2017.

SHEPHERD, J. M. A Review of current investigations of urban-induced Rainfall and recommendations for the future. **Earth Interactions**, v. 9, n. 12, p. 1–27, Jul. 2005.

SHEPHERD, J. M. Impacts of urbanization on precipitation and storms: physical insights and vulnerabilities. **Climate Vulnerability**, v. 5, p. 109–125, 2013.

SHI, J. *et al.* Knowledge as a driver of public perceptions about climate change reassessed. **Nature Climate Change**, v. 6, n. 8, p. 759–762, 2016.

SHI, J.; VISSCHERS, V. H. M.; SIEGRIST, M. Public perception of climate change: the importance of Knowledge and cultural Worldviews. **Risk Analysis**, v. 35, n. 12, p. 2183–2201, 2015.

SILVA DIAS, M. A. F. *et al.* River breeze circulation in eastern Amazonia: observations and modelling results. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, n. 1–3, p. 111–121, 2004.

SILVA, G. V. *et al.* Percepção ambiental na área de proteção ambiental na ilha de Cotijuba, Belém, Pará. **Enciclopédia Biosfera**, v. 10, p. 3977–3985, 2014.

SILVA, J. M. P. da. *et al.* O traçado da primeira légua patrimonial (LPLP) e da linha preamar média (LPM) de 1831 da cidade de Belém. In: SILVA, C. N. *et al.* **Belém dos 400 anos: análises geográficas e impactos antropogênicos na cidade**. Belém: GAPTA/UFPA, p. 184–200.

SILVA JUNIOR, J. A. *et al.* Variabilidade espacial do conforto térmico e a segregação social do espaço urbano na cidade de Belém, PA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, p. 419–428, 2013.

SIMÕES, E. *et al.* Barriers and opportunities for adapting to climate change on the North Coast of São Paulo, Brazil. **Regional Environmental Change**, v. 17, n. 6, p. 1739–1750, Ago. 2017.

SISCO, M. R.; BOSETTI, V.; WEBER, E. U. When do extreme weather events generate attention to climate change? **Climatic Change**, v. 143, n. 1–2, p. 227–241, 2017.

SKAMAROCK, W. C. *et al.* **A Description of the advanced research WRF version 3NCAR Technical Note**. Disponível em: http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v2.pdf. Acesso em: 11 jan 2020.

SMIT, B.; WANDEL, J. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. **Global Environmental Change**, v. 16, n. 3, p. 282–292, 2006.

SODRÉ, G. *et al.* Teleconexões oceânicas nos padrões climatológicos da Amazônia Oriental: análise dos últimos 40 anos (1974 - 2013). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, p. 52–66, 2015.

SOUZA, D. O. **Influência da ilha de calor urbana nas cidades de Manaus e Belém sobre o microclima local**. 2012. 187 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, INPE São José dos Campos, 2012.

SOUZA, E. B. de *et al.* Sazonalidade da precipitação sobre a Amazônia Legal Brasileira: clima atual e projeções futuras usando o modelo Regcm4. **Revista Brasileira de Climatologia**, ano 12, v. 18, n. 0, p. 293-306, jan./jun. 2016.

SPENCE, A. *et al.* Perceptions of climate change and willingness to save energy related to flood experience. **Nature Climate Change**, v. 1, n. 1, p. 46–49, 2011.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local climate zones for urban temperature studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 12, p. 1879–1900, 2012.

TAHA, H. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. **Energy and Buildings**, v. 25, n. 2, p. 99–103, 1997.

TAKAGI, H.; ANH, L. T.; DANH THAO, N. 1997 Typhoon Linda storm surge and people's awareness 20 years later: Uninvestigated Worst storm event in the Mekong delta. **Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions**, p. 1–19, Out. 2017.

TAN, Z.; LAU, K. K. L.; NG, E. Urban tree design approaches for mitigating daytime urban heat island effects in a high-density urban environment. **Energy and Buildings**, v. 114, p. 265–274, 2016.

TAYLOR, A. L.; DESSAI, S.; BRUINE DE BRUIN, W. Public perception of climate risk and adaptation in the UK: A review of the literature. **Climate Risk Management**, v. 4, p. 1–16, 2014.

THOMPSON, J. E. Survey data reflecting popular opinions of the causes and mitigation of climate change. **Data in Brief**, v. 14, p. 412–439, 2017.

TOMPKINS, A. M. Organization of tropical convection in low vertical wind shears: the role of cold pools. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 58, n. 13, p. 1650-1672, 2001.

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 8, p. 127, 1979.

UNITED NATION CLIMATE CHANGE - UNCC. - **UNCC Framework**. Disponível em: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2020.

VALERIANO, D. M. *et al.* Monitoring tropical forest from space: the PRODES digital project. **Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, p. 1–3, 2012.

VAN DEN HEEVER, S. C.; COTTON, W. R. Urban aerosol impacts on downwind convective storms. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 46, n. 6, p. 828–850, 2007.

VAN KLOOSTER, S. L.; ROEBBER, P. J. Surface-based convective potential in the contiguous United States in a business-as-usual future climate. **Journal of Climate**, v. 22, n. 12, p. 3317–3330, 2009.

VARGO, J. *et al.* The social and spatial distribution of temperature-related health impacts from urban heat island reduction policies. **Environmental Science and Policy**, v. 66, p. 366–374, 2016.

VARQUEZ, A. C. G.; NAKAYOSHI, M.; KANDA, M. The effects of highly detailed urban Roughness parameters on a sea-breeze numerical simulation. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 154, n. 3, p. 449–469, 2014.

VICTORIA, R. L. *et al.* Surface air temperature variations in the Amazon region and its Borders during this century. **Journal of Climate**, v. 11, n. 5, p. 1105–1110, 2002.

WARD, K. *et al.* Heat waves and urban heat islands in Europe: a review of relevant drivers. **Science of the Total Environment**, v. 569–570, p. 527–539, 2016.

WEINSTEIN, B. **The Amazon rubber boom 1850-1920**. Stanford: Stanford California Press, 1983.

WEISMAN, M. L.; KLEMP, J. B. The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy. **Monthly Weather Review**, v. 110, p. 504–520, 1982.

WEISMAN, M. L.; ROTUNNO, R. “A theory for strong long-lived squall lines” revisited. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 64, n. 4, p. 361–382, 2004.

WENG, Q. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 64, n. 4, p. 335–344, 2009.

WHITE, A. B. *et al.* Winter storm conditions leading to excessive runoff above California's Oroville dam during January and February 2017. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 100, n. 1, p. 55–70, Jan. 2019.

WHYTE, A. V. T. **Guidelines for field studies in environmental perception**. [S.l.: UNESCO, 1977. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000024707>. Acesso em: 04/04/2020.

WISE, R. M. *et al.* Reconceptualising adaptation to climate change as part of pathways of change and response. **Global Environmental Change**, v. 28, p. 325–336, 2014.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION-WMO. **Global climate in 2015-2019: climate change accelerates**. Disponível em: <https://public.wmo.int/en/media/press-release/global-climate-2015-2019-climate-change-accelerates>. Acesso em: 20 out. 2019.

WOLLMANN, C. A.; SARTORI, M. da G. B. A percepção ambiental e climática da população de São Sebastião do Caí como forma de previsão de enchentes na Bacia hidrográfica do Rio Caí - Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 6, p. 107–134, 2010.

YANG, P.; REN, G.; YAN, P. Evidence for a strong association of short-duration intense rainfall with urbanization in the Beijing urban area. **Journal of Climate**, v. 30, n. 15, p. 5851–5870, 2017.

APÊNDICE A – ARTIGO PUBLICADO NO JORNAL URBAN CLIMATE.

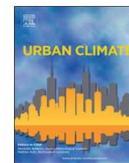
Urban Climate 31 (2020) 100579



Contents lists available at ScienceDirect

Urban Climate

journal homepage: www.elsevier.com/locate/uclim



Urban climate and environmental perception about climate change in Belém, Pará, Brazil



Juarez Ventura de Oliveira^{a,*}, Julia Clarinda Paiva Cohen^a, Marcia Pimentel^a,
Helena Lucia Zagury Tourinho^b, Marco Aurélio Lôbo^b, Giordani Sodr e^a,
Adhara Abdala^a

^a Universidade Federal do Pará (UFPA), Brazil

^b Universidade da Amazônia (UNAMA), Brazil

ARTICLE INFO

Keywords:

Urban climate
Climate perception
Climate change
Belém
Brazil
Amazonia

ABSTRACT

The primary goal of this work was to characterize Belém's climate change through the analysis of meteorological data from the local conventional surface station and to understand to what extent the climate change can be explained by the urbanization development. A secondary goal was to quantify whether and how part of Belém's population, from various neighborhoods and socio-economic status, has perceived such changes. The results show that Belém is becoming hotter, drier and less windy, following a regional climate trend. The city has also experienced an increase in its annual accumulated precipitation, which may have been caused by alterations on atmospheric dynamics related to the urbanization process, which favors the development of stronger precipitation systems. The environmental perception analysis showed that these changes in climate were noticed by part of the population and that it was attributed to city development, even though the participants do not know basic concepts such as "weather", "climate", "meteorology" and "climate change". The interviewees also have a clear picture that environmental conservation and conscientization are key to avoid/mitigate this climate change process.

1. Introduction

On a pioneer work about urban climate, Luke Howard in 1883 concluded that London's temperature was higher than its surrounding rural region and that it should never be considered representative of the local climate, due to a large amount of "artificial" contributions from the city structure, population and fossil fuel burning (Howard, 2008, reprint).

With the evolution of science and technology, the contribution from each of these "artificial" elements could be explored in-depth, for instance: the city structure (buildings, streets, materials) can store and emit more energy/heat; the gases generated by fossil fuel burning can absorb part of the radiation emitted by Earth's surface and send it back to the surface, enhancing the greenhouse effect; many human activities generate heat to the atmosphere, such as the use of air conditioning systems; the larger surface roughness reduces wind speed preventing the transportation of moisture and heat to and from the city; the lack of vegetation and increased surface imperviousness drastically weakens the hydrological cycle (by reducing evapotranspiration and increasing surface runoff) and also contributes to a higher air temperature. The sum of all these elements leads to the formation of "heat islands", a region (the city) of high air temperature surrounded by regions with considerably lower temperature (Chen et al., 2014; Giannaros et al., 2013;

* Corresponding author at: Federal University of Pará (UFPA), 1 Augusto Corr ea St., 66075 – 110, Brazil.
E-mail address: juarez.vo@hotmail.com (J.V. de Oliveira).

<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100579>

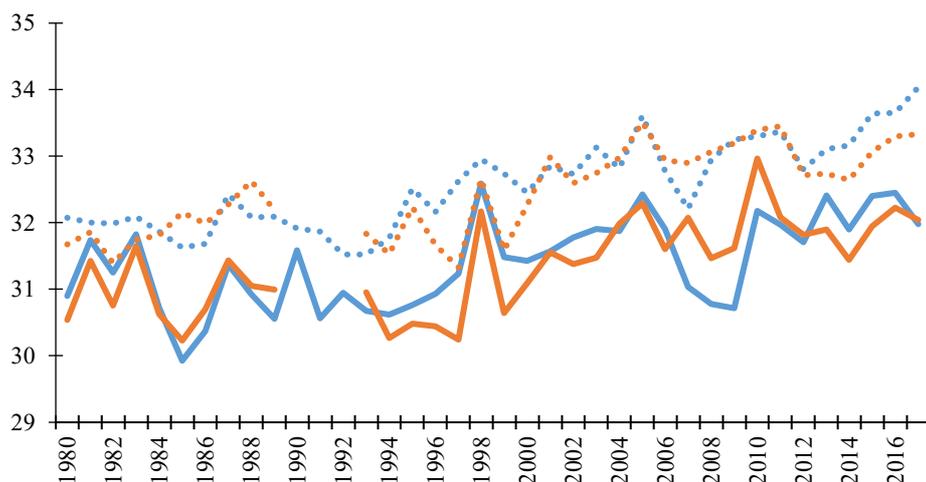
Received 21 June 2019; Received in revised form 16 December 2019; Accepted 30 December 2019
2212-0955/  2020 Elsevier B.V. All rights reserved.

APÊNDICE B – GRÁFICOS SEMESTRAIS DAS ESTAÇÕES

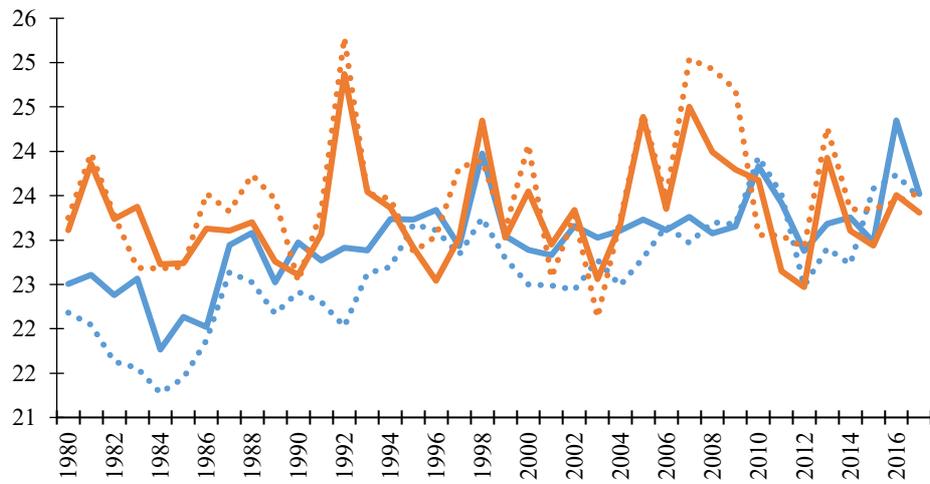
Os gráficos abaixo (Figura B.1) exibem a média anual de cada variável separada por semestre para Belém e a média das outras estações. A tendência semestral segue o observado na Figura 2.9 (média e acumulado anual), ou seja, foi registrado aumento da temperatura do ar (máxima, mínima e média), redução da umidade específica e da velocidade do vento. No caso da precipitação, a principal diferença (maior acumulo de precipitação em Belém e menor acumulo nas outras estações) ocorre no primeiro semestre.

Figura B.1- Média anual no primeiro (linha contínua) e segundo semestre (linha tracejada) de temperatura máxima (a), mínima (b) e média (c), umidade específica (d), velocidade do vento (e) e precipitação (f) em Belém (linhas azuis) e na média das outras estações (linhas laranjas).

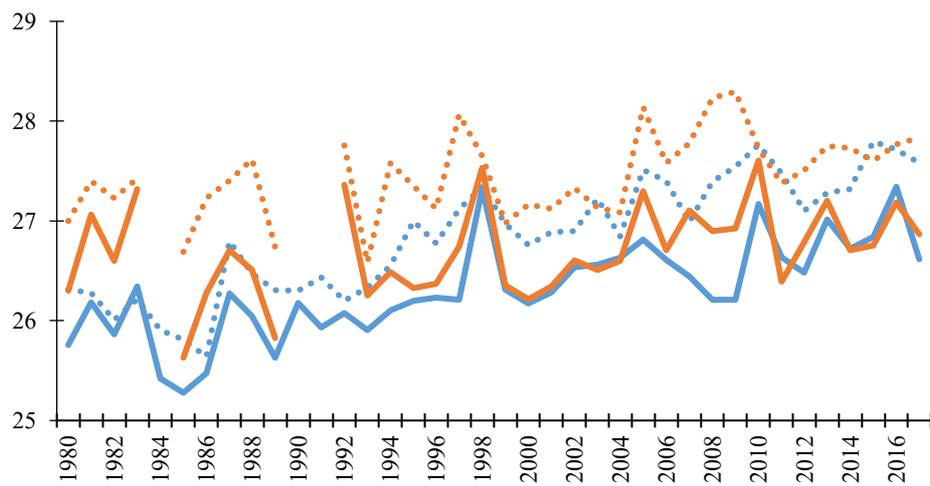
a) Temperatura Máxima



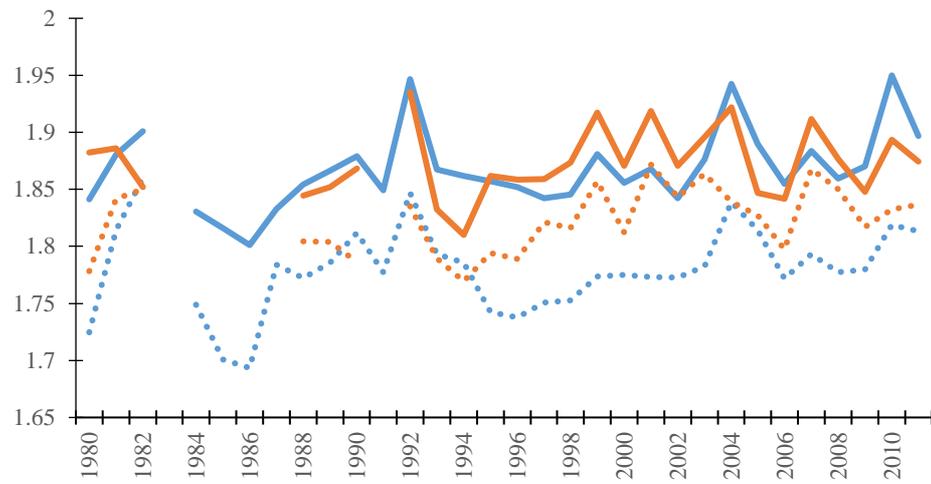
b) Temperatura Mínima



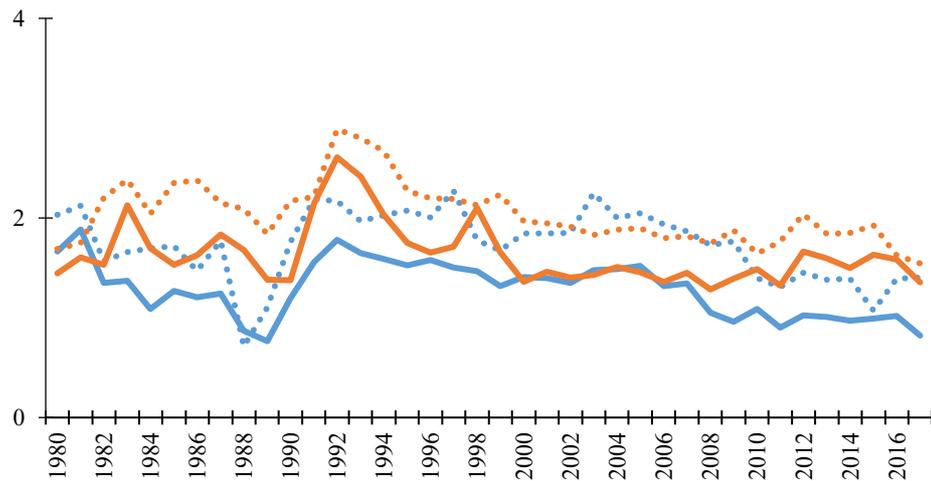
c) Temperatura Média



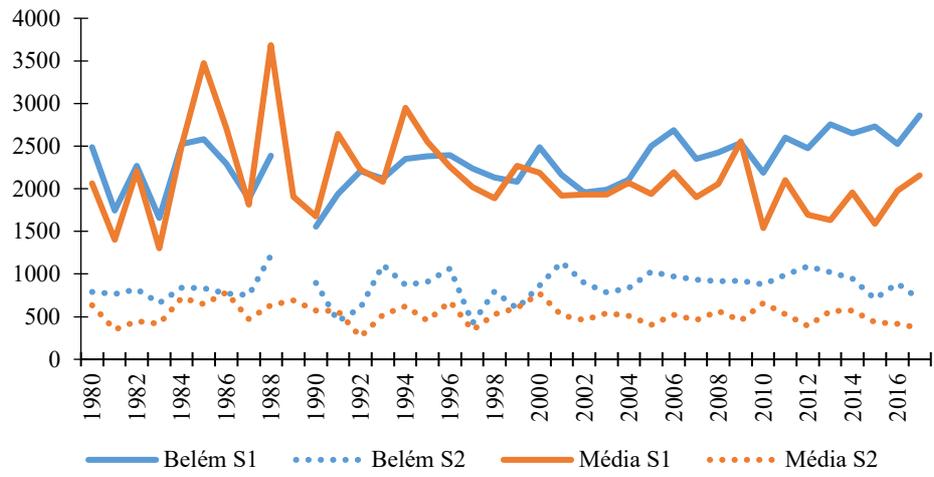
d) Umidade Específica



e) Velocidade do Vento



f) Precipitação

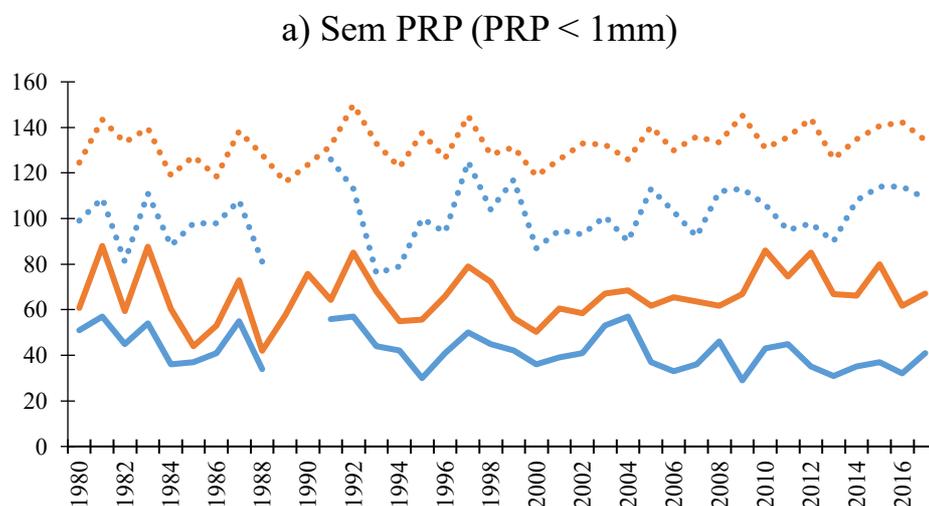


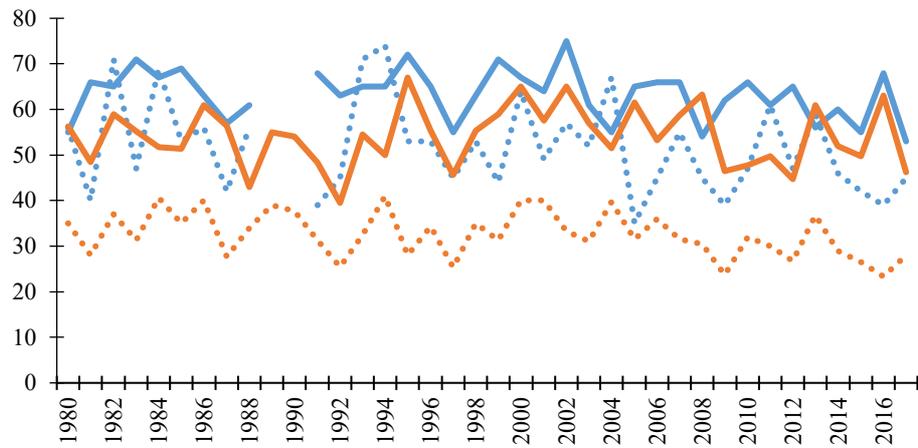
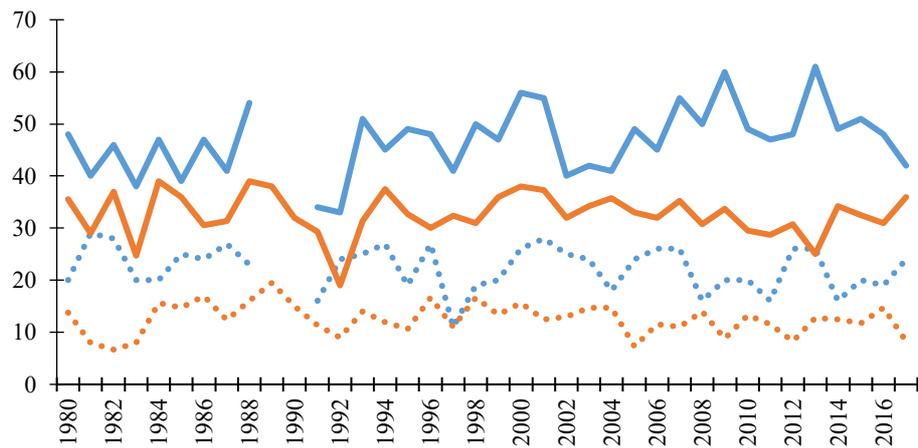
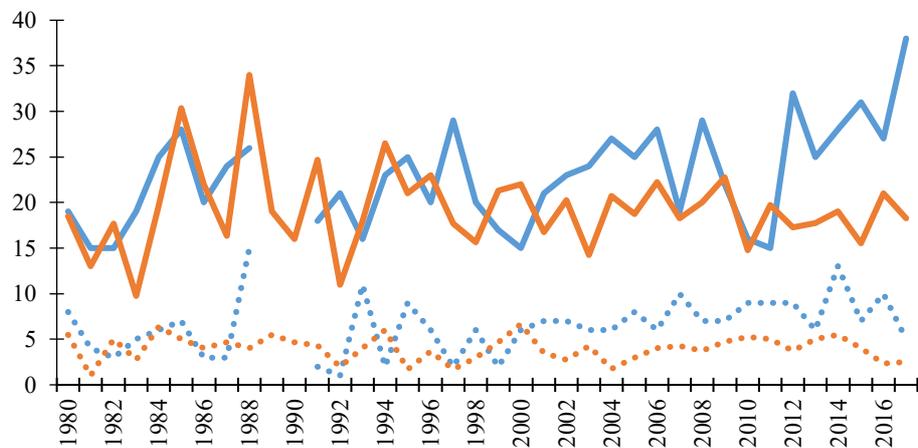
APÊNDICE C – GRÁFICOS SEMESTRAIS DA FREQUÊNCIA DE PRECIPITAÇÃO

A frequência de eventos semestrais em um determinado intervalo de precipitação (Figura C.1) é apresentada abaixo. Com a ausência dos principais sistemas precipitantes da região, o número de dias sem PRP no segundo semestre é maior do que no primeiro, tanto em Belém quanto na média das outras estações. Essa ordem se inverte nos intervalos seguintes e o primeiro semestre passa a ser aquele com maior frequência de dias com chuva, independente do intervalo.

A estação de Belém registrou aumento no número de dias com precipitação moderada e forte no primeiro semestre. Durante o segundo semestre, em Belém, apesar de haver aumento do número de dias sem chuva, há aumento nos casos de eventos fortes e extremos. Nas outras estações foi registrado redução do número de casos com intensidade de precipitação superior a fraca e aumento da frequência de dias sem precipitação em ambos os semestres.

Figura C.1- Frequência no primeiro (linha contínua) e segundo semestre (linha tracejada) de precipitação de acordo com diferentes intervalos: a) sem PRP; b) Fraca; c) Moderada; d) Forte; e) Extrema em Belém (linhas azuis) e na média das outras estações (linhas laranjas).



b) Fraca ($1\text{mm} \leq \text{PRP} < 10\text{mm}$)c) Moderada ($10\text{mm} \leq \text{PRP} < 25\text{mm}$)d) Forte ($25\text{mm} \leq \text{PRP} < 50\text{mm}$)

e) Extrema (50mm \leq PRP)