



Faculdade de Meteorologia



Universidade Federal do Pará



Instituto de Geociências

**MICHELL FONTENELLE GERMANO**

**ANÁLISE DAS CIRCULAÇÕES LOCAIS NO NORDESTE PARAENSE**

Nº:377

**Belém – PA  
Julho - 2016**

**MICHELL FONTENELLE GERMANO**

**ANÁLISE DAS CIRCULAÇÃO LOCAIS NO NORDESTE PARAENSE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Meteorologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Meteorologia.  
Orientadora: Dra. Maria Isabel Vitorino.

**Belém – PA  
Julho - 2016**

Dados Internacionais de Catalogação de Publicação (CIP)  
Biblioteca do Instituto de Geociências/SIBI/UFPA

---

Germano, Michell Fontenelle, 1995 -

Análise das circulações locais no Nordeste paraense/ Michell  
Fontenelle Germano. – 2016.

35 f : il.; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Maria Isabel Vitorino

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade  
Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Meteorologia,  
Belém, 2016.

1. Circulação atmosférica. 2. Precipitação (Meteorologia). 3.  
Amazônia I. Título.

---

CDD 22 ed. 551.6913

**MICHELL FONTENELLE GERMANO**

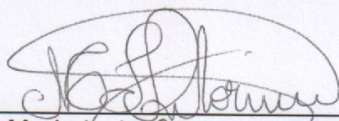
**ANÁLISE DAS CIRCULAÇÕES LOCAIS NO NORDESTE PARAENSE**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Faculdade de Meteorologia  
do Instituto de Geociências da Universidade  
Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às  
exigências para obtenção do grau de  
Bacharel em Meteorologia.

Data de aprovação: 05/07/2016

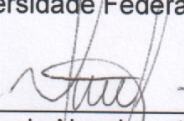
Conceito: Excelente

Banca examinadora:



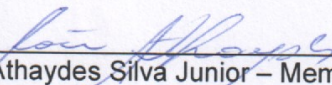
---

Prof. Maria Isabel Vitorino - Orientadora  
Doutora em Meteorologia  
Universidade Federal do Pará



---

Maurício do Nascimento Moura - Membro  
Mestre em Ciências Ambientais  
Universidade Federal do Pará



---

Prof. João de Athaydes Silva Junior - Membro  
Doutor em Desenvolvimento Sócio Ambiental  
Universidade Federal do Pará

Aos meus pais, que sempre foram o meu porto seguro.

## **AGRADECIMENTOS**

Terminar uma graduação em uma instituição de ensino superior de qualidade no Brasil, ainda é um mérito de poucos. Durante a minha jornada de quase 5 anos de graduação na Universidade Federal do Pará, muitos foram os obstáculos que me fizeram quase parar no meio. No entanto, muitas foram as pessoas que me deram apoio. Dentre elas, quero destacar com ênfase os meus pais (Ivanildo e Katia) por todo o apoio e confiança em meus estudos, sem vocês eu não seria metade do que eu sou e este trabalho nunca teria saído da minha mente!

Às minhas tias (Ana e Severa) gostaria de dizer que o apoio de vocês foi essencial para minha vida, sempre me lembrarei de todos os conselhos que vocês me deram. À minha irmã, por se minha confidente e amiga de sangue.

À minha família por acreditarem em mim. Aos meus amigos de graduação, os quais levarei para a minha vida e nunca esquecerei de quantas vezes que nos ajudamos durante os altos e baixos da graduação. Minha amiga e irmã Alana, que em muitas vezes me influenciou positivamente ao decorrer desta graduação. Ao roommate/amigo/primo Andrews que sempre teve paciência comigo de me levar na parada.

Aos inúmeros amigos que fiz durante o meu intercâmbio. Vocês não têm ideia de quanta nostalgia a palavra CSF traz em minha mente! E também a todos os professores da Faculdade de Meteorologia que me ajudaram academicamente a ser quem eu sou, em especial para as professoras Maria Isabel Vitorino e Júlia Cohen, que me ajudaram incansavelmente do início ao final desse trabalho.

How could I forget about Alex? Thanks for being such an awesome person. You have influenced me positively; I am thankful for your patience and advices. No matter what happens, you will always have a piece of my heart. You were essential during this tough path that we call "college".

À todos aqueles que de certa forma me encorajaram ou acreditaram em mim. À CAPES/CNPQ pelo financiamento do meu intercâmbio de 1 ano e meio nos EUA. À UFPA pelo financiamento da minha bolsa de Iniciação Científica.



## RESUMO

As circulações de brisas são analisadas regionalmente no nordeste paraense. Para isto, utilizou-se dados de precipitação, temperatura do ar, vento (direção e velocidade) para as localidades de Cuiarana, Salinópolis, Bragança, Belém e Soure disponibilizados pelo INMET e LBA. Além destes, utilizou-se também dados do *CPC MORPHing technique* com resolução temporal de 30 minutos e espacial de 8 km e imagens de satélites provenientes do METEOSAT – 9. Aplicou-se o cálculo da frequência horária das variáveis meteorológicas direção e intensidade do vento, temperatura do ar e precipitação, as quais foram analisadas climatologicamente e sazonalmente. Aplicou-se o método da transformada em ondeletas para a análise espectral das componentes zonais e meridionais. Os resultados mostram que a circulação de brisa marítima está caracterizada no quadrante de Nordeste/Leste e mais intensa em regiões costeiras, durante o horário das 09 às 21. A circulação de brisa terrestre foi observada somente em Cuiarana, Salinópolis e Bragança no quadrante de Sudeste/Sul, enquanto que em Soure, observou-se brisa terrestre no quadrante de Noroeste/Norte, devido a sua posição geográfica. Em geral a brisa terrestre demonstrou-se mais pronunciada entre as 21 às 9 (Hora Local). Em Belém, observou-se a presença da brisa fluvial, no quadrante de Noroeste/Norte, com horário predominante de ocorrência das 12 às 00 (Hora Local) e atuação regular ao longo do ano. Detectou-se variações sazonais durante o período chuvoso e menos chuvoso na região. A precipitação horária demonstrou-se altamente relacionada com as circulações de brisa marítima. Detectou-se também oscilações determinantes para a formação da brisa marítima.

Palavras-chave: Circulação atmosférica. Precipitação (Meteorologia). Brisas. Amazônia.

## **ABSTRACT**

The breezes circulations are analyzed regionally in the northeast region of the state of Pará. We used data for precipitation, air temperature, wind (direction and speed) for the locations of Cuiarana, Salinópolis, Bragança, Belém, and Soure provided by the INMET (National Institute of Meteorology) and LBA (Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia). Furthermore, we retrieved data from the CPC MORPH Technique with temporal resolution of 30 minutes and 8 km spatial and satellite images from the Meteosat-9. We calculated the hourly frequency of the meteorological variables direction and intensity of the wind, air temperature, and precipitation, which were analyzed climatologically and seasonally. We also applied the method of the wavelet transform in the spectral analysis of the zonal and meridional components. The results show that the sea breeze circulation is characterized in the northeastern/eastern quadrant and more intense in coastal regions during the hours from 09 to 21 LT. The land breeze circulation was observed only in Cuiarana, Salinópolis and Bragança in the southeastern/southern quadrant, while in Soure, there was land breeze in the northwestern/northern quadrant, due to its geographical position. In general, the land breeze showed to be more pronounced from 21 to 9 LT. In Belém, there was the presence of the river breeze in the northwestern/northern quadrant, with predominant time of occurrence from 12 to 00 LT and regular activities throughout the year. We detected seasonal variations during the rainy and dry season in the region. The hourly rainfall proved to be highly related to the sea breeze circulations. We also detected that some oscillations are decisive to the formation of the sea breeze.

Keywords: Atmospheric Circulation. Precipitation (Meteorology). Breeze. Amazon.

## LISTA DE FIGURAS/ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Modelo ideal para a circulação de brisa marítima.....	14
Figura 2 - Porcentagem média de precipitação total diária para as 23-02 HL, 05-08 HL, 11-14 HL e 17-20 HL.....	15
Figura 3 - Área de estudo com localização das estações meteorológicas.....	17
Figura 4 - Régua temporal da série de dados para cada localidade.....	18
Figura 4 - Frequência horária da direção do vento horizontal (a), velocidade do vento (b), precipitação (c), temperatura do ar (d) para Belém, Bragança, Cuiarana, Salinópolis e Soure.....	23
Figura 5 - Frequência sazonal horária da direção do vento horizontal para Belém (a), Bragança (b), Cuiarana (c), Salinópolis (d) e Soure (e) .....	25
Figura 6 - Frequência horária da direção do vento horizontal (a) e velocidade do vento (b) para junho de 2010 em Salinópolis-PA.....	26
Figura 7 - Ciclo diurno da direção do vento (a) e velocidade do vento (b) em Salinópolis-PA para o dia 11/06/2010.....	27
Figura 8 - Distribuição de precipitação horária pela técnica CMORPH apresentados a partir do (a) diagrama de Hovmoller, fixado na latitude de 0° a 1.5 S° e no espaço (b) para o dia 11/06/2010.....	28
Figura 9 - Linha de nebulosidade associada à brisa terrestre. Imagens no canal visível, do METEOSAT - 9, 11/06/2010, às 09:45 UTC (à esquerda) e 11:00 UTC (à direita) .....	29
Figura 10 - Imagem de satélite do METEOSAT - 9 no canal visível para o dia 11/06/2010, às 18:15 UTC (à esquerda) e 20:00 UTC (à direita) .....	30
Figura 11 - Escalograma de fase da ondeleta de Morlet e sinal das componentes do vento, (a) U (m/s), (b) V (m/s), (c) direção e velocidade do vento resultante no dia 11/06/2010 para a escala horária. Em sombreado, as fases positivas de U e V (oeste/sul) (vermelho), e negativas (leste/norte) (azul), respectivamente. Em linha preta pontilhada o sinal observado de U e V.....	31

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BF	Brisa Fluvial
BM	Brisa Marítima
BT	Brisa Terrestre
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LBA	Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia
LI	Linha de Instabilidade
TO	Transformada de Ondeleta
TSM	Temperatura da Superfície do Mar

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
1.1 Objetivo geral .....	13
1.2 Objetivos específicos.....	13
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	14
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	17
3.1 Área de estudo .....	17
3.2 Dados .....	18
3.3 Transformada de Ondeleta .....	19
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	20
4.1 Padrões médios da circulação local.....	20
4.2 Análise sazonal da circulação local.....	24
4.3 Estudo de Caso: Brisa marítma e terrestre .....	26
4.3.1 Multiescala da circulação local .....	30
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	31
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	33

## 1 INTRODUÇÃO

A região norte da América do Sul apresenta uma variedade de sistemas meteorológicos que atuam na mesoescala, como os Sistemas Convectivos de Mesoescala, tipo circular e linhas de Instabilidades podendo estar associados a circulações de brisas (COHEN et al., 1995; SODRÉ, 2013; KOUSKY, 1980; RAMOS DA SILVA et al., 2011; VITORINO et al., 1997; MADDOX, 1980). A grande influência da Brisa marítima ocorre devido a diferenças de gradientes térmicos entre as superfícies terrestres e marítimas que levam a diferenças de pressão do ar em baixos níveis, sobre essas superfícies, os dois principais tipos de brisas são: de mar e de terra (TEIXEIRA, 2008; HAURWITZ, 1974).

As Linhas de instabilidades (LI) são sistemas que atuam no nordeste paraense, cuja origem está relacionada à circulação de brisas junto a costa (KOUSKY, 1980), sendo que este sistema convectivo é responsável por 45% da chuva que precipita no leste paraense durante o período chuvoso (COHEN et al., 1995). O ciclo diurno de precipitação é altamente influenciado por circulações locais, tendo seu máximo pronunciado quando ocorre essas circulações (KOUSKY, 1980; JANOWIAK et al., 2005). Além disso, variações sazonais na Temperatura da Superfície do Mar (TSM), podem influenciar na intensidade das brisas (ZHU; ATKINSON, 2004).

Recentemente, Sodré (2013) em um estudo observacional, averiguou a ocorrência dos sistemas convectivos de mesoescala do tipo circular no Estado do Pará, e constatou-se que a região Nordeste e Noroeste paraense concentram a maior ocorrência desse tipo de sistemas de mesoescala, tendo maior ocorrência no período chuvoso. O principal fator comum para aumento da intensidade desses sistemas foi a variação de diferentes superfícies, modulando a ocorrência desses sistemas.

Segundo Kousky (1980), a variação diurna da precipitação próxima as áreas costeiras experimentam um máximo de precipitação no período noturno até o início da manhã devido à convergência entre o fluxo médio de ar próximo à superfície e procedente do oceano, e o fluxo superficial do continente para o mar, devido à brisa terrestre.

Teixeira (2008) em seu estudo observacional verificou a ocorrência das brisas terrestre em Fortaleza – CE, e detectou que essas circulações contribuem para um aumento da frequência de chuvas em Fortaleza durante a madrugada e início da manhã. As chuvas provenientes dessa circulação se demonstraram mais rápidas e menos intensas, porém quando associadas a sistemas de grande escala tenderam a ser mais intensas. A brisa marítima por sua vez, favoreceu a precipitação continente adentro, com maior frequência no período da tarde.

As brisas produzem diversas variações diurnas e sazonais na precipitação, tornando-se um importante fator para o aprimoramento da modelagem numérica e previsão de curto prazo. Ademais, o aprimoramento observacional da dinâmica das brisas na Amazônia torna-se de suma importância para uma melhor caracterização diurna da precipitação.

### **1.1 Objetivo geral**

Investigar a circulação atmosférica na mesoescala, associada à circulação de Brisas (marítima/terrestre) e suas interações com outras escalas no Nordeste do Estado do Pará.

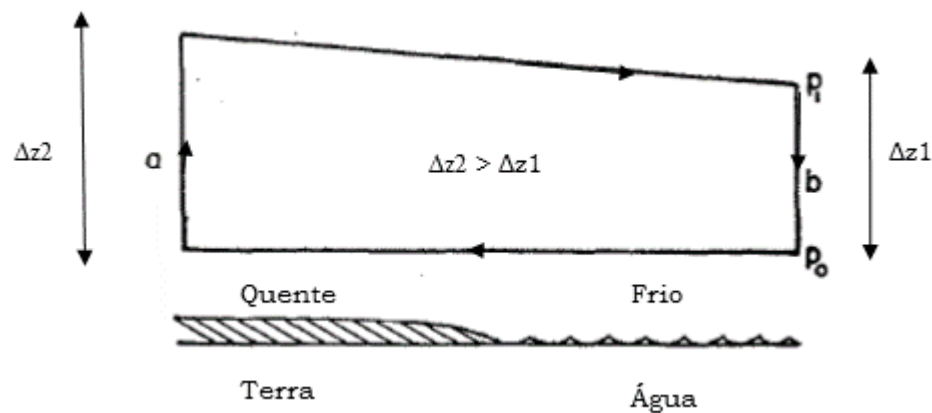
### **1.2 Objetivos específicos**

- Obter os padrões médios da circulação local na superfície;
- Analisar as variações sazonais médias da circulação local;
- Detectar as diferentes escalas temporais associadas às circulações de brisas marítima e terrestre.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A circulação de brisas é um fenômeno bem conhecido na literatura. A brisa marítima (BM) se inicia com a diferença de temperatura do ar sobre o continente ( $T_a$ ) e no oceano ( $T_b$ ). Esta diferença ( $T_a - T_b$ ) se torna positiva após o nascer do sol e alcança um máximo em torno de 2 horas após o meio dia, e novamente diminui durante a tarde, até chegar a valores negativos durante a madrugada (HAURWITZ, 1947). Esta circulação pode ser facilmente entendida analisando a figura 1.

Figura 1 - Modelo ideal para a circulação de brisa marítima.



Fonte: Adaptado de Haurwitz (1947).

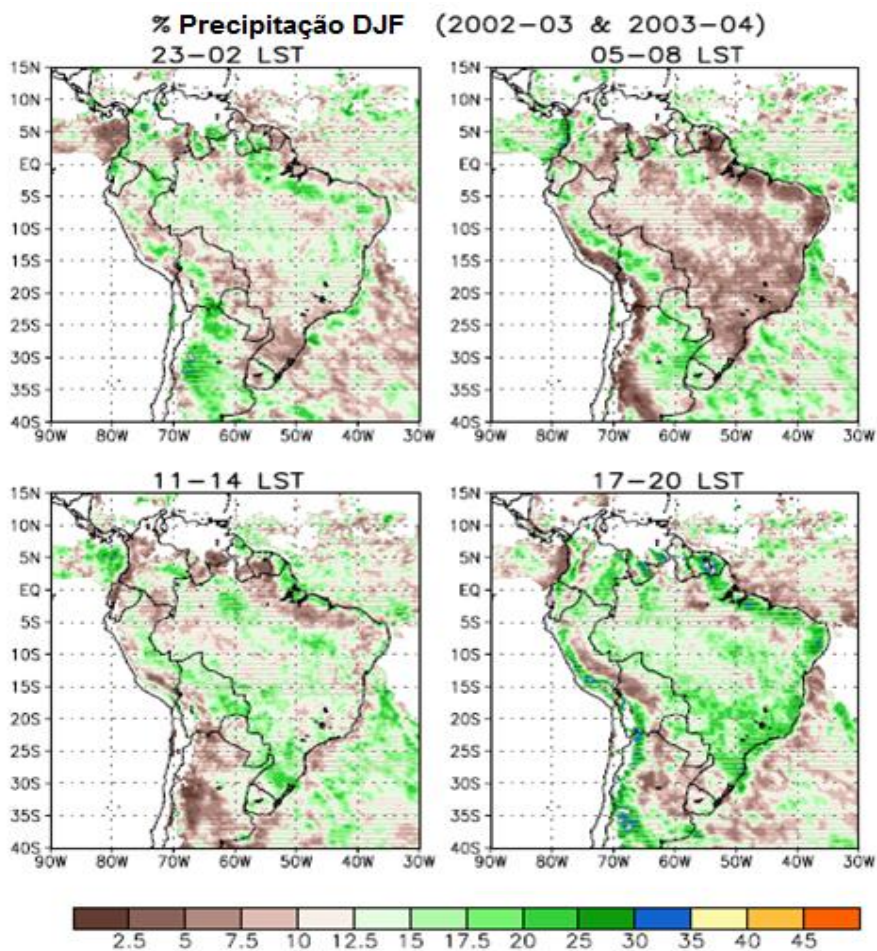
Na contramão da brisa marítima, observamos a brisa terrestre (BT). Esta circulação por sua vez não é tão estudada quanto a brisa marítima, devido a sua pouca influência sobre chuvas continentais, já que se espera que a BT favoreça a precipitação sobre os oceanos. Teixeira (2008) em seu estudo observacional em Fortaleza constatou que a circulação de brisa terrestre em geral está associada com o aumento da frequência de chuvas durante a madrugada e início da manhã, porém as chuvas relacionadas a este sistema tendem a ser mais rápidas e de pouca intensidade.

Kousky (1980) mostra a importância da circulação de brisa marítima na região norte e nordeste do país. Em seus resultados, Kousky (1980) constata que a influência da frente brisa fica expressa devido ao horário de ocorrência da precipitação no continente entre das 09 – 15 Hora Local (HL) durante o período de desenvolvimento da

brisa marítima. No entanto, durante o período da noite, este fluxo se opõe à circulação de brisa terrestre produzindo uma zona de convergência ao longo da costa. Kousky (1980) também identifica que a precipitação em Soure ocorre em um horário mais cedo do que em Belém devido a sua proximidade ao oceano, experimentando um máximo de precipitação durante o final da tarde, período em que a frente de brisa está se formando.

Em estudos mais recentes, Janowiak et. al (2005) mostrou em estimativas de precipitação através da técnica CMORPH que o ciclo diurno de precipitação é altamente modulado pela circulação de brisa marítima. Em seus resultados Janowiak et. al (2005) também comprovaram que a BM produz um máximo noturno em áreas até 500 km a dentro do continente como demonstrado na figura 2.

Figura 2 - Porcentagem média de precipitação total diária para as 23-02 HL, 05-08 HL, 11-14 HL e 17-20 HL.



Fonte: Adaptado de Janowiak et. al (2005)

A linhas de instabilidade amazônicas também dependem da circulação de brisa marítima. Cohen et al. (1995) em seu estudo observacional cita que a formação das linhas de instabilidade amazônicas depende diretamente da brisa marítima. Este mecanismo atua como gatilho para a formação de nuvens convectivas devido a advecção de umidade produzida pelas brisas.

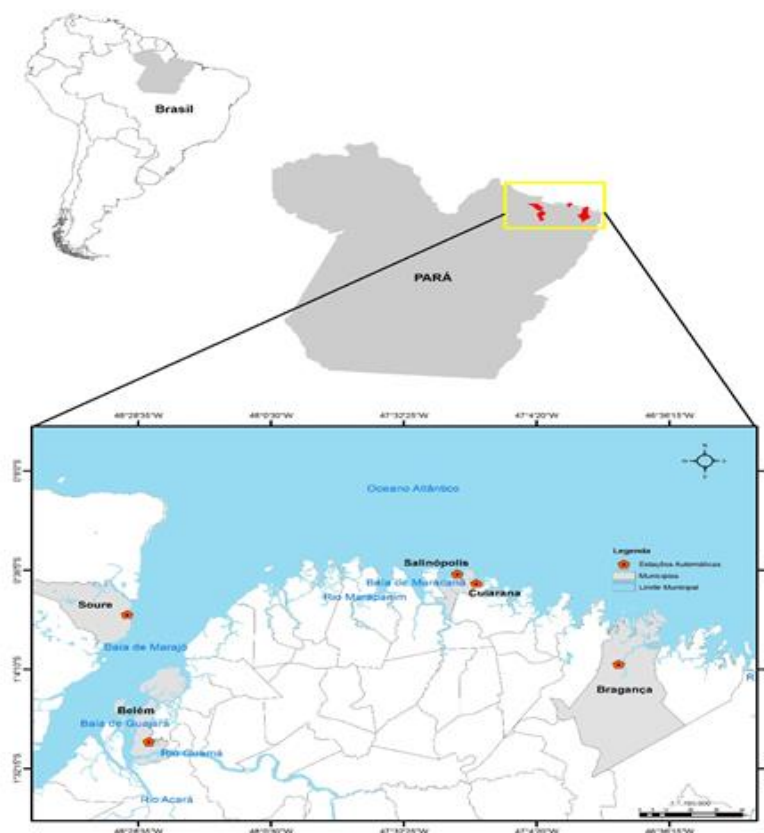
Apesar das brisas serem bastante conhecidas na literatura, poucos são os estudos para a Amazônia. Recentemente Fitzjarrald et al. (2008) em seu estudo em Santarém - PA, as margens do Rio Tapajós, detectou que a Brisa Fluvial (BF) tem forte influência no regime de precipitação sobre a cidade, principalmente a proveniente do Rio Amazonas, estendendo-se alguns quilômetros no interior do continente. Aumentando cerca de 30% a precipitação no período menos chuvoso, devido à subsidência induzida pela brisa sobre o rio. Em um estudo similar, Silva Dias et al. (2004) através de simulações em alta resolução pelo model RAMS, evidencia a formação de uma única célula sobre o Rio Tapajós.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Área de estudo

O estudo foi feito em cinco cidades localizadas no Nordeste do Estado do Pará, no Norte do Brasil e Nordeste da América do Sul. As cinco cidades em questão são: Belém, capital do estado do Pará, localizada em  $(-1.4103^{\circ}; -48.4383^{\circ})$ ; Soure, situada na ilha do Marajó  $(-0.8112^{\circ}; -48.5158^{\circ})$ ; Salinópolis  $(-0.61868^{\circ}; -47.3511^{\circ})$ ; Cuiarana  $(-0.6636; -47.2842)$  e Bragança  $(-1.0452^{\circ}; -46.7827^{\circ})$  conforme a figura 3. Vale salientar que cada localidade possui características de superfícies distintas, Belém é uma metrópole urbanizada, Soure está localizada na Baía do Marajó - um grande estuário do Rio Amazonas e Tocantins, Cuiarana e Salinópolis estão localizados no litoral do Estado, nas margens do Oceano Atlântico, Bragança está localizada um pouco mais continente adentro.

Figura 3 - Área de estudo com localização das estações meteorológicas.

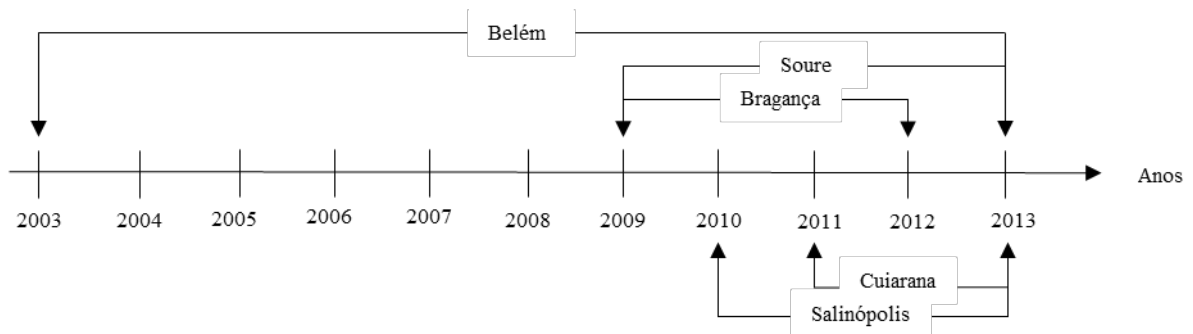


Fonte: Do autor.

### 3.2 Dados

Foram utilizados os dados de velocidade do vento (m/s), direção (°), precipitação (mm) a 10 m e temperatura do ar (°C) a 2 m, coletados em uma frequência de 10 em 10 minutos, da torre micrometeorológica localizada no sítio de Cuiarana, pertencente ao LBA (*Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia*) para o período de 2011 até 2013. A partir desses dados, aplicou-se médias horárias. Para Belém, Bragança, Soure e Salinópolis foram utilizados dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para as mesmas variáveis, coletadas de hora em hora, para diferentes períodos temporais (Figura 4), Belém (2003 a 2012), Bragança e Soure (2009 a 2012), Salinópolis (2010 a 2013) e Cuiarana (2011 a 2013). Devido aos curtos tamanhos das amostras de dados para cada localidade foi necessário utilizar-se períodos de séries temporais diferentes. Para a detecção das circulações de brisas foram considerados os seguintes intervalos para a definição de Brisa marítima (9 – 21 HL), Brisa terrestre (21 – 9 HL) e Brisa fluvial (12 – 00 HL). Esses critérios foram definidos a partir da observação das brisas.

Figura 4 - Régua temporal da série de dados para cada localidade.



Fonte: Do autor.

Para o cálculo da frequência horária das variáveis meteorológicas direção e intensidade do vento, temperatura do ar e precipitação utilizou-se o pacote *Metvurst - Meteorological visualisation utilities using R for science and teaching* de acordo com Appelhans (2013).

A série de dados foi analisada de duas formas diferentes, uma na escala climatológica e outra na sazonal. Na escala climatológica, aplicou-se o cálculo da

frequência horária. Após a análise climatológica, os dados foram separados em séries sazonais, a fim de analisar as variações sazonais das circulações locais.

Com o objetivo de se analisar mais profundamente as circulações de brisas, foi selecionado um estudo de caso quando se observou a ocorrência de brisa terrestre, marítima e Linha de Instabilidade (LI) (11/06/2010). A escolha do evento está relacionada com o período menos chuvoso da região, ou seja, período de menor atuação dos sistemas meteorológicos precipitantes de grande escala e maior observação dos efeitos locais (Molion, 1987).

Para este evento foram utilizados dados horários da estação automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada no município de Salinópolis – PA. Os dados meteorológicos de Salinópolis foram usados para o estudo de caso, a fim de se observar a circulação de mesoescala na região. Utilizou-se imagens de satélite disponibilizadas pelo METEOSAT - 9 para visualização das linhas de nebulosidade associadas as brisas (Terrestre/Marítima). Esta identificação por imagem de satélite demonstrou-se melhor no canal visível. Outros estudos como o de Texeira (2008) mostra uma boa demonstração do uso de imagens de satélite para a detecção da nebulosidade relacionada as brisas (ou frente de brisas) no canal visível e infravermelho.

Foram também utilizados dados do *Climate Prediction Center Morphing Technique* (CMORPH), dos dias 11 e 12 junho de 2010. Estes dados se encontram com uma resolução espacial de 8-km no equador e temporal de 30 minutos, permitindo avaliar o ciclo diurno da precipitação, associado as circulações de brisas (Marítima/Terrestre).

### 3.3 Transformada de Ondeleta

A Transformada de Ondeleta (TO) é um método matemático sofisticado para análise espectral de séries temporais. A TO foi utilizada para a análise espectral das componentes zonais ( $u$ ) e meridionais ( $v$ ) a fim de analisar as diferentes oscilações atmosféricas de múltiplas escalas que influenciam na formação da circulação de brisas. Para esta análise, foi selecionado um dia com a atuação da brisa terrestre, marítima e linha de instabilidade (11/06/2010). As análises foram calculadas através de algoritmos usando o software Octave de acordo com Vitorino (2002).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Padrões médios da circulação local

Na (Figura 5a) observa-se em geral que o ciclo diurno da direção do vento apresenta máximo principal de Nordeste (NE) para a maioria das localidades, com ocorrência da BM no mesmo sentido dos alísios de nordeste, com maior frequência durante o período das 9 às 21 HL. Esses ventos locais estão associados ao escoamento básico dos alísios que através do deslocamento dos anticiclones semipermanentes subtropicais podem alterar a intensidade da circulação local (CAVALCANTI, 1982; UVO, 1989; BAPTISTA, 2000). Neste sentido, observa-se que a BM para Salinópolis e Cuiarana é bem mais acentuada, se comparada com as outras localidades, devido a sua proximidade do oceano. Os máximos de velocidade do vento (Figura 5b) foram encontrados em Belém e Soure, com velocidades de  $6 \text{ m.s}^{-1}$  e  $5 \text{ m.s}^{-1}$ , respectivamente, nota-se ainda que a velocidade do vento em geral aumenta com a ocorrência da BM. Isso deve-se ao fato de que a BM está no mesmo sentido do escoamento básico, vetorialmente a BM é impulsionada pelo escoamento básico advindo dos ventos alísios, consequentemente aumentando a sua intensidade (FRIZZOLA e FISHER, 1963; ATKISON, 1981; SANTOS et al., 2013; COSTA e LYRA, 2012). Em Bragança observa-se um padrão anômalo de velocidade do vento, com máximo as 21 HL. Esta região carece de estudos mais aprofundados para a análise dessa anomalia.

A brisa terrestre pode ser identificada a partir de um máximo secundário na direção de Sudeste (SE) / Sul (S), em Bragança, Salinópolis, Cuiarana e Soure, no período da noite / início da manhã (21 – 09) HL. Em Soure observa-se também a BT, porém devido a posição geográfica da cidade, a BT ocorre em sentido diferente em relação às outras cidades, neste caso a BT ocorre na direção de Noroeste (NW) / Oeste (W), nos mesmos horários. Em geral pode-se observar que os menores valores da velocidade do vento (Figura 5b) ocorrem no horário que a BT está em atividade. Portanto, a circulação de BT

é de menor intensidade quando comparada a BM, pois esta se contrapõe ao sentido do escoamento básico (ATKINSON, 1981; TEIXEIRA, 2008).

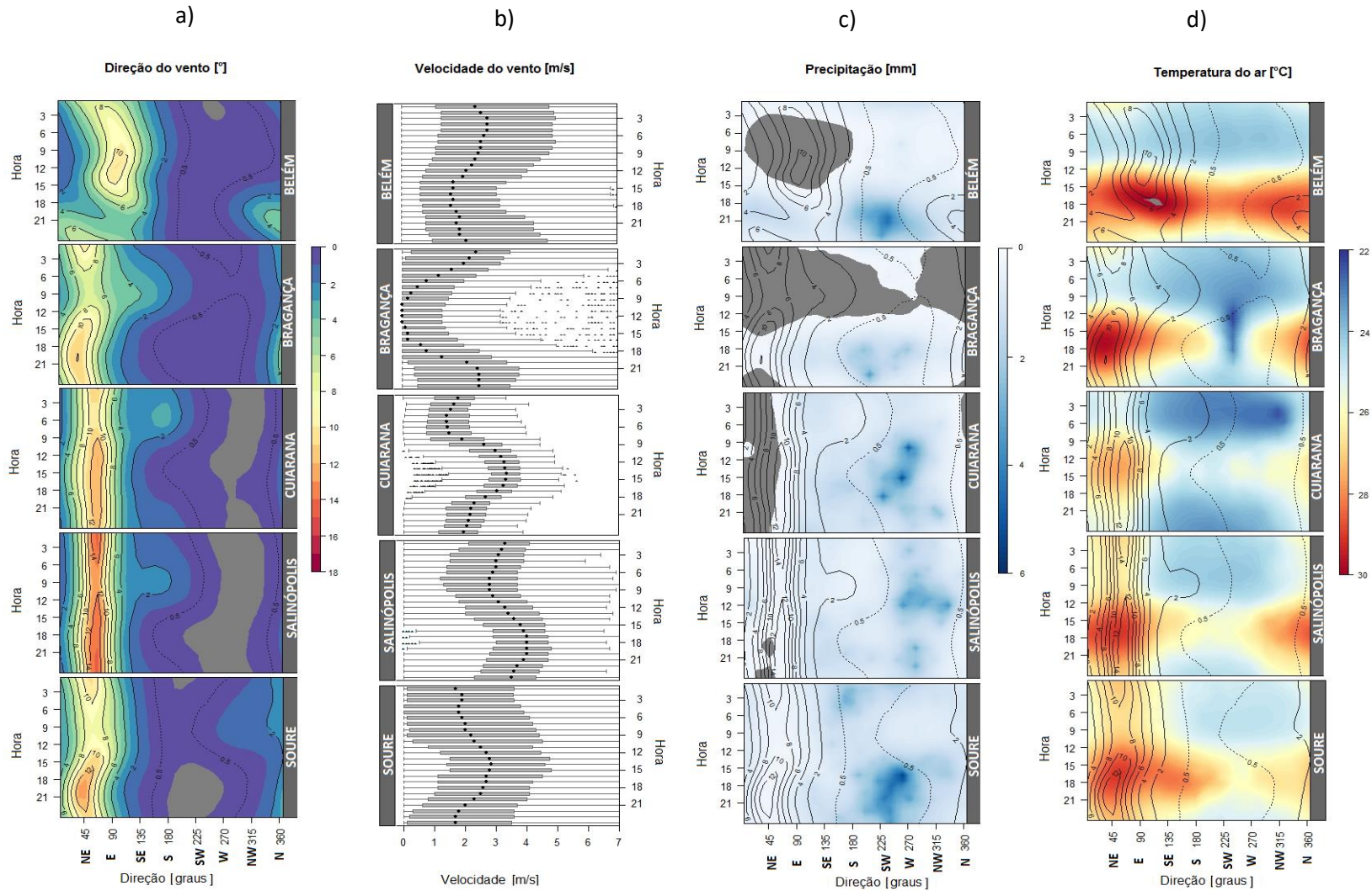
Em Belém não se observa o sinal da BT, porém constata-se a presença de um máximo secundário na direção de NW, juntamente com uma diminuição da intensidade do vento durante o horário deste máximo secundário, este pode estar associado a presença da Brisa Fluvial (BF). Essa circulação ocorre devido à proximidade que a cidade tem com Baía do Guajará, a influência desta torna-se muito maior que a do oceano. Outros estudos já demonstram a presença da BF em cidades amazônicas (FITZJARRALD, 2008; SILVA DIAS et al, 2004; COHEN et al., 2014; MATOS e COHEN, 2015); em geral este contraste de temperatura entre a floresta e os rios na Amazônia que foram observados em estudos anteriores, podem chegar a mais de 6°C de diferença (GRECO et al., 1992; OLIVEIRA e FITZJARRALD, 1993).

Em geral a precipitação (Figura 5c) ocorre durante o final da tarde e início da noite, este resultado concorda com os resultados encontrados por Kousky (1980) que indica que os maiores volumes de chuva estão no período da tarde, entre as 14 e 18 HL, com ocorrência de chuva também à noite. A circulação de brisa marítima provoca um máximo noturno na precipitação local, devido ao aquecimento diurno, a precipitação tem um máximo pronunciado ao longo da costa (JANOWIAK et al., 2005). Os efeitos da BM na precipitação ficam mais evidentes nas localidades que estão mais continente adentro, a exemplo de Belém, Bragança e Soure, estas têm maior frequência da precipitação durante o período da noite, enquanto que Salinópolis e Cuiarana observou-se maior frequência de chuva durante o período da tarde. Observa-se também a presença de máximos secundários de precipitação em Soure e Salinópolis durante a madrugada entre 0 e 3 HL, estes resultados convergem novamente com Kousky (1980), que associa esta chuva mais cedo em Soure e Salinópolis devido a passagem mais cedo da frente de brisa em cidades mais próximas à costa.

Analisando a temperatura do ar (Figura 5d) verifica-se que nos horários de ocorrência da BM a temperatura do ar mostrou-se fortemente influenciado pelo ciclo diurno da radiação solar, durante o horário da ocorrência da BM o continente está mais quente, devido a constante disponibilidade de radiação solar na região (SALATI e

MARQUES, 1984). No horário de ocorrência da BT observa-se que a temperatura do ar é menor, devido à alta pressão que se forma no continente, o ar se desloca mais frio em direção ao oceano (SIMPSON, 1994), observa-se esses efeitos apenas em Bragança, Soure, Cuiarana e Salinópolis. Em Belém, o mecanismo se inverte, constata-se que durante o horário da BF a temperatura do ar esteve mais quente, concordando com os resultados encontrados por Freitas e Silva Dias (2004) e Freitas (2003), para a ocorrência de brisa lacustre na região metropolitana de São Paulo. Vale salientar que os diferentes tipos de superfícies influenciam no comportamento natural da temperatura do ar, e isto fica evidente se comparado a cidade de Belém, com a vila de Cuiarana que é uma localidade com vegetação mais preservada, sendo assim, resfriada mais rapidamente do que em Belém.

Figura 5 - Frequência horária da direção do vento horizontal (a), velocidade do vento (b), precipitação (c), temperatura do ar (d) para Belém, Bragança, Cuiarana, Salinópolis e Soure.



Fonte: Do autor.

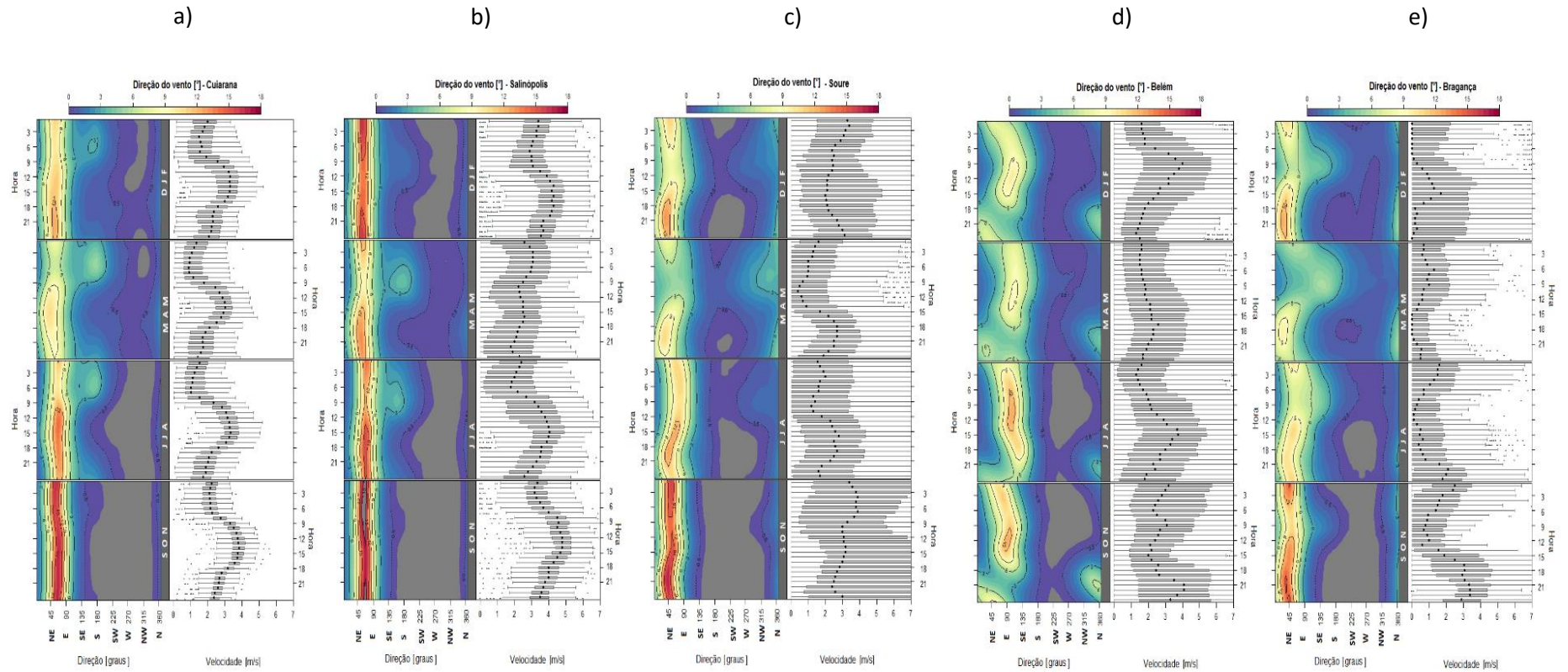
## 4.2 Análise sazonal da circulação de brisas

A Figura 6 mostra a sazonalidade da direção do vento para cada cidade, observa-se que a BM é mais pronunciada durante o período de setembro a novembro (SON), enquanto que a BT fica mais marcante durante o período de março a maio (MAM). Desta forma, a velocidade do vento é maior durante o período de SON, e menor durante o período de MAM. Essas diferenças sazonais tanto na intensidade do vento, quanto na direção em SON, estão diretamente ligadas com a intensificação da Alta Semipermanente Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) (BAPTISTA, 2000), facilitando a penetração da BM, que é perpendicular à costa. No entanto, em MAM a atmosfera na região está com atuação de sistemas de grande escala como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (UVO, 1989), esta por vez sua deixa a atmosfera menos livre, tornando o escoamento básico menos intenso, e facilitando a ocorrência da BT.

Observa-se que as cidades localizadas mais próximas a costa (Cuiarana e Salinópolis) tem uma predominância de ventos de E/NE durante quase todo o ano, devido as suas posições geográficas, a BT mostrou-se mais destacada no período de junho a agosto (JJA) e MAM. Já em Soure, verifica-se que a BM acentuada durante SON, enquanto que a BT fica mais evidente durante DJF e MAM.

Belém e Bragança devido as suas localizações serem mais continente adentro, percebe-se que a BM é bem menos intensa, em relação às cidades que estão mais próximas à costa, em Bragança é possível verificar a ocorrência da BT durante quase o ano todo, porém observa-se a BT mais acentuada durante MAM. Em Belém é possível verificar a ocorrência de BF durante todos os meses do ano assim como a BM é mais intensa durante JJA.

Figura 6 - Frequência sazonal horária da direção do vento horizontal para Cuiarana (a), Salinópolis (b), Soure (c), Belém (d) e Bragança (e).



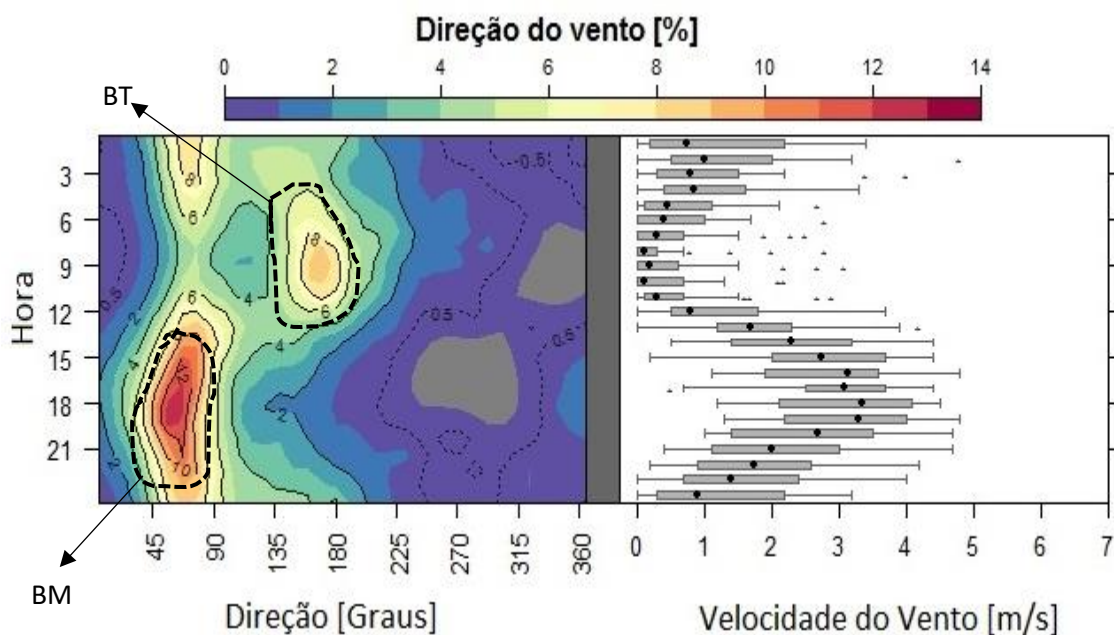
Fonte: Do autor.

### 4.3 Estudo de Caso

A Figura 7 apresenta a frequência horária da velocidade e direção do vento em junho de 2010 para Salinópolis. Em geral, o ciclo diurno da direção do vento neste mês apresentou máximo principal de NE, com ocorrência da BM no mesmo sentido dos alísios de Nordeste, com maior frequência durante o período das 12 às 21 Hora Local (HL). Esses ventos locais estão associados ao escoamento básico dos alísios de Nordeste e Sudeste, que através do deslocamento dos anticiclones tropicais podem alterar a intensidade da circulação local (CALVACANTI, 1982; UVO, 1989; BAPTISTA, 2000).

A brisa terrestre pode ser identificada a partir de um máximo secundário na direção de Sudeste (SE) / Sul (S), no período da noite / início da manhã (06 – 12) HL. Pode-se observar em geral, que os menores valores da velocidade do vento ocorrem no horário em que estas circulações atuam. A circulação de BT apresenta menor intensidade, se comparada a BM, pois esta se contrapõe ao sentido do escoamento básico (ATKINSON, 1981; TEIXEIRA, 2008).

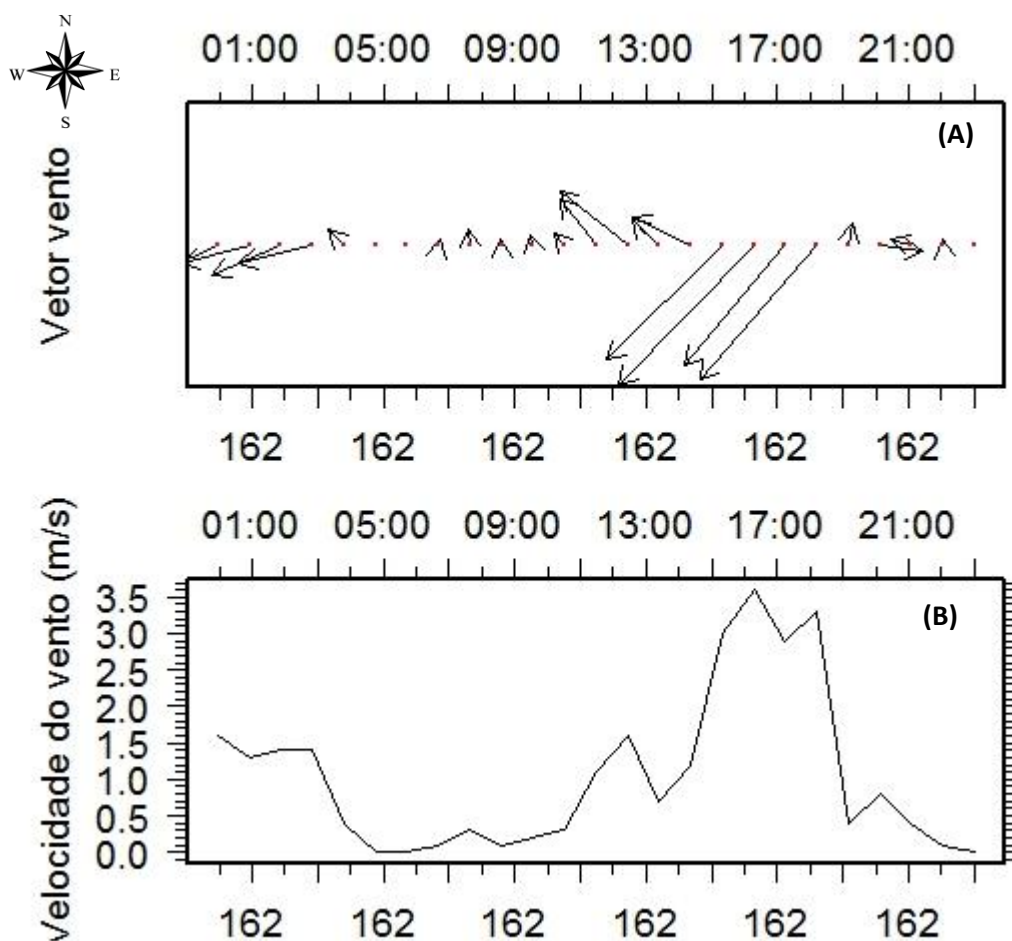
Figura 7 - Frequência horária da direção do vento horizontal (à esquerda) e velocidade do vento (à direita) para junho de 2010 em Salinópolis-PA.



Fonte: Do autor.

A Figura 8 apresenta a velocidade e direção do vento no dia 11 de junho de 2010, onde se observa que a direção do vento (a), durante a madrugada e início da manhã vento esteve de S/SE, indicando a presença da Brisa terrestre. No entanto, durante o período da tarde, verifica-se uma variação significativa na direção do vento, ficando predominantemente de Nordeste, indicando a presença da BM. Constata-se um máximo na velocidade do vento, durante o horário de ocorrência da BM e um o mínimo valor observado, durante a BT.

Figura 8 - Ciclo diurno da direção do vento (a) e velocidade do vento (b) em Salinópolis-PA para o dia 11/06/2010.

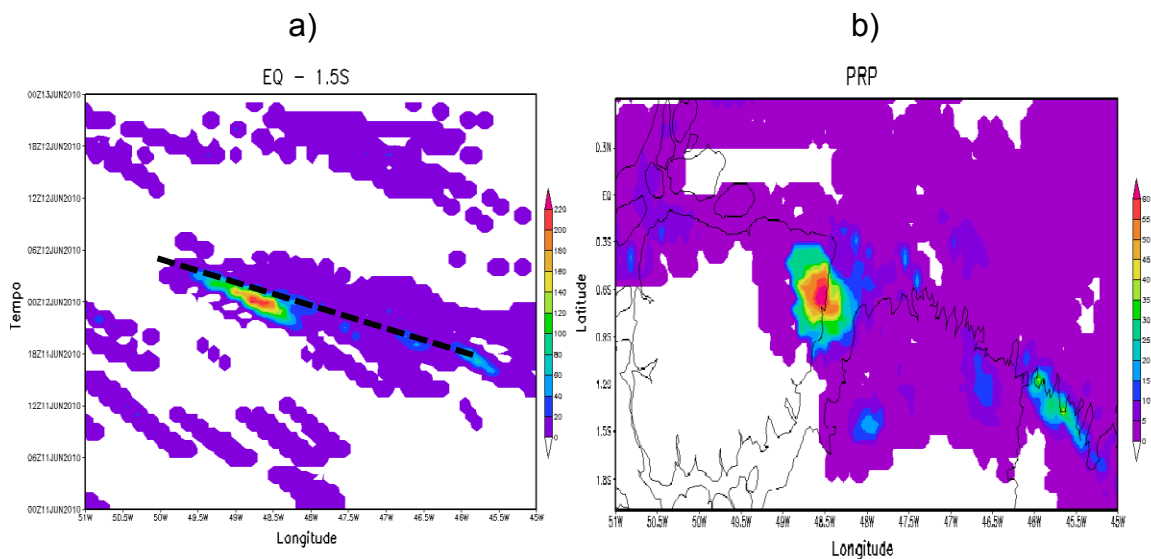


Fonte: Do autor.

Nota-se na Figura 9a, que durante a tarde do dia 11/06/2010 e madrugada do dia 12/06/2010 ocorreu um máximo de precipitação (linha tracejada) na longitude da costa (50° W a 45°W). Este evento de precipitação teve início às 18Z próximo à longitude de 45.5° W e alcança máximo as 03Z na longitude de 49°W. Esta circulação de brisa marítima provocou um máximo noturno na precipitação local, devido ao aquecimento diurno, isto concorda com resultados de Janowiak et al. (2005).

A Figura 9b mostra que o maior acumulado de precipitação se encontra no litoral do estado do Pará e Maranhão. A circulação de BM se destaca no ciclo diurno de precipitação, se comparada a BT, pois esta provoca chuvas menos intensas e mais localizadas no oceano. Segundo Kousky (1980) os efeitos da BM na precipitação ficam evidentes no litoral, provocando uma maior frequência de chuvas, durante o período da tarde e início da noite.

Figura 9 - Distribuição de precipitação horária pela técnica CMORPH apresentados a partir do diagrama de Hovmoller (a), fixado na latitude de 0° a 1.5 S° e no espaço (b) para o dia 11/06/2010.

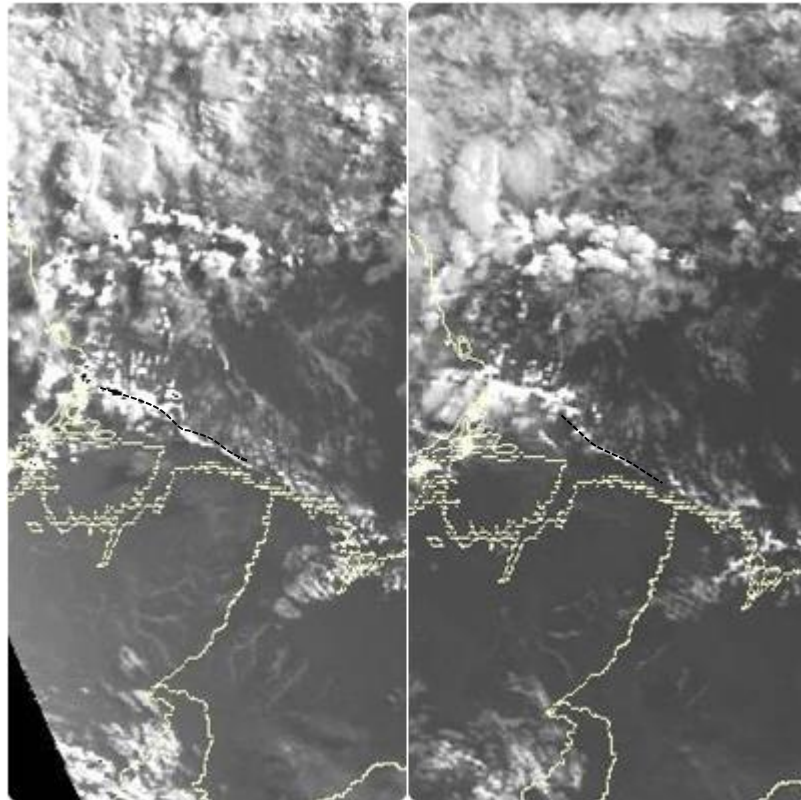


Fonte: Do autor.

Nas figuras 10 observa-se linhas de nebulosidade (Linhas tracejadas) sobre o oceano em decorrência da circulação de BT na madrugada do dia 11/06/2010. Esta linha se propaga do litoral no sentido do oceano. Segundo Teixeira (2008) é comum se observar no litoral arcos convectivos sobre o oceano, isto ocorre, pois, a circulação de

BT se acopla ao fluxo ou escoamento (úmido) médio próximo à costa, resultando em arcos de nuvens em deslocamento para o oceano, favorecendo a chuvas mais rápidas e pouco intensas no litoral, durante a madrugada e início da manhã.

Figura 10 - Linha de nebulosidade associada à brisa terrestre. Imagens no canal visível, do METEOSAT - 9, 11/06/2010, às 09:45 UTC (à esquerda) e 11:00 UTC (à direita).

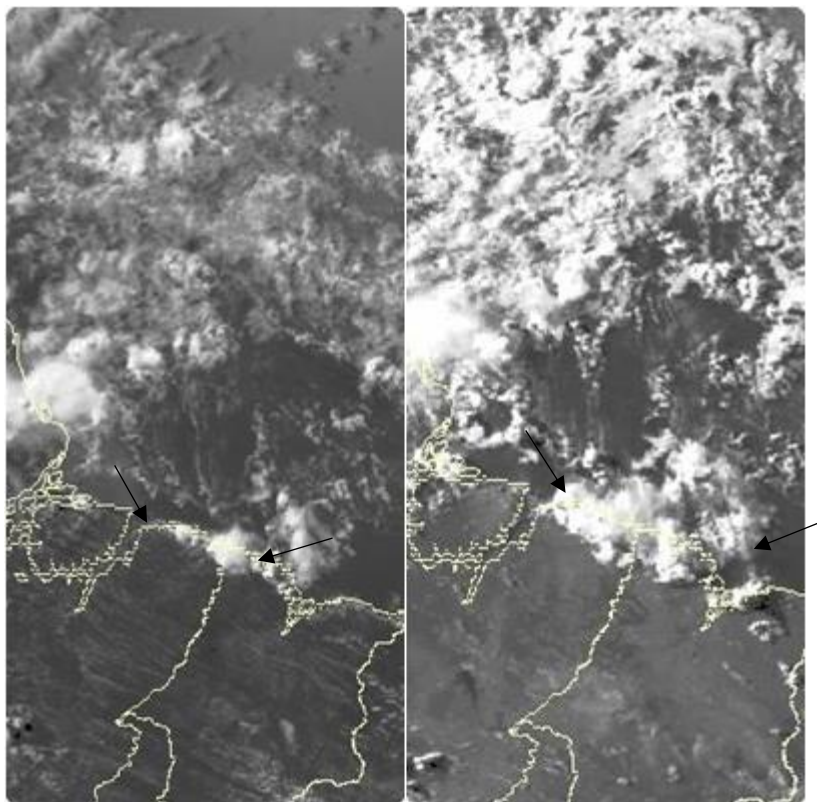


Fonte: METEOSAT - 9.

Além disso, no período da tarde observa-se a formação de uma Linha de Instabilidade (LI) no litoral (Figura 11) no dia 11/06/2010. Esta LI teve início às 17 UTC e término às 06 UTC do dia posterior. Vale ressaltar que, o horário de formação desta LI ocorre durante o horário da circulação de BM. A diferença térmica entre as superfícies do oceano e terrestre aumentam durante o dia, ocasionando a circulação de Brisa Marítima que alcança maior intensidade no período da tarde. De acordo com estudos anteriores (SIMPSON,1994; AHRENS, 2000; TEIXEIRA, 2008), isto pode favorecer o maior transporte de umidade proveniente do oceano para o litoral, podendo apresentar nuvens mais desenvolvidas, próximo à frente de brisa. Além disso, segundo Cohen (1995) a

formação e evolução da circulação de BM funciona como gatilho para a formação de linhas de instabilidade.

Figura 11 - Imagem de satélite do METEOSAT - 9 no canal visível para o dia 11/06/2010, às 18:15 UTC (à esquerda) e 20:00 UTC (à direita).



Fonte: METEOSAT - 9.

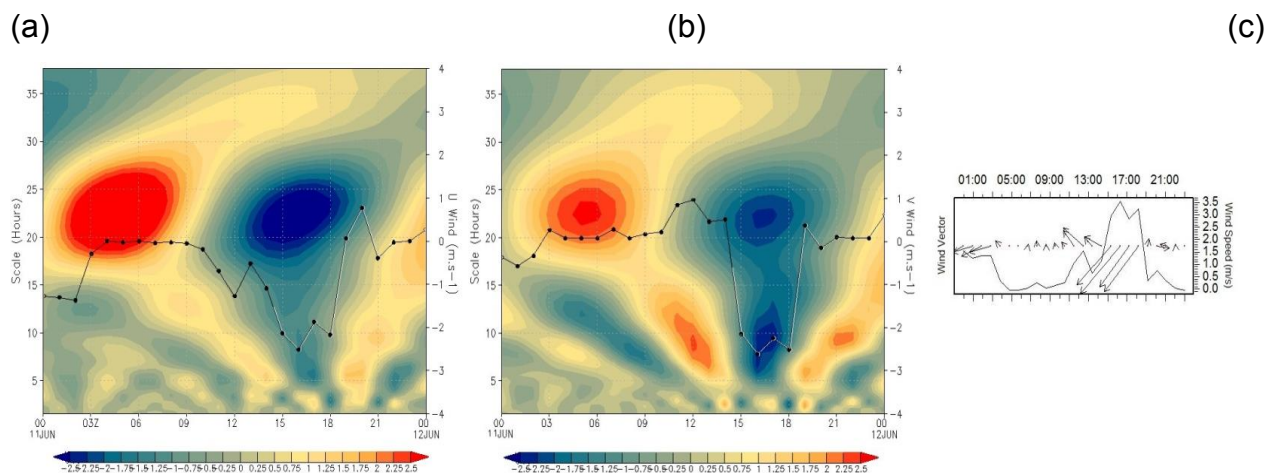
#### 4.3.1 Multiescala da circulação local

As Figuras 12 a,b mostram para este estudo de caso que o sinal da componente zonal ( $U$ ) está associado as oscilações atmosféricas de 24, 6 e 2 horas, e  $V$  com as escalas mais acentuadas em 24, 12, 8 e 2 horas. Neste sentido, as maiores amplitudes da energia de fase da ondefeita do vento estão relacionadas com a BM, através das fases negativas das componentes zonal ( $U$ ) e meridional ( $V$ ) do vento no horário das 15 e 18 HL. Vale ressaltar, que a componente meridional apresenta oscilações mais acentuadas do que a componente zonal para as escalas de frequência mais alta.

Evidencia-se que a existência das oscilações atmosféricas locais intermediárias as oscilações de 24 e 2 horas atuantes na componente meridional, parece ser as

oscilações atmosféricas que fazem a diferença na composição do mecanismo de formação das BM e BT.

Figura 12 - Escalograma de fase da ondeleta de Morlet e sinal das componentes do vento, (a) U (m/s), (b) V (m/s), (c) direção e velocidade do vento resultante em Salinópolis no dia 11/06/2010 para a escala horária. Em sombreado, as fases positivas de U e V (oeste/sul) (vermelho), e negativas (leste/norte) (azul), respectivamente. Em linha preta pontilhada o sinal observado de U e V.



Fonte: Do autor.

## 5 CONCLUSÃO

O objetivo principal deste trabalho foi analisar as circulações locais em Belém, Bragança, Soure, Cuiarana e Salinópolis e suas interações com outras escalas atmosféricas no Nordeste do Estado do Pará. Para isso utilizou-se dados horários de temperatura do ar, precipitação e vento (direção e velocidade) das estações automáticas localizadas nas cidades em questão.

Observamos que a BM apresentou frequência regular no quadrante de Nordeste/Leste. A BM mostrou-se mais intensa em regiões costeiras, durante o horário das 09 às 21 (Hora local), se deslocando no mesmo sentido do escoamento médio. Já a BT foi observada em Cuiarana, Salinópolis e Bragança no quadrante de Sudeste/Sul, enquanto que em Soure, a BT foi observada no quadrante de Noroeste/Norte devido a sua posição geográfica. Em geral as cidades onde ocorre a BT, observamos que o horário

de sua atuação ocorre das 21 às 9 HL. Vale salientar que a BT ocorre no sentido contrário do escoamento básico, portanto, vetorialmente esta circulação tem sua magnitude diminuída, podendo até não ser observada. A BM mostrou-se mais intensa durante o período de junho a agosto, enquanto a BT, apresentou-se mais pronunciada durante MAM e JJA. Os horários da precipitação mostraram-se mais relacionados com a BM do que a BT.

Por outro lado, em Belém observou-se a presença da BF, no quadrante de Noroeste/Norte, com horário predominante de ocorrência das 12 às 00 HL, sendo esta circulação regularmente observada ao longo do ano. A BF ocorre devido à grande lâmina de água disponível próxima a cidade (Baia do Marajó), proporcionando um gradiente de temperatura entre a superfície e o rio. Todavia, ainda é possível detectar o sinal da BM, porém com menor intensidade se comparado a regiões costeiras.

A análise do estudo de caso revelou oscilações nas componentes zonais e meridionais do vento de 24 e de 2 horas, que modulam a formação da brisa marítima, e a intensificação e combinação em fase dessas oscilações impulsionam a formação das brisas. Além disso, observou-se também a formação de linha de instabilidade, durante o horário de ocorrência de BM.

As circulações locais na região Amazônica contribuem para o regime de precipitação. Apesar de serem conhecidas, poucos são os trabalhos que analisam as circulações de brisas na Amazônia. A modelagem numérica, portanto, torna-se um desafio no estudo dos efeitos dessas circulações que ainda são pouco estudadas. Este trabalho contribui para a configuração das circulações locais, podendo posteriormente contribuir o aprimoramento da previsão de tempo e clima na região.

## REFERÊNCIAS

- AHRENS, C. D. **Essentials of meteorology**: an invitation to the atmosphere. 3. ed. Belmont: Thomson Brooks/Cole, 2000. 463 p.
- APPELHANS, T.; STURMAN, A.; ZAWAR-REZA, P. Synoptic and climatological controls of particulate matter pollution in a Southern Hemisphere coastal city. **International Journal of Climatology**, v. 33, n. 2, p. 463-479, 2013.
- ATKINSON, B.W. **Meso-scale atmospheric circulations**, London: London Academic Press, 1981. 495 p., Chap. 5 & 6.
- BAPTISTA, M. C.: **Uma análise do campo de vento de superfície sobre o oceano atlântico tropical e sul usando dados do escaterômetro do ers**. 2000. 131 f. Dissertação (Mestrado) - INPE, São José dos Campos, SP, 2000.
- CAVALCANTI, I.F.A. **Um estudo sobre interações entre sistemas de circulação de escala sinótica e circulações locais**. 1982. 113 f. Dissertação (Mestrado) – INPE, São José dos Campos, 1982.
- 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**, Boston, v.123, n.11, p. 3163-3174, Nov. 1995.
- COHEN, J.C.P.; FITZJARRALD, D.; DOLIVEIRA, F. A. F.; SARAIVA, I.; BARBOSA, I. R. S. ; GANDU, A. W.; KUHN, P.A.F. Radar-observed spatial and temporal rainfall variability near the Tapajós-Amazon confluence. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, p. 23-30, 2014.
- COSTA, G. B.; LYRA, R. F. F. Análise dos padrões de vento no Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**. São Paulo, v.27, n.1, p. 31 – 38, Mar. 2012
- FITZJARRALD, D.R.; SAKAI, R.K.; MORAES, O.L.; COSME DE OLIVEIRA, R.; ACEVEDO, O.C.; CZIKOWSKY, M.J.; BELDINI, T. Spatial and temporal rainfall variability near the Amazon-Tapajós confluence. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 113(G1), p. 2156 – 2202, 2008.
- FREITAS, E. D.: **Circulações locais em São Paulo e sua influência sobre a dispersão de poluentes**. 2003. 156 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- FREITAS, E. D.; SILVA DIAS, P. L. Os efeitos da brisa lacustre sobre as condições atmosféricas da Região Metropolitana de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13, 2004, Fortaleza-CE. **Anais**: 1980-2006. Fortaleza-CE:CBMET, 2004. Disponível em: <<http://www.cbmet.com/busca.php>>. Acesso em: Maio de 2016
- FRIZZOLA, John A.; FISHER, Edwin L. A series of sea breeze observations in the New York City area. **Journal of Applied Meteorology**, v. 2, n. 6, p. 722-739, 1963.

GRECO, S.; ULANSKI, S.; GARSTANG, M.; HOUSTON, S. Low-level nocturnal wind maximum over the central Amazon basin. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 58, n. 1-2, p. 91-115, 1992.

HAURWITZ, B. Comments on the sea-breeze circulation. **Journal of Meteorology**, v. 4(1), p.1-8, 1947.

JANOWIAK, J. E.; KOUSKY, V. E.; JOYCE, R. J. Diurnal cycle of precipitation determined from the CMORPH high spatial and temporal resolution global precipitation analyses, **Journal of Geophysical Research**, 110, D23105, 2005. DOI: 10.1029/2005JD006156.

KOUSKY, E. V. Diurnal rainfall variation in northeast Brazil. American Meteorological Society. **Monthly Weather Review**, v. 108, p. 488-498, 1980.

MADDOX, R. A. Mesoscale convective complexes. **Bull. Amer. Met. Soc.**, v.53, p. 135-156, 1980.

MATOS, A. P; COHEN, J.C.P. Circulação de brisa e a banda de precipitação na margem leste da baía de Marajó. **Ciência e Natura**, 2015.

MOLION, Luiz Carlos Baldicero. Climatologia Dinâmica da região Amazônica: mecanismos de precipitação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 1987, 2.1: 107-117.

OLIVEIRA, A.P.; FITZJARRALD, D.R. The Amazon river breeze and the local boundary layer: I. Observations. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 63(1), p.141-162, 1993.

Da Silva, R.R.; Gandu, A.W.; Sá, L.D.; Dias, M.A.S. Cloud streets and land–water interactions in the Amazon. **Biogeochemistry**, v. 105(1-3), p. 201-211, 2011.

SALATI, E.; MARQUES, J. Climatology of the Amazon region. **Springer Netherlands**, v. The Amazon, p. 85-126, 1984.

SANTOS, S.R.Q.; VITORINO, M.I.; BRAGA, C.C.; CAMPOS, T.B.; SANTOS, A.P. O Efeito de Brisas Marítimas na Cidade de Belém-PA: Utilizando análise em Multivariada. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5(5), p.1110-1120, 2013.

SIMPSON, J. E. Sea breeze and local wind. **Cambridge: Cambridge University Press**, 1994. 234 f.

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

SODRÉ, G. R. **Estudo Da Convecção De Mesoescala Em Diferentes Superfícies Na Amazônia Oriental**. 2013. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

TEIXEIRA, R. F. B. O fenômeno da brisa e sua relação com a chuva sobre Fortaleza - CE. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 23, n. 3, Set. 2008.

UVO, C.R.B. **A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua Relação com a Precipitação da Região Norte do Nordeste Brasileiro**. 1989. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 1989.

VITORINO, M.I.; SILVA, M.E.S.; ALVES, J.M.B. Classificação de sistemas convectivos de Mesoescala no setor norte do nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia** v.12, 21-32.1997.

VITORINO, M.I.: **Análise das Oscilações Intrasazonais sobre a América do Sul e Oceanos Adjacentes utilizando a Análise de Ondeletas**. Tese (Doutorado) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, SP, Dez. 2002.

WEXLER, R. Theory and observations of land and sea breezes. **Bulletin of American Meteorological Society**, v. 27, p. 272-287, 1946.

ZHU, M.; ATKINSON, B.W. Observed and modelled climatology of the land-sea breeze circulation over the Persian Gulf. **International journal of climatology**, v. 24(7), p.883-905, 2004.