

## VARIABILIDADE DE ELEMENTOS METEOROLÓGICOS E DE CONFORTO TÉRMICO EM DIFERENTES AMBIENTES NA AMAZÔNIA BRASILEIRA

BARBOSA, Paulo Henrique Dias – phdbarbosa@hotmail.com  
Engenheiro Agrônomo – Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária

COSTA, Antônio Carlos Lôla da – lola@ufpa.br  
Meteorologista – Instituto de Geociências – Universidade Federal do Pará

CUNHA, Alan Cavalcanti da – alancunha12@gmail.com  
Engenheiro Químico – Colegiado de Ciências Ambientais – Universidade Federal do Amapá

SILVA JUNIOR, João de Athaydes – athaydes@ymail.com  
Meteorologista – Instituto de Geociências – Universidade Federal do Pará

**RESUMO:** O estudo de clima urbano na Região Amazônica é recente e apresenta atual relevância porque explica algumas das complexas mudanças ambientais envolvidas, destacando-se o consequente desequilíbrio físico dos sistemas solo-planta-atmosfera. Destacam-se a redução de índices de precipitação e umidade relativa do ar em contrapartida do aumento da radiação e temperatura do ar, induzidas pelo desmatamento e artificialização dos ambientes construídos. O objetivo da presente investigação é analisar a variabilidade média horária e mensal de elementos meteorológicos em três diferentes ambientes na Amazônia brasileira, enfatizando tanto o ambiente urbano quanto o ambiente florestal preservado. O estudo experimental urbano foi desenvolvido em Belém (PA) e Manaus (AM), e o florestal, na FLONA de Caxiuanã (PA). Os dados foram obtidos de estações meteorológicas automáticas localizadas a 1,5 metros da superfície do solo nas cidades e, no ambiente florestal, acima do dossel na FLONA de Caxiuanã. O período de estudo foi de 2009 a 2013, com medições dos elementos meteorológicos a intervalos de 30 minutos. Os resultados indicaram a precipitação como o elemento meteorológico mais variável, tanto espacial quanto sazonalmente (teste de Kruskal-Wallis). Para a temperatura do ar, umidade relativa do ar e radiação solar global, a variação mensal não foi significativa ( $p > 0,05$ ), contudo sendo mais perceptíveis as variações horárias sazonais. Em relação à temperatura do ar, houve significância ( $p < 0,05$ ) entre os menores valores da FLONA de Caxiuanã em relação aos das áreas urbanas. Conclui-se que houve significativa atenuação da temperatura e melhoria do conforto térmico relacionado na área florestal, o que enfatiza sua relevância em ambientes urbanos tropicais amazônicos. E, conseqüentemente, relação direta com a melhoria da qualidade de vida de seus habitantes.

**PALAVRAS-CHAVE:** Clima urbano, variabilidade, Floresta Amazônica, Comparativo

*WEATHER ELEMENTS OF VARIABILITY AND THERMAL COMFORT IN DIFFERENT ENVIRONMENTS IN THE BRAZILIAN AMAZON*

**ABSTRACT:** The study of urban climate in the Amazon is recent and has current relevance because it explains some of the complex environmental changes involved, especially the consequent physical imbalance of the soil-plant-atmosphere system. Highlights include the reduction of rainfall indexes and relative humidity in return for increased radiation and air temperature, induced by deforestation and artificial state of built environments. The goal of this study is to analyze the average hourly and monthly variability of air temperature, relative and specific humidity, solar radiation and precipitation in different environments in the Brazilian Amazon to emphasize the effect of urbanization and geographic location the same. This study was conducted in cities of the Belém (PA) and the Manaus (AM) and FLONA of the Caxiuanã (PA). The data were obtained from automatic weather stations using Campbell Scientific dataloggers (CR100 model), located above the canopy in FLONA at Caxiuanã and 1.5 meters from the surface in the cities, both of which had typical urban characteristics. Measurements were taken at 30 minute intervals between 2009 and 2013. The results indicated that precipitation was the meteorological element with greater variation, both between locations and seasonally. For air temperature, relative moisture and solar radiation, the monthly variation was small, and was instead mostly characterized by seasonal and hourly variations. The heat index also showed little difference between the sites studied, however at the FLONA of Caxiuanã the values were lower, highlighting the importance of green areas for improving the thermal comfort of the Amazon region. This is emphasized further in the air temperature data at the FLONA of Caxiuanã, which was significantly lower than those observed in the cities. This attenuation of temperatures and thermal comfort in intensely vegetated and

preserved areas emphasizes the need for preservation of Amazonian green areas to improve the quality of life for the inhabitants of Amazonia.

**KEY WORDS:** Urban climate variability, Amazon rainforest, comparative.

---

## 1. INTRODUÇÃO

A Região Amazônica ocupa uma área de aproximadamente  $5,5 \times 10^6$  km<sup>2</sup>, sendo uma fração desta formado por florestas densas. Mas, devido às altas taxas de desmatamento e geração de perturbações antrópicas complexas, tem sido foco de diversas modalidades de pesquisas científicas envolvendo o clima florestal e, somente mais recentemente, o clima urbano.

No primeiro caso as pesquisas normalmente priorizam o estudo das relações entre os sistemas solo-planta-atmosfera e os processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem na floresta, e que, conseqüentemente, vão alterar o clima da mesma (COSTA et al., 2013b).

Mas, no segundo caso, o processo de urbanização da Amazônia tem também ocorrido de forma intensiva, especialmente a partir da década de 1960. Nas últimas décadas, as taxas de crescimento populacional nos grandes centros urbanos foram superiores às outras regiões brasileiras, resultado, principalmente, do fluxo migratório originário do Nordeste e do Sul do Brasil. (SATHLER et al., 2009).

Como o clima do ambiente deteriorado das cidades nesses ambientes é, em algum grau, agressivo e desconfortável, o ser humano tem criado ambientes artificiais para suprir suas necessidades de conforto. Mas, em contrapartida, a modificação do ambiente altera equilíbrio termodinâmico entre a superfície e a atmosfera, alterando principalmente a relação temperatura/ umidade do ar (VIANA E AMORIM, 2008).

Nas cidades, o aumento da temperatura do ar em relação ao seu entorno rural adjacente, ocorre uma das mais acentuadas modificações meteorológicas provocadas deste processo de urbanização (COSTA, 1998). Historicamente, esse fenômeno foi definido por Oke (1987) como ilha de calor urbana, sendo a ocorrência do aumento da temperatura do ar nas áreas centrais dos centros urbanos sua principal manifestação observável. Isto é, a alteração da variação da temperatura/umidade em relação à sua periferia, como consequência das alterações das características térmicas devido à presença de novas superfícies artificiais introduzidas no ambiente urbano, decorrente da substituição de áreas vegetadas por edificações e pavimentação.

Mas o clima da Amazônia é uma combinação de diversas variáveis e fatores, com destaque à quantidade de energia solar no topo da atmosfera como a principal reguladora da temperatura do ar (médias de 24 a 26°C) (FISCH, MARENGO E NOBRE, 2006).

Em contrapartida, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é o principal sistema de grande escala gerador de precipitação sobre a região Amazônica (COSTA, 1998). A ZCIT é definida por um conjunto de variáveis meteorológicas que atuam de forma conjunta, sendo elas a Zona de Confluência dos Alísios (ZCA), a região do Cavado Equatorial, as áreas de máxima Temperatura da Superfície do Mar (TSM) e de máxima convergência de massa, e a banda de máxima cobertura de nuvens convectivas (MELO et al., 2009).

Estes sistemas de grande escala são relativamente bem conhecidos pelos meteorologistas da Amazônia (SILVA Jr et al. 2011a; SOUZA, 2006; HASTENRATH, 2012; MELO, et al., 2008; MOLION, 1987; OLIVEIRA, et al., 2008; OLIVEIRA, 2007; PEREIRA, et al. 2002; RAMOS, et al., 2009 e SATHLER, 2009). Contudo, pouco se sabe sobre como

a expansão dos grandes centros urbanos influencia o clima e as atividades humanas, haja vista que há poucas investigações nesta área que tentam analisar quais são os impactos das mudanças das superfícies artificiais sobre os elementos meteorológicos nesses ambientes modificados.

Portanto, a hipótese principal da presente pesquisa é testar se existem de fato potenciais diferenças entre os elementos meteorológicos (temperatura, umidade, radiação global e precipitação) quando comparados com um ambiente genuinamente florestal ou conservado na Amazônia e analisá-los em comparação com outros estudos da literatura (SILVA JÚNIOR et al., 2012; SILVA JUNIOR et al., 2013a; SILVA JUNIOR, et al., 2013b; SILVA JÚNIOR, et. al., 2011 e SILVA JÚNIOR, et. al., 2012<sup>a</sup>; OLIVEIRA et al., 2008).

Com base nestes pressupostos, o objetivo do trabalho é analisar a variabilidade média horária e mensal da temperatura do ar, umidade relativa e específica do ar, radiação solar global e precipitação nos três diferentes ambientes da Amazônia brasileira, enfatizando tanto as respostas dos efeitos hidrotérmicos da urbanização quanto na floresta tropical preservada.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### Áreas de estudo

A área focal de estudo na região Amazônica Brasileira está representada pela figura 1. Destacam-se a densa floresta tropical, a Floresta Nacional - FLONA - de Caxiuanã (PA), e as cidades de Belém (PA) e de Manaus (AM). As localidades de monitoramento e estudo estão descritas textualmente na própria figura 1, em baixas latitudes (próximas e abaixo da Linha do Equador).

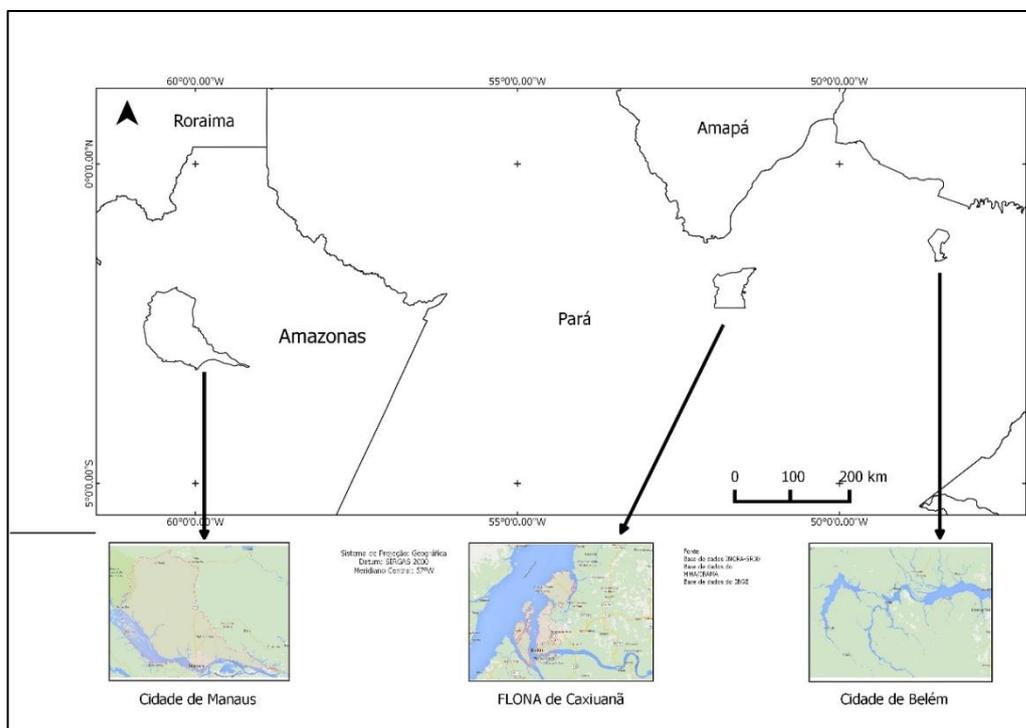


Figura 1 – Localização geográfica das cidades de Belém (PA) e de Manaus (AM) e da FLONA de Caxiuanã (PA).

A oeste na figura 1, a cidade de Belém (01°23'S e 048°29'W), capital do Estado do Pará, encontra-se distante cerca de 100 km do Oceano Atlântico. Apresenta uma

topografia praticamente plana, com aproximadamente 60% de suas terras abaixo da cota de 4,0m acima do nível do mar. Segundo o IBGE (2014) Belém possui área de 1.059,46km<sup>2</sup> e população de 1.393.399 habitantes (estimativa de 1.432.844 habitantes para 2014).

Climaticamente, a temperatura média anual do ar é de 26,0°C, com máximas e mínimas variando entre 31,5 e 22,0°C durante o ano (INMET, 1992). As precipitações ocorrem em duas estações distintas: a chuvosa, que se estende de dezembro a maio, e a seca, entre junho a novembro, sendo a média anual de 2.858,7mm. Cerca de 71,2% deste total anual ocorre no período chuvoso (INMET, 1992). Belém pode ser classificada climaticamente, segundo Köppen, como de clima tropical chuvoso, com baixa amplitude térmica anual e precipitação média mensal superior a 60mm, ou seja, tipo Afi.

A leste na figura 1, Manaus (03°08'S e 060°18'W) encontra-se distante cerca de 1.600km do Oceano Atlântico. Manaus, assim como Belém, sofreu um processo de industrialização regional, sendo que sua população, no período de 1960 a 1996, apresentou crescimento notável, de 152.432 para 1.108.162 habitantes. Atualmente a população residente em Manaus é de 1.802.014 habitantes (estimativa de 2.020.301 para 2014) e uma área de 11.401,0km<sup>2</sup> (IBGE, 2014).

Climaticamente, Manaus apresenta-se como do tipo equatorial úmido, com temperatura média anual de 26,7°C, variando entre 23,3°C e 31,4°C. A média da precipitação anual é de 2.286mm e a umidade relativa do ar oscila em torno de 80%. A região possui duas estações distintas: a chuvosa, que se estende de dezembro a maio e a seca, entre junho a novembro. A cidade de Manaus pode ser classificada, segundo Köppen, como de clima tropical chuvoso, com baixa amplitude térmica anual e precipitação média mensal superior a 60mm, ou seja, tipo Ami.

A leste, mais ao centro da figura 1, a FLONA de Caxiuanã está situada no estado do Pará. E o sítio experimental localiza-se exatamente na Estação Científica Ferreira Pena (ECFPn) (1°43'3,5"S; 51°27'36"W). A referida estação está situada aproximadamente a 15m acima do nível do Rio Curuá. Neste ambiente, ocasionalmente, o lençol freático foi observado a 10m de profundidade na estação chuvosa (FISHER et al., 2006).

Climatologicamente, na FLONA, a temperatura média anual do ar é 25,7±0,8°C, com precipitação média anual é 2.272 ± 193mm. A média anual da umidade relativa do ar é de 82,3%. A média anual da radiação solar global é de 286,1W.m<sup>-2</sup> (MORAES et al., 1997). Pela classificação climática de Köppen, o clima é do tipo tropical quente e úmido e subtipo climático "Am" com uma curta estação seca (OLIVEIRA, 2007).

## Dados utilizados

Os dados meteorológicos foram obtidos de estações automáticas de superfície, da marca Campbell Scientific, com *datalogger* modelo CR1000, localizada no topo de uma torre micrometeorológica de 40m de altura na FLONA de Caxiuanã.

Nas cidades de Belém e Manaus as estações de coletas foram instaladas a 1,5m da superfície, em locais estratégicos, normalmente em zonas intensamente urbanizadas e com mínima porcentagem de cobertura vegetal, de modo que fosse possível testar a hipótese de diferenças entre estas e a floresta.

O período de estudo foi de março de 2009 a dezembro de 2013, sendo as medições feitas a intervalos de 30 minutos. Os elementos meteorológicos estudados foram: A temperatura do ar (°C), umidade relativa do ar (%), umidade específica do ar (gH<sub>2</sub>O.kg<sup>-1</sup>ar úmido), radiação solar global mensal (M.J.m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>), radiação solar global horária (W.m<sup>-2</sup>), a precipitação pluviométrica (mm) e índice de calor (°C).

Para efeito de padronização meteorológica entre os locais estudados, foram definidos apenas o período chuvoso, que considera os meses com precipitação total

superior a 100mm, e o período menos chuvoso, ou seco, que considera os meses com precipitação inferior a 100mm.

Essa metodologia foi também adotada por Costa et al. (2006, 2003) e por Nunes e Costa (trabalho em revisão - não publicado). Sendo assim, os períodos secos e chuvosos em cada localidade foram identificados como de padrões diferentes, de acordo com suas características locais (resultado das séries temporais individuais para cada elemento meteorológico).

A temperatura e a umidade relativa do ar foram medidas por um psicrômetro do tipo MODEL HMP45C, cuja temperatura de operação oscila entre -40°C até 60°C. A precipitação pluviométrica foi medida através de um pluviógrafo do tipo TB4, com 200mm de diâmetro de funil e capacidade de "basculante" de até 100mm/hora. A radiação solar global foi medida através de um piranômetro modelo CMP3, da Kipp & Zonnen. Para a aquisição destas informações foram utilizados *dataloggers* modelo CR1000, da Campbell Scientific.

Por convenção, neste estudo, foi utilizado o índice de conforto térmico ou índice de calor (IC), derivado do índice humidex, desenvolvido por Winterling em 1978 e posteriormente adaptado com base nos trabalhos de Steadman (1979).

O IC foi elaborado a partir de medidas subjetivas de quanto calor um indivíduo comum sente para determinados valores de temperatura e umidade relativa do ar. Estes podem ser mensurados em diversas situações climáticas, como quando em situações em que as temperaturas estão elevadas, com indivíduo à sombra ou em condições de vento fraco (equação 1).

Para outros períodos diferentes do presente estudo, este índice foi testado para a cidade de Belém por Silva Junior et. al. (2011). A equação 1, apresentou uma boa correlação com a percepção térmica dos indivíduos entrevistados. A formulação do IC é dada através da equação 01.

$$IC = -42,379 + 2,04901523.T + 10,14333127.U.R - 0,22475541.T.UR - 6,83783 \times 10^{-3}.T^2 - 5,481717 \times 10^{-2} U.R^2 + 1,22874 \times 10^{-3} T^2.UR + 8,5282 \times 10^{-4} T.U.R^2 - 1,99 \times 10^{-6} U.R^2$$

Onde, T é a temperatura do bulbo seco (°F) e UR é a umidade relativa do ar (%)

Para melhor interpretar a equação 1 (IC), é possível classificar os níveis de alerta e suas consequências à saúde humana, sendo as definições explicadas na Tabela 1:

Tabela 01 – Níveis de alerta e suas consequências à saúde humana do Índice Térmico

| Nível de Alerta        | Índice de Calor | Sintomas   |
|------------------------|-----------------|--|
| <i>Perigo Extremo</i>  | 54,0°C ou mais  | Insolação. Risco de acidente vascular cerebral (AVC) iminente  |
| <i>Perigo</i>          | 41,1°C - 54,0°C | Câimbras, insolação, esgotamento físico. Possibilidade de danos cerebrais (AVC) para exposições prolongadas com atividades físicas |
| <i>Cautela Extrema</i> | 32,1°C - 41,0°C | Possibilidade de câimbras, de esgotamento físico e insolação para exposições prolongadas e atividades físicas.                     |

|                      |                  |  |
|----------------------|------------------|--|
| <i>Cautela</i>       | 27,1°C - 32°C    | Possível fadiga em casos de exposição prolongadas e prática de atividades físicas. |
| <i>Não há alerta</i> | Menor que 27,0°C | Não há problemas   |

Fonte: Adaptado de National Weather Service. Weather Forecast Office, NOAA e Fundacentro.

### **Análise de dados**

Para a análise dos dados, foram consideradas as seguintes hipóteses: H0 (Hipótese Nula): a localização geográfica e a sazonalidade influenciam o padrão de variação de todos os elementos meteorológicos estudados; H1 (Hipótese Alternativa) representa a negação de H0.

Para análise dessas hipóteses entre os tratamentos (cidades e sazonalidade) foi realizado um teste não paramétrico utilizando-se às variáveis originais como as independentes. Didaticamente, testes não paramétricos são aqueles em que não há pressuposto sobre modelo de distribuição nem quanto aos parâmetros, não se aplicando aos mesmos o Teorema do Limite Central (AYRES et al., 2005).

No presente estudo foi aplicado então o teste de Kruskal-Wallis, conhecido como teste H, que compara k amostras (independentes do mesmo tamanho ou desiguais), cujos escores devem ser mensurados, pelo menos, em nível ordinal. Este teste é comparado à ANOVA de um critério. Posteriormente, foi usado o método de Dunn (AYRES et al., 2005a), considerado estatisticamente conservador, porque retifica o nível de significância conforme o número de amostras. Para as análises foram utilizados os aplicativos Biostat 5.1 (AYRES et al., 2005) e Minitab 17 (RYAN, JOINER E RYAN, 2004).

Deste modo, o padrão das variações mensais dos elementos meteorológicos estudados serviram de subsídios para as demais interpretações, com suplemento de um análise estatística descritiva para cada variável.

## **3. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

O padrão das variações mensais dos elementos meteorológicos estudados deram subsídios para as demais interpretações. Foi elaborada também a estatística descritiva para cada variável.

### **Precipitação**

Na figura 2 dispõe-se da distribuição média mensal da precipitação nos locais estudados. Observou-se uma sazonalidade bem definida (e distinta) nas três localidades. Em Belém (PA) o período seco se estendeu entre os meses de setembro a novembro, em Manaus (AM) este mesmo período ocorreu entre os meses de junho a setembro, enquanto que para a FLONA de Caxiuanã os meses secos se estenderam de julho a novembro.

Os totais médios anuais precipitados nos locais estudados foram de 2.082,7mm em Belém, 1.793,2mm em Manaus e 2.452,9mm na FLONA de Caxiuanã. Esta variabilidade intervalar e duração dos períodos secos e chuvosos nesta região está associada, principalmente, com os sistemas meteorológicos de pequena (convectivos) e grande escalas (ZCIT) atuantes na Amazônia. Provavelmente, a localização geográfica, a dimensão e o tipo de uso e cobertura do solo tendem a influir sobre este padrão de distribuição mensal das chuvas nos locais estudados (COSTA et al., 2013b; COSTA, 1998; FISCH, MARENGO e NOBRE, 2006; SILVA JUNIOR et al., 2013b)

Em Belém o total de precipitação no período seco foi de 225,3mm, correspondendo a 10,8% do total anual, enquanto que no período chuvoso este valor foi

de 1.857,3mm (89,2% do total anual). Em Manaus a precipitação no período seco foi de 244,1mm (13,6% do total anual) e de 1.549,2mm no período chuvoso (86,4% do total anual). Finalmente, na FLONA de Caxiuanã a precipitação foi de 308,3mm no período seco (12,6% do total) e 2.144,6mm no período chuvoso (87,4% do total). Deste modo, observou-se que o maior frequência das precipitações ocorre no período definido como chuvoso, com mais de 86,0% do total anual precipitado.

Observou-se também que tanto a precipitação máxima (abril) quanto a mínima (setembro) ocorreram na FLONA de Caxiuanã, com 487,1mm e 37,0mm, respectivamente. Os valores máximos para cidade de Belém e cidade de Manaus foram próximos, sendo de 297,4mm (fevereiro) para a primeira e 223,5mm (fevereiro) para a segunda. Em relação aos mínimos para cidade de Belém foram de 60,3mm (outubro) e para cidade de Manaus de 38,2mm (agosto).

Quando analisado estatisticamente, o coeficiente de na FLONA de Caxiuanã (78,3%) foi maior que nos centros urbanos (52,1% para as duas cidades), devido a ocorrência de maiores precipitações e maiores amplitudes destes elementos. Por esse motivo também, o desvio padrão na FLONA de Caxiuanã (160,0) é muito maior que nas duas cidades (90,4 em Belém e 77,8 em Manaus). Entre as duas cidades as variações foram semelhantes, indicando padrões meteorológicos próximos.

Quando comparados os dados das Normais Climatológicas (Ramos, Santos e Fortes, 2009) da cidade de Belém e da cidade de Manaus e dados históricos da FLONA de Caxiuanã (1980 a 2005) com os dados coletados durante o período de pesquisa do presente trabalho, observou-se que os resultados seguem os mesmos padrões de sazonalidade da Normal Climatológica somente para a cidade de Manaus (Ramos, Santos e Fortes, 2009). Quando considerado os dados históricos para a FLONA de Caxiuanã, somente houve variação de período seco no mês de novembro. No entanto, Belém, nos meses mais secos entre agosto e novembro, em nenhum deles a precipitação foi menor que 100mm. Isso se deve ao fato da estação experimental do INMET na cidade de Belém estar em uma área mais periférica, sofrendo pouco a influência da urbanização local.

Comparando os valores precipitados mensalmente em Belém e Manaus durante o período estudado com os dados das Normais Climatológicas, verificou-se uma redução da precipitação de 839,1 e 514,2mm nesses locais, respectivamente. Na FLONA de Caxiuanã observou-se aumento de 448,9mm em relação à série de dados de 1980 a 2005. Esta redução foi mais acentuada durante o período chuvoso destes locais, enquanto que durante o período seco, tais diferenças foram mínimas (COSTA et al., 2006; OLIVEIRA, 2007).

O reduzido aumento dos valores precipitados na FLONA de Caxiuanã pode indicar a estabilidade climática experimentada por este ecossistema preservado, não sofrendo fortes influências dos eventos de anomalias meteorológicas de grande escala. Em seus trabalhos na FLONA de Caxiuanã, Costa et al. (2006; 2006b) obtiveram resultados próximos, onde a precipitação manteve alta, principalmente no período chuvoso. Silva Junior et al. (2013b) e Costa et al. (2013b), em suas pesquisas na cidade de Belém, encontraram valores mais altos de precipitação em ambientes mais preservados em relação às áreas urbanizadas.

A figura 3 apresenta a variabilidade média horária da precipitação nos períodos seco e chuvoso entre 2009 a 2013. Observou-se que a precipitação média na FLONA de Caxiuanã é maior que Belém e Manaus, tanto no período chuvoso, quanto no seco. Entre as duas últimas, a cidade de Manaus apresentou menor precipitação no período chuvoso e maior no período seco.

Importante salientar o padrão de precipitação muito semelhante ocorrido durante o período chuvoso entre Manaus e a FLONA de Caxiuanã. Em ambas as localidades

parece não ocorrer um horário preferencial das precipitações (COSTA et al. 2006; OLIVEIRA et al., 2008), podendo ocorrer a qualquer hora do dia.

No período seco, a semelhança acontece, embora não tão forte como na época chuvosa, entre Belém e a FLONA de Caxiuaná. O período chuvoso em Belém diferencia-se de todos os demais locais estudados. Estudos como os de Fisch, Marengo e Nobre (2006) e Molion (1987) mostram que nos períodos secos as precipitações são causadas por sistemas convectivos e nos períodos chuvosos principalmente por sistemas de grande escala, como a ZCIT. Os sistemas convectivos, no período chuvoso, estão associados a chuvas ocorridas no final das tardes (COSTA, 1998; COSTA et al., 2013b; FISCH, MARENGO e NOBRE, 2006).

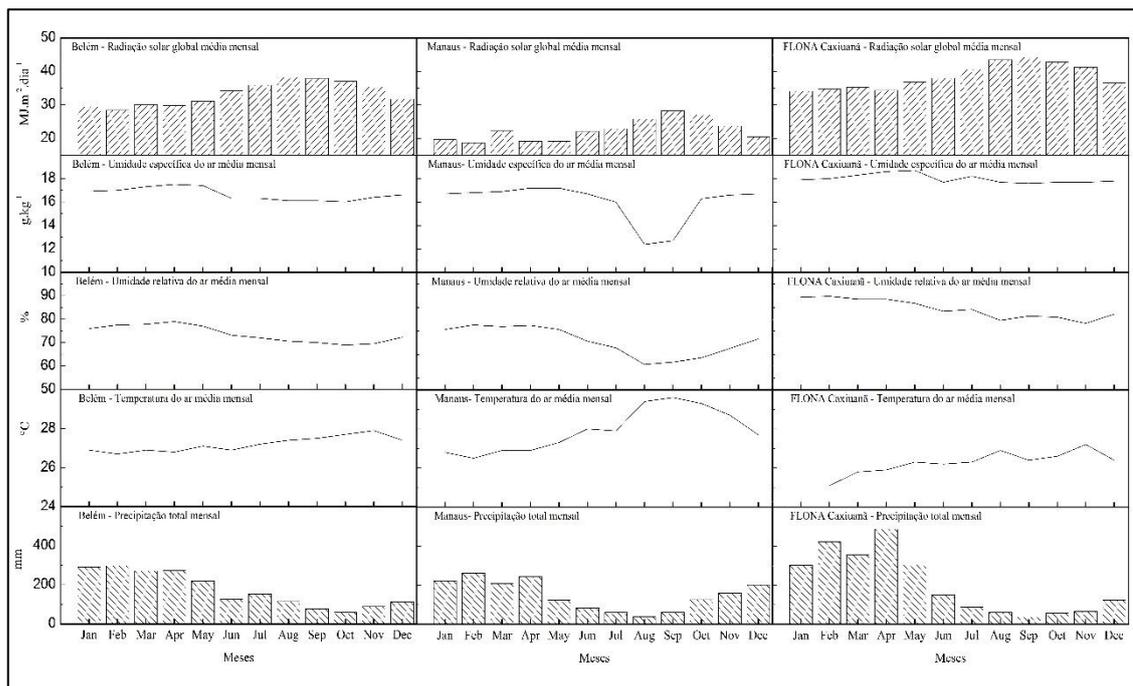


Figura 2 - Distribuição média mensal da precipitação, temperatura do ar, umidade relativa do ar, umidade específica do ar e radiação solar global nas cidades de Belém (PA) e de Manaus (AM) e na FLONA de Caxiuaná (PA) entre os períodos de março de 2009 a dezembro de 2013.

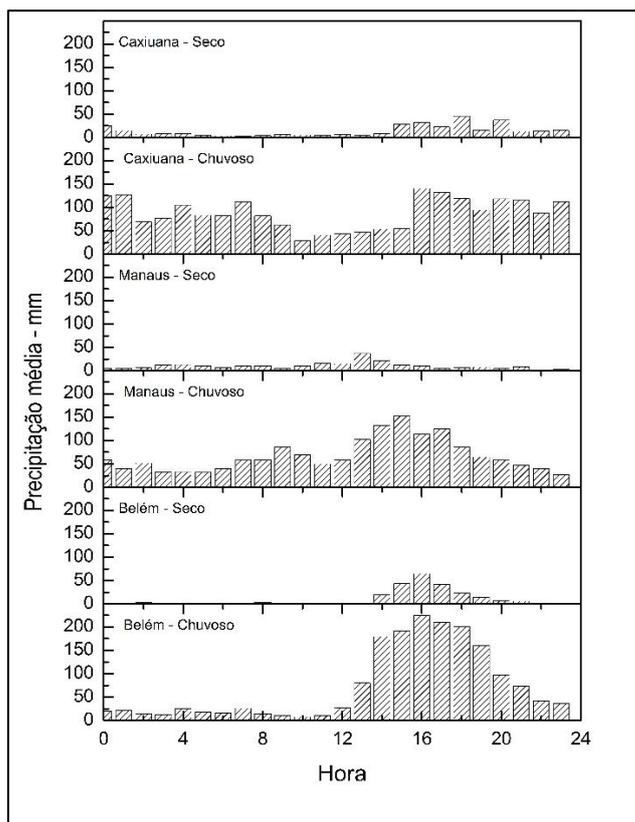


Figura 3 - Variabilidade média horária da precipitação nos períodos seco e chuvoso nas cidades de Belém (PA) e de Manaus (AM) e na FLONA de Caxiuana (PA) entre os períodos de março de 2009 a dezembro de 2013.

Como abordado anteriormente, toda a estação mais chuvosa é modulada de acordo com o deslocamento sazonal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), mais ao sul (HASTENRATH, 2012), que no Verão do Hemisfério Sul está atuante, provocando chuvas constantes, principalmente na costa Atlântica Paraense, atingindo a região Norte do Brasil e, conseqüentemente, as três localidades em estudo.

Como geralmente as precipitações ocorridas no período seco estão associadas com a grande atividade convectiva, e possivelmente a penetrações de Linhas de Instabilidade (LI) sobre a costa atlântica da América do Sul, que se propagam até o interior da bacia amazônica, ocorrem com maior frequência no mês de agosto. Estas LI são responsáveis por, aproximadamente, 45,0% da precipitação incidente sobre a região leste do Pará (COHEN, 1989).

Em Belém a maior fração da precipitação ocorre entre os períodos de 14 às 19 horas, na cidade de Manaus das 13 às 18 horas, regime de precipitações tipicamente continental. Esse comportamento é visto tanto no período chuvoso quanto no seco para ambas as localidades. Silva Junior (2013b) em sua pesquisa em Belém, encontrou resultados semelhantes, mostrando também o aumento da precipitação e diminuição da temperatura do ar em locais mais vegetados.

Na FLONA de Caxiuana as precipitações predominam entre 16 e 01, hora local. Durante o período seco da região, as precipitações ocorreram, preferencialmente, no final da tarde e durante as horas noturnas, caracterizando um regime de precipitações convectivas. As maiores precipitações registradas no intervalo de uma hora ocorreram entre 16 e 18 horas. Estudos realizados por Costa et al., (2006) também evidenciaram estas características das precipitações na FLONA Caxiuana.

Como análise comparativa entre os diferentes elementos meteorológicos estudados, a tabela 2 mostra os resultados do teste de Kruskal-Wallis para a variabilidade horária e sazonal nos locais estudados.

Estatisticamente não foi observado diferenças significativas ( $p > 0,05$ ) somente entre Belém e Manaus no período chuvoso. E entre Manaus e a FLONA de Caxiuanã, no período seco. Os demais apresentaram valores significativos ( $p < 0,05$ ), mostrando que a precipitação varia não somente entre localidades mas também sazonalmente, sendo esse resultado um provável reflexo dos fenômenos meteorológicos já abordados (COSTA, 1998; COSTA et al., 2013b; FISCH, MARENGO e NOBRE, 2006; MOLION, 1987)

Tabela 2 – Teste de Kruskal-Wallis (KW) para a análise média horária da precipitação, temperatura do ar, umidade relativa e específica do ar, radiação solar global e índice calor, comparando as cidades de Belém (B) e de Manaus (M) e a FLONA de Caxiuanã (F) sazonalmente (período chuvoso – C e período seco – S) dentro de cada localidade e sazonalmente entre localidades, com destaque nos resultados significativos.

**Análises médias horárias**

| <b>Precipitação</b>           | <b>p KW</b>      | <b>p Dunn</b>  | <b>Umidade específica do ar</b> | <b>p KW</b>      | <b>p Dunn</b>  |
|-------------------------------|------------------|----------------|---------------------------------|------------------|----------------|
| <b>B.C. vs B.S.</b>           | <b>0,0000001</b> | <b>0,00001</b> | <b>B.C. vs B.S.</b>             | <b>0,0000001</b> | <b>0,00001</b> |
| <b>M.C vs M.S.</b>            | <b>0,0000001</b> | <b>0,00001</b> | <b>M.C vs M.S.</b>              | <b>0,0000001</b> | <b>0,00001</b> |
| <b>F.C. vs F.S.</b>           | <b>0,0000001</b> | <b>0,00001</b> | <b>F.C. vs F.S.</b>             | <b>0,0000001</b> | <b>0,00001</b> |
| B.C. vs M.C.                  | 0,1033           |                | B.C. vs M.C.                    | 0,9167           |                |
| <b>B.C. vs F.C.</b>           | <b>0,0233</b>    | <b>0,00001</b> | <b>B.C. vs F.C.</b>             | <b>0,0000001</b> | <b>0,00001</b> |
| <b>M.C. vs F.C.</b>           | <b>0,0337</b>    | <b>0,00001</b> | <b>M.C. vs F.C.</b>             | <b>0,0000001</b> | <b>0,00001</b> |
| <b>B.S. vs M.S.</b>           | <b>0,0094</b>    | <b>0,00001</b> | <b>B.S. vs M.S.</b>             | <b>0,0000001</b> | <b>0,00001</b> |
| <b>B.S vs F.S.</b>            | <b>0,0029</b>    | <b>0,00001</b> | <b>B.S vs F.S.</b>              | <b>0,0000001</b> | <b>0,00001</b> |
| M.S. vs F.S.                  | 0,5666           |                | <b>M.S. vs F.S.</b>             | <b>0,0000001</b> | <b>0,00001</b> |
| <b>Temperatura do ar</b>      |                  |                | <b>Radiação solar global</b>    |                  |                |
| B.C. vs B.S.                  | 0,2975           |                | B.C. vs B.S.                    | 0,3754           |                |
| <b>M.C vs M.S.</b>            | <b>0,05</b>      | <b>0,00001</b> | M.C vs M.S.                     | 0,718            |                |
| F.C. vs F.S.                  | 0,2609           |                | F.C. vs F.S.                    | 0,6695           |                |
| B.C. vs M.C.                  | 0,3532           |                | B.C. vs M.C.                    | 0,0818           |                |
| <b>B.C. vs F.C.</b>           | <b>0,0158</b>    | <b>0,00001</b> | B.C. vs F.C.                    | 0,5767           |                |
| <b>M.C. vs F.C.</b>           | <b>0,0018</b>    | <b>0,00001</b> | <b>M.C. vs F.C.</b>             | <b>0,0452</b>    | <b>0,00001</b> |
| B.S. vs M.S.                  | 0,1638           |                | <b>B.S. vs M.S.</b>             | <b>0,0278</b>    | <b>0,00001</b> |
| B.S vs F.S.                   | 0,0778           |                | B.S vs F.S.                     | 0,5727           |                |
| <b>M.S. vs F.S.</b>           | <b>0,005</b>     | <b>0,00001</b> | <b>M.S. vs F.S.</b>             | <b>0,0499</b>    | <b>0,00001</b> |
| <b>Umidade relativa do ar</b> |                  |                | <b>Índice de Calor</b>          |                  |                |
| B.C. vs B.S.                  | 0,0578           |                | B.C. vs B.S.                    | 0,3695           |                |
| <b>M.C vs M.S.</b>            | <b>0,0001</b>    | <b>0,00001</b> | M.C vs M.S.                     | 0,0525           |                |
| <b>F.C. vs F.S.</b>           | <b>0,0312</b>    | <b>0,00001</b> | F.C. vs F.S.                    | 0,4001           |                |
| B.C. vs M.C.                  | 0,3324           |                | B.C. vs M.C.                    | 0,3478           |                |
| <b>B.C. vs F.C.</b>           | <b>0,0001</b>    | <b>0,00001</b> | B.C. vs F.C.                    | 0,5071           |                |
| <b>M.C. vs F.C.</b>           | <b>0,0000001</b> | <b>0,00001</b> | M.C. vs F.C.                    | 0,5131           |                |
| <b>B.S. vs M.S.</b>           | <b>0,0013</b>    | <b>0,00001</b> | B.S. vs M.S.                    | 0,1638           |                |
| <b>B.S vs F.S.</b>            | <b>0,001</b>     | <b>0,00001</b> | B.S vs F.S.                     | 0,7177           |                |
| <b>M.S. vs F.S.</b>           | <b>0,0000001</b> | <b>0,00001</b> | <b>M.S. vs F.S.</b>             | <b>0,0301</b>    | <b>0,00001</b> |

### Temperatura do ar

A figura 2 apresenta a média mensal da temperatura do ar nas localidades estudadas entre os períodos de 2009 a 2013.

Analisando o padrão mensal da temperatura do ar, é possível verificar que a mesma variou de 1,2°C a 3,1°C, dentro de uma mesma localidade e, no máximo, 4,5°C entre diferentes localidades. As menores temperaturas do ar ocorreram, durante a maior parte do tempo, na FLONA de Caxiuanã.

Esse fato ocorre devido à exuberância de vegetação e ausência de urbanização local. Entre Belém e Manaus, em grande parte do ano, as temperatura do ar na cidade de Manaus foi maior que as observadas em Belém. Isto é observado principalmente no segundo semestre, quando ocorre o chamado verão amazônico. Neste caso as temperaturas são mais elevadas e a precipitação é reduzida, sendo que Belém apresentou a maior temperatura registrada (29,6°C).

Costa (2013, 2013a) e Silva Junior et al. (2012) observaram resultados semelhantes. Isto é, onde há áreas mais vegetadas os valores médios de temperatura são relativamente menores do que áreas com intenso processo de urbanização. O mesmo padrão de incremento da temperatura do ar em ambientes com atuação antropogênica em relação à áreas vegetadas em Manaus também foi apresentado no trabalho de Oliveira et al. (2008).

Tanto o desvio padrão (0,4 em Belém, 1,1 em Manaus e 0,6 na FLONA de Caxiuanã) quanto o coeficiente de variação (1,4% em Belém, 3,9% em Manaus e 2,4% na FLONA de Caxiuanã) em todas as localidades foram baixos (diferentemente da precipitação), mostrando ocorrência de pouca variação nos valores desse elemento meteorológico ao longo do ano. Dentre elas a que apresentou maiores variações foi Manaus. Esse padrão é característico da região equatorial, onde predominam temperaturas do ar elevadas durante todo o ano (FISCH, MARENGO E NOBRE, 2006; COSTA et al., 2013, 2013b; SILVA JUNIOR et al., 2013b, 2012b).

Considerando o padrão horário dos elementos meteorológicos apresentado na figura 4, observou-se que as médias da temperatura do ar na FLONA de Caxiuanã foram menores que nos dois centros urbanos. Esse fenômeno ocorre por diversos fatores, sendo o principal os fluxos de calor sensível e latente. A energia que atinge a superfície terrestre é reemitida para a atmosfera na forma de fluxo de calor sensível (aquecimento) e latente (evapotranspiração). Deste modo, o balanço de energia e umidade ocorre, cujo saldo de radiação é particionado em calor sensível e/ou latente, dependendo das condições ambientais e de água no solo (FISCH, MARENGO E NOBRE, 2006).

Nos ambientes urbanos ocorre maior armazenamento de calor durante o dia, devido às propriedades térmicas e caloríficas dos materiais de construção urbana. Essas estruturas apresentam maior capacidade calorífica, o que proporciona uma maior absorção de energia durante os horários diurnos, liberando lentamente ao ambiente urbano esta energia, na forma de calor sensível. Este fenômeno é mais perceptível durante os horários noturnos, pois estão fisicamente mais aquecidos que a periferia urbana (COSTA, 1998). É possível explicar tal efeito nestes ambientes porque ocorre a redução do fluxo de calor latente devido ao aumento de superfícies impermeáveis e redução da vegetação e das águas superficiais (lagoas, lagos e rios). Aí também ocorre menor perda de calor sensível, causado pela redução da velocidade do vento originada por edificações. Além disso, ocorre simultânea adição de calor antropogênico pela utilização de aquecedores e refrigeradores, transporte e atividades industriais (MENDONÇA, 1994).

Em superfícies florestadas utiliza-se mais eficientemente a energia armazenada durante o dia, principalmente no processo de evapotranspiração, fazendo com que sobre menos radiação líquida para aquecer o ar e, conseqüentemente, com liberação menor de calor no período noturno, resfriando o ar (SOUZA, 2006). Isto é, parte da energia é utilizada nos processos de evapotranspiração, induzindo o fluxo de calor sensível, utilizado para aquecer o ar, que sofre redução, proporcionando menores temperaturas nessas regiões (COSTA, 1998).

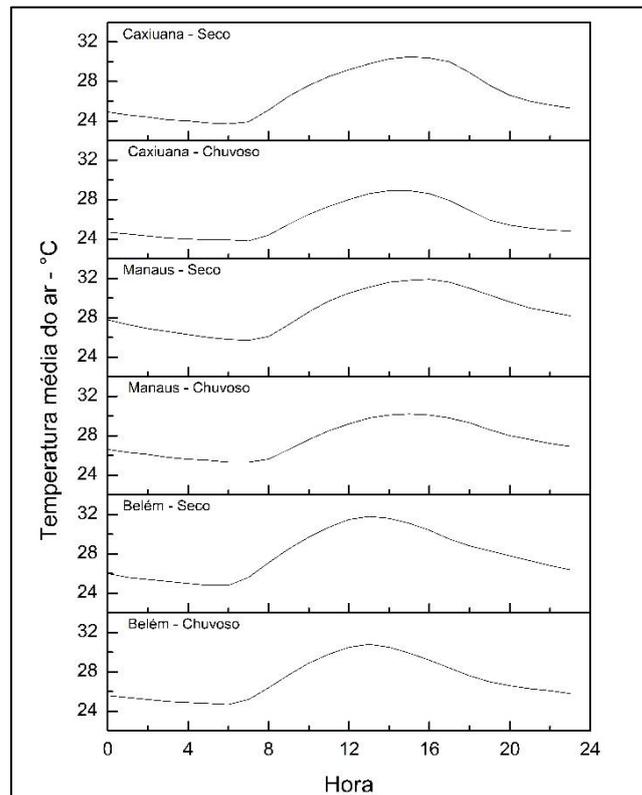


Figura 4 - Variabilidade média horária da temperatura do ar nos períodos seco e chuvoso nas cidades de Belém (PA) e de Manaus (AM) e na FLONA de Caxiuanã (PA) entre os períodos de março de 2009 a dezembro de 2013.

Sazonalmente, há um aumento nas temperaturas durante o período seco da região, principalmente nos centros urbanos, provocado, principalmente, pela redução das precipitações. Em Belém, as temperaturas do ar mínimas e máximas foram de 24,7°C e 30,8°C no período chuvoso e 24,8°C e 31,8°C no período seco. Em Manaus as mínimas e máximas foram de 25,3°C e 30,2°C no período chuvoso e 25,7°C e 31,9°C no período seco. A FLONA de Caxiuanã apresentou temperaturas do ar mínimas e máximas de 23,8°C e 28,9°C no período chuvoso e 23,7°C e 30,5°C no período seco. O período diário de ocorrência das maiores temperaturas está por volta das 14 e 15 horas, em todos os locais estudados.

Testes estatísticos para analisar a variabilidade média horária da temperatura do ar são apresentados na tabela 2. Sazonalmente, só houve diferença significativa em Manaus, provocado principalmente pela redução das chuvas e pelo processo intenso de urbanização, maior que em Belém ( $p < 0,05$ ).

Entre localidades, no período chuvoso, só não houve diferença significativa ( $p > 0,05$ ) entre Belém e Manaus, ocorrendo diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) entre os

dois centros urbanos e a floresta, fato decorrente dos fluxos de calor latente e sensível já discutido anteriormente.

No período seco, não houve diferença significativa ( $p > 0,05$ ) entre Belém e a FLONA de Caxiuanã, porém o p-valor estimado ficou muito próximo do limite de 0,05 de significância. Os outros valores seguiram o mesmo padrão do período chuvoso.

### **Umidade relativa do ar**

Basicamente, o padrão da umidade relativa do ar é inverso à temperatura, ou seja, os maiores valores ocorrem nos períodos mais chuvosos (figura 2). É possível verificar que, principalmente em Manaus, os valores reduzem-se drasticamente no período seco. A FLONA de Caxiuanã foi a que apresentou os maiores valores mensais (máxima de 89,8% em fevereiro) certamente associados com a característica da cobertura vegetal naquela região, que torna o ar mais úmido que os centros urbanos, em função da grande evapotranspiração do local (COSTA et al., 2006, 2013b).

Entre os centros urbanos, na maior parte do ano os valores na cidade de Manaus foram menores que na cidade de Belém. A amplitude variou de 10,1 a 16,8% dentro de cada localidade e 28% entre localidades, onde a cidade de Manaus apresentou o menor valor absoluto (60,8%) e a FLONA de Caxiuanã o maior (89,8%). Em relação à variabilidade anual, a umidade relativa do ar seguiu o mesmo padrão da temperatura do ar, onde os valores de variância, coeficiente de variação e desvio padrão apresentaram poucas diferenças. Trabalhos realizados por Silva Júnior (2012b) e Costa (2013b) também mostraram que há uma tendência de diminuição da umidade relativa do ar em relação ao aumento da temperatura do ar, sendo essa situação mais atenuante em centros urbanos.

Em relação à variabilidade horária (figura 3), a umidade relativa do ar na FLONA de Caxiuanã é maior que as duas cidades, reflexo dos menores valores de temperatura e maiores de precipitação. Os valores mínimos e máximos na cidade de Belém foram de 58,2 e 86,3% para a estação chuvosa e 52,2% e 83,5% para a estação seca. Silva Júnior (2012) encontrou resultados próximos para a cidade de Belém; Na cidade de Manaus foram de 61,0% e 83,6% no período chuvoso e 46,3% e 70,9% no período seco; e na FLONA de Caxiuanã foram de 72,3% e 95,9% no período chuvoso e 63,2% e 93,5% no período seco. Costa et al. (2006a) encontrou resultados parecidos para a FLONA de Caxiuanã.

Conforme tabela 2, estatisticamente, os únicos resultados não significativos foram entre as cidades de Belém e Manaus no período chuvoso e entre o período chuvoso e seco na cidade de Belém (no entanto o p-valor para esse resultado se aproximou muito do limite).

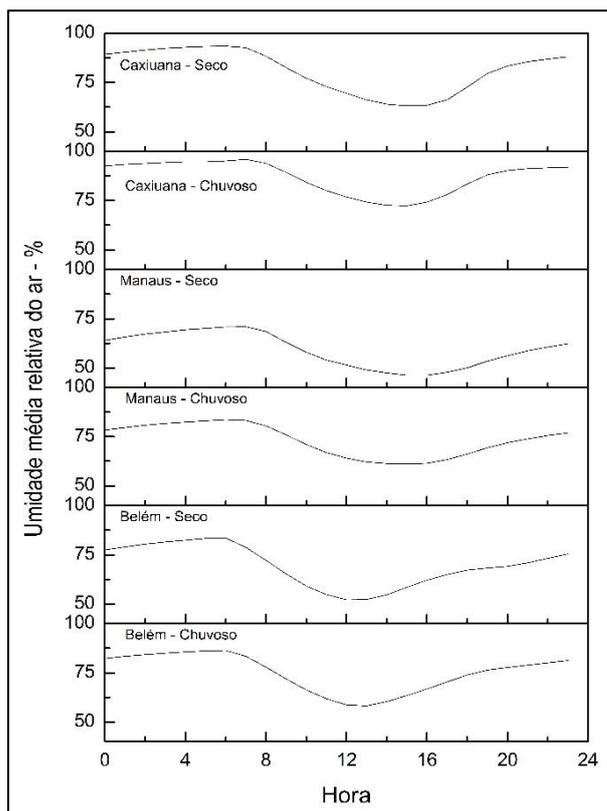


Figura 5 - Variabilidade média horária da umidade relativa do ar nos períodos seco e chuvoso nas cidades de Belém (PA) e de Manaus (AM) e na FLONA de Caxiuana (PA) entre os períodos de março de 2009 a dezembro de 2013.

Esses resultados mostram que há diferenças significativas quando se compara localidades e sazonalidade. Como mostrado acima, a cidade de Manaus é a localidade que mais sofre o impacto da sazonalidade. Isso ocorre devido ao fato da cidade não receber ação da brisa marítima, como ocorre na cidade de Belém, além de ter um processo de urbanização e industrialização também maior que a cidade de Belém.

**Umidade Específica do ar**

Mensalmente, conforme figura 2, o padrão desse elemento meteorológico é basicamente o mesmo da umidade relativa do ar, onde os maiores valores ocorrem nos períodos mais chuvosos. Ao longo do ano, esta variável não apresentou um padrão bem definido, entretanto, observou-se elevados valores, praticamente durante todos os meses do ano, oscilando por volta de 16 g.kg<sup>-1</sup> a 18g.kg<sup>-1</sup> Uma exceção foi verificada na cidade de Manaus, que apresentou drástica redução nestes valores durante a época seca, o que pode estar associado com a atuação de algum sistema meteorológico de meso-escala atuante sobre aquela cidade durante esta época do ano. No geral, mesmo quando a umidade relativa é baixa, o valor absoluto de umidade ainda assim é alta, sendo essa uma característica forte da região equatorial na América do Sul.

Entre os centros urbanos, na maior parte do ano, os valores observados na cidade de Manaus foram menores que aqueles observados para a cidade de Belém. A amplitude deste elemento meteorológico variou de 1,1g.kg<sup>-1</sup> a 4,8g.kg<sup>-1</sup> dentro de cada localidade e 6,3g.kg<sup>-1</sup> entre localidades, onde a cidade de Manaus apresentou o menor valor absoluto (12,4g.kg<sup>-1</sup>) e a FLONA de Caxiuana o maior (18,7g.kg<sup>-1</sup>).

Assim como a umidade relativa do ar, a umidade específica do ar não apresenta grandes variações. Em Caxiuana, por exemplo, o coeficiente de variação para a umidade específica do ar foi de apenas 2,09%, mostrando que é extremamente baixa a variação

desse elemento ao longo do ano, situação climática também característica da região equatorial.

Nos dois períodos, seco e chuvoso, foi possível verificar, através da análise horária apresentada na figura 3 que a umidade do ar na FLONA de Caxiuanã é maior que as duas cidades, reflexo dos menores valores de temperatura do ar e maior evapotranspiração. A cidade de Manaus, apesar de encontrar-se inserida no coração da Amazônia, foi o local que apresentou os menores valores, principalmente durante o período seco da região.

Os valores mínimos e máximos na cidade de Belém foram de  $16,1\text{g.kg}^{-1}$  e  $17,2\text{g.kg}^{-1}$  para a estação chuvosa e  $15,1\text{g.kg}^{-1}$  a  $16,9\text{g.kg}^{-1}$  para a estação seca. Na cidade de Manaus estes valores foram de  $16,3\text{g.kg}^{-1}$  e  $17,2\text{g.kg}^{-1}$  no período chuvoso e  $13,7\text{g.kg}^{-1}$  e  $15,0\text{g.kg}^{-1}$  no período seco. Finalmente, na FLONA de Caxiuanã estes valores variaram entre  $17,7\text{g.kg}^{-1}$  e  $18,6\text{g.kg}^{-1}$  no período chuvoso e  $17,2\text{g.kg}^{-1}$  e  $18,4\text{g.kg}^{-1}$  no período seco. Observou-se que não houve grandes variações diárias, sendo que o período do dia com os menores valores estão entre 10 e 14 horas, com o pico mínimo por volta das 12 horas. Esse padrão foi verificado, basicamente, para todas as localidades estudadas.

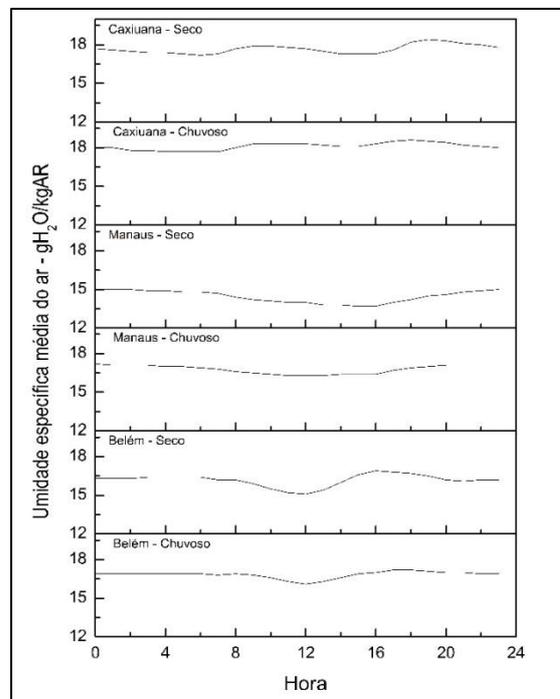


Figura 6 – Variabilidade média horária da umidade específica do ar nos períodos seco e chuvoso nas cidades de Belém (PA) e de Manaus (AM) e na FLONA de Caxiuanã (PA) entre os períodos de março de 2009 a dezembro de 2013.

De acordo com os dados estatísticos apresentados na tabela 2, o único resultado que não apresentou diferença significativa foi entre a cidade de Belém e a cidade de Manaus, durante o período chuvoso. Esses resultados mostram que há diferenças significantes deste elemento meteorológico quando se compara os efeitos da localidade e sazonalidade.

Estes resultados, tanto da umidade relativa quanto da umidade específica do ar, indicam, previamente, a grande importância do tipo de cobertura e uso do solo nos locais estudados. Em ambientes urbanos, pela falta de vegetação, a precipitação e a evapotranspiração são menores, reduzindo a umidade do ar. Além disso, um problema cada vez mais intenso em centros urbanos é a redução das áreas de infiltração e aumento de áreas construídas, que promovem aumento na temperatura média e,

consequentemente, diminuição da umidade. Na floresta, por não ter o processo de urbanização, o ciclo hidrológico funciona de forma mais regulada, mantendo a umidade do ar mais constante durante o ano e o dia.

### **Radiação solar global**

A Radiação solar é a maior fonte de energia para a Terra, principal elemento meteorológico e um dos fatores determinantes do tempo e do clima. Além disso, afeta diversos processos físicos (aquecimento/evaporação), biofísicos (transpiração) e biológicos (fotossíntese). A Radiação solar global é primordial para o entendimento da disponibilidade de energia para os diversos processos dentro dos sistemas florestais e urbanos (PEREIRA et al., 2002).

A figura 2 apresenta a variabilidade média mensal da radiação solar global. Por se tratar da quantidade mensal, a unidade utilizada considera o acúmulo de radiação solar diária ( $\text{MJ.m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ) ao invés da média diária.

Assim como ocorre com a umidade relativa do ar, a radiação solar global incidente na FLONA de Caxiuanã é maior, durante todo ano, do que a incidência nos centros urbanos, seguido da cidade de Belém e da cidade de Manaus. Como as três localidades estão situadas em latitudes próximas à linha do Equador, os menores valores de radiação ocorridos na cidade de Manaus podem ser explicados pela quantidade de partículas presentes na atmosfera, proveniente dos processos industriais instalados no município. Em relação à sazonalidade, ocorre um aumento da incidência de radiação solar nos períodos secos, devido à menor nebulosidade neste período. Em seus trabalhos na cidade de Santarém e de Belém, ambas no Estado do Pará, Costa (2013, 2013b) mostra que a partição do saldo de radiação solar em calor latente e calor sensível, ocorrem menores disponibilidades energéticas para o aquecimento do ar urbano em ambientes fortemente arborizados, resultando em ambientes com menores temperaturas do ar.

A média da radiação solar global incidente na cidade de Belém no período seco foi de  $36,9\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , já para o período chuvoso este valor foi de  $32,1\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ . Na cidade de Manaus foi de  $24,8\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  no período seco e  $21,2\text{MJ.m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  no período chuvoso. Na FLONA de Caxiuanã no período seco foi de  $42,5\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  e  $35,7\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  no período chuvoso. Dados próximos foram registrados por Costa et. al, (2006a) e em outro trabalho (dos mesmos autores) ainda não publicado. Esta ampla variabilidade mensal da radiação solar global está associada, principalmente, com a nebulosidade da região, que é regulada pela Zona de Convergência Intertropical, principal sistema meteorológico regulador do tempo. De uma maneira geral, durante o período chuvoso da região houve uma redução de 13,0%, 14,5% e 16% da radiação solar global para as cidades de Belém, de Manaus e FLONA de Caxiuanã, respectivamente.

Observou-se que a amplitude máxima dentro de cada localidade variou de  $9,6\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  a  $10,1\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , e entre localidades a variação máxima foi de  $25,5\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ . A cidade de Manaus apresentou os menores valores de incidência de radiação solar global ( $18,7\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  para a mínima e  $28,3\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  para a máxima).

A variabilidade horária da radiação solar global está apresentada na figura 7. Nesse caso, por se tratar de uma média horária (não acumulativa), a unidade de medida utilizada foi  $\text{w.m}^{-2}$ .

Observou-se que a radiação solar global foi maior na FLONA de Caxiuanã e na cidade de Belém do que na cidade de Manaus. A cidade de Belém apresentou valores mínimos e máximos de  $92,5\text{W.m}^{-2}$  e  $663,4\text{W.m}^{-2}$  no período chuvoso e  $111,1\text{W.m}^{-2}$  e  $709,4\text{W.m}^{-2}$  no período seco. Na cidade de Manaus foram de  $48,7\text{W.m}^{-2}$  e  $393,7\text{W.m}^{-2}$  no período chuvoso e  $31,2\text{W.m}^{-2}$  e  $406,5\text{W.m}^{-2}$  no período seco. Já para a FLONA de

Caxiuanã, os valores foram de  $54,4\text{W.m}^{-2}$  e  $720,2\text{W.m}^{-2}$  no período chuvoso e  $74,0\text{W.m}^{-2}$  e  $635,8\text{W.m}^{-2}$  no período seco. Trabalhos recentes ainda não publicados e realizados por Costa et al. (2006b) na FLONA de Caxiuanã, também apresentaram resultados próximos aos da presente pesquisa.

Em relação à variação média horária, os máximos valores de radiação solar global ocorreram por volta das 12 horas na cidade de Belém e FLONA de Caxiuanã e por volta das 13 horas na cidade de Manaus. Como característica da região equatorial, as três localidades recebem aproximadamente 12 horas de radiação solar diariamente.

De acordo com os resultados do teste de Kruskal-Wallis, somente houveram diferenças significativas entre a cidade de Manaus e FLONA de Caxiuanã nos períodos chuvosos e secos e nas cidades de Belém e de Manaus no período seco. Como dito anteriormente, a diferença significativa da cidade de Manaus para as outras localidades está relacionada à industrialização intensa. Provavelmente não houve diferença significativa entre as cidades de Manaus e de Belém no período chuvoso devido à grande quantidade de precipitação e, conseqüentemente, a maior nebulosidade presente sobre estas cidades, o que provoca a redução da incidência da radiação solar global. Ainda assim, o p-valor foi muito próximo do limite (0,081), mostrando que a semelhança não é grande. Segundo os dados, não houve variação significativa de sazonalidade dentro das localidades estudadas.

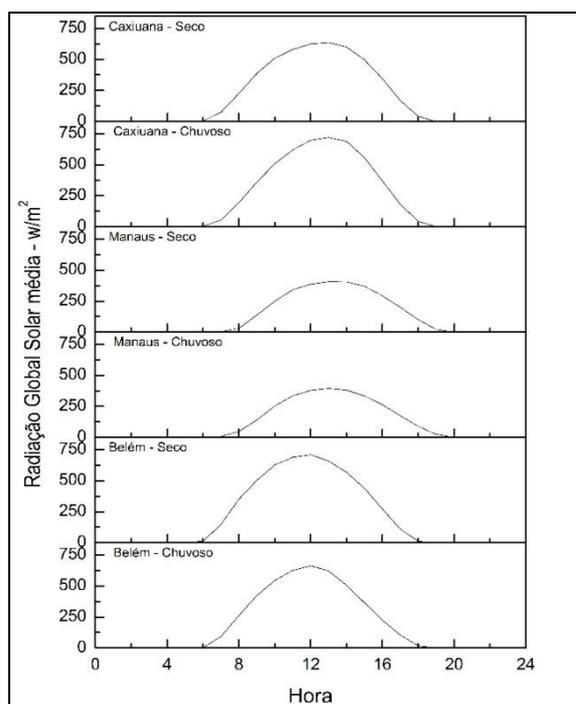


Figura 7 – Variabilidade média horária da radiação solar global nos períodos seco e chuvoso nas cidades de Belém (PA) e de Manaus (AM) e na FLONA de Caxiuanã (PA) entre os períodos de março de 2009 a dezembro de 2013.

### Índice de calor

A variabilidade média horária do índice de calor, apresentada na figura 8 mostra que não ocorreram variações bruscas entre as três localidades, no entanto, é perceptível valores menores na FLONA Caxiuanã. Esta relativa redução se deve ao fato dos menores valores de temperatura do ar ocorrerem na FLONA de Caxiuanã, conforme apresentado anteriormente. Na cidade de Belém, os valores mínimos e máximos para o índice de Calor foram de  $23,9^{\circ}\text{C}$  e  $29,2^{\circ}\text{C}$  no período chuvoso e  $23,7^{\circ}\text{C}$  e  $30,0^{\circ}\text{C}$  no período seco. Na cidade de Manaus foram de  $24,2^{\circ}\text{C}$  e  $28,6^{\circ}\text{C}$  no período chuvoso e  $24,5^{\circ}\text{C}$  e  $30,1^{\circ}\text{C}$  no período seco. Para a FLONA de Caxiuanã foram de  $25,1^{\circ}\text{C}$  e  $27,5^{\circ}\text{C}$  no período chuvoso e  $24,7^{\circ}\text{C}$  e  $28,8^{\circ}\text{C}$  no período seco. Em um trabalho realizado na cidade de

Belém por Silva Júnior et al. (2013), também foram encontrados valores indicando a redução do IC em áreas vegetadas em relação à áreas urbanizadas. Os maiores valores ocorreram entre 11 e 17 horas, com máximo por volta das 14 horas.

As médias horárias nos períodos chuvoso e seco, para a cidade de Belém, foram de 25,9°C e 26,5 °C. Para a cidade de Manaus estes valores foram de 26,3°C e 27,3°C e para a FLONA de Caxiuanã, estes foram de 25,8°C e 26,1°C. Considerando-se estes valores médios, nenhuma das três localidades estaria na zona de risco (tabela 1) para a saúde. No entanto, considerando os valores máximos, as três localidades entrariam na categoria de Cautela, onde pode ocorrer fadiga em casos de exposição prolongada e prática de atividades físicas. Silva Júnior (2012) estudando o IC na cidade de Belém, verificou que ocorreu uma grande intensificação do IC durante o período seco, podendo chegar até ao nível de cautela extrema (cerca de 35°C).

Segundo pesquisa de Costa et al. (2013), as maiores variações do IC acontecem durante o período seco, ao passo que os menores valores são observados durante a época chuvosa da região, em função dos efeitos de homogeneização das temperaturas do ar devido a atuação, neste período do ano, dos grandes sistemas meteorológicos, tais como a ZCIT.

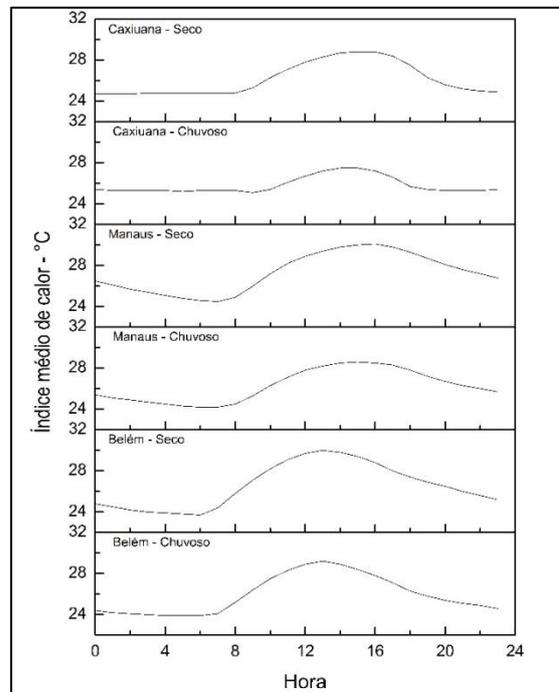


Figura 8 - Variabilidade média horária do índice de calor nos períodos seco e chuvoso nas cidades de Belém (PA) e de Manaus (AM) e na FLONA de Caxiuanã (PA) entre os períodos de março de 2009 a dezembro de 2013.

Os testes estatísticos comparativos do índice de calor, sazonalmente e entre localidades, nos períodos secos e chuvosos, estão apresentados na tabela 2. Observou-se que só houve diferença significativa entre a cidade de Manaus e a FLONA de Caxiuanã, no período seco. Entre o período seco e chuvoso na cidade de Manaus, o valor não foi significativo, porém se aproximou bastante ao limite de 0,05 de significância (0,0525). Esses resultados estão relacionados com o aumento da temperatura do ar durante o período seco na cidade de Manaus, aumentando, assim, a sensação de desconforto térmico.

#### 4. CONCLUSÕES

A partir da análise de todos os resultados obtidos, são possíveis tirar as seguintes afirmações conclusivas:

1. A hipótese nula foi rejeitada, visto que, a localização geográfica e a sazonalidade não influenciaram o padrão de variação de todos os elementos meteorológicos estudados;
2. A precipitação foi o elemento meteorológico com maior variação. Estatisticamente, só não houve diferenças significativas entre as cidades de Belém e Manaus, durante o período chuvoso e entre a cidade de Manaus e a FLONA de Caxiuanã durante o período seco, sendo que as demais análises apresentaram diferenças significativas.
3. Em relação à temperatura do ar, só houveram diferenças significativas das médias horárias deste elemento meteorológico para a cidade de Manaus entre o período seco e chuvoso, entre a cidade de Belém e a FLONA Caxiuanã durante o período chuvoso e entre a cidade de Manaus e a FLONA de Caxiuanã em ambos os períodos, chuvoso e seco. As demais comparações não deram diferenças significativas.
4. Para a umidade relativa do ar, os únicos resultados horários com diferenças não significativas foram observados entre os períodos seco e chuvoso na cidade de Belém e entre as cidades de Belém e Manaus durante o período chuvoso.
5. Já para a umidade específica do ar, somente entre as cidades de Belém e Manaus, durante o período chuvoso, não apresentaram diferenças significativas. Todas as outras situações apresentaram diferenças significativas.
6. Para a radiação solar global, os únicos resultados significativos foram entre a cidade de Manaus e a FLONA de Caxiuanã, em ambos os períodos, chuvoso e seco, e entre as cidades de Belém e Manaus durante o período seco.
7. Em relação ao conforto térmico, medido pelo índice de calor, o único resultado que apresentou diferença significativa foi entre a cidade de Manaus e a FLONA de Caxiuanã durante o período seco.

Quando analisadas conjuntamente as variabilidades meteorológicas nos diferentes locais estudados observou-se que a cidade de Manaus foi a que apresentou os maiores valores de temperatura do ar, enquanto que na FLONA Caxiuanã este elemento meteorológico apresentou os menores valores. Esse resultado reflete claramente os efeitos do crescimento urbano, evidenciando a grande importância da vegetação na regulação térmica dos ambientes Amazônicos, e, conseqüentemente, na melhoria das condições de conforto térmico dos habitantes desta região. A cidade de Belém possui valores intermediários de temperatura do ar e maiores de umidade do ar em relação à cidade de Manaus e a FLONA de Caxiuanã, sendo que os valores de temperatura do ar menores que a cidade de Manaus principalmente pela influência do efeito de brisa atuante na cidade.

#### AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao projeto CLIMURB/CNPq/ nº 473895/2007 - 2, pela disponibilização dos dados para o desenvolvimento do presente trabalho.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

AYRES, M. et al. *Bioestat 4.0: aplicações estatísticas nas áreas das Ciências Bio-Médicas*. Belém, PA: Mamirauá/CNPq, 2005. 364 p.

COHEN, J. C. P. *Um estudo observacional de Linhas de Instabilidade na Amazônia*. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 1989.

COSTA, A. C. L. DA, et al. Estudos hidrometeorológicos em uma floresta tropical chuvosa na Amazônia, *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 21, p. 283-290, 2006.

COSTA, A. C. L. DA, et al. Sazonalidade da radiação solar global, direta e difusa em uma floresta tropical chuvosa na Amazônia oriental - FLONA Caxiuanã - Pará. In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, Florianópolis, 2006a.

COSTA, A. C. L. DA, et al. Distribuição geoespacial e horária da temperatura do ar na cidade de Belém, estado do Pará, Brasil, *Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium*, v. 4 n. 1, p. 150-168, 2013.

COSTA, A. C. L. DA, et al. Variações termo-higrométricas e influências de processo de expansão urbana em cidade equatorial de médio porte, *Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research médium*, v. 4 n. 2, p. 615-632, 2013b.

COSTA, A. C. L. da. *Estudo de Variações Termo-Higrométricas de uma Cidade Equatorial devido ao Processo de Urbanização: O caso de Cidade de Belém-PA*, Tese de Doutorado, EESC-USP, São Carlos, SP, 1998. 232p.

COSTA, E. V. Medidas da umidade relativa do ar em um ambiente fechado, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 25, n. 3, p. 346-348, 2003.

FISCH, G.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Clima da Amazônia, *Climanálise-Boletim de Monitoramento e Análise Climática*, v. 10, 2006. (<http://mtc-m15.sid.inpe.br/col/cptec.inpe.br/walmeida/2004/12.15.15.11/doc/fish.html>) Acesso em 12 de janeiro de 2015.

HASTENRATH, S. Climate and Circulation of the Tropics, *Springer Science & Business Media*, v. 8, 2012.

IBGE, 2014. Cidades: 3. ([/www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1](http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1)) Acesso em 04 de maio de 2015.

MELO, A. B. C DE, et al. Zona de Convergência Intertropical do Atlântico. IN: CAVALCANTI, I. F.A et al (Ed), *Tempo e clima no Brasil*. 1<<ed. Oficina de textos, 2008. Cap. 2, p.25-41.

MENDONÇA, F. de A. *O clima e o Planejamento Urbano de Cidades de Porte Médio e Pequeno: proposição metodológica para estudo e aplicação à cidade de Londrina, PR*, Tese de Doutorado, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo São Paulo, 1994. 322p.

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

OKE, T. R. *Boundary Layer Climates*. 2ed, Routledge, 1987. 417p.

OLIVEIRA, F. M. et al. Determinação da variação no microclima de Manaus-AM por atividades antropogênicas e modulações climáticas naturais, *Acta Amazonica*, v. 38, n. 4, p. 687-700, 2008.

OLIVEIRA, L. L. *Avaliação da interceptação da precipitação pela vegetação na FLONA de Caxiuanã, Pará*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2007. 123p.

PEREIRA, A. B. et al. Estimativa da radiação solar global diária em função do potencial de energia solar na superfície do solo, *Scientia Agricola*, v. 59, n. 2, p. 211-216, 2002.

RAMOS, A. M.; SANTOS, L. A. R. DOS; FORTES, L. T. G. (Eds.). *Normais climatológicas do Brasil, 1961-1990*, 2009.

SATHLER, D. et al. As redes para além dos rios: urbanização e desequilíbrios na Amazônia brasileira, *Nova economia*, v. 19 n.1, p. 11-39, 2009.

SILVA JÚNIOR, J. A. et al. Análise da Distribuição Espacial do Conforto Térmico na cidade de Belém, PA no Período Menos Chuvoso, *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.2, p. 218-232, 2012.

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, n. 4, p. 419-428, 2013a.

SILVA JUNIOR, J. A. et al. Sazonalidade de elementos meteorológicos da área urbana e periférica na cidade de Belém, PA, *Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium*, v. 4, n. 2, p. 650-662, 2013b.

SILVA JÚNIOR, J. A. et. al. Estudo do Conforto Térmico e o Fenômeno da Ilha de Calor na cidade de Belém-PA durante o ano de 2010. In: Simpósio Internacional de Climatologia, 2011, João Pessoa, ANAIS - IV SIC, 2011.

SILVA JÚNIOR, J. A. et. al. Relações entre as percepções térmicas e índices de conforto térmico dos habitantes de uma cidade tropical na Amazônia Oriental, *Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium*, v. 3, n.2, p. 395-407, 2012a.

SOUZA, S. C. Desmatamento e clima em Alta Floresta Amazônia Matogrossense, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, MT, 2006. 92p.

STEADMAN, R. G. The Assessment of Sultriness. Part I: A temperature-Humidity Index Based on Human Physiology and Clothing Science, *Journal of Applied Meteorology*, v. 18, p. 861-873, 1979.

VIANA, S. S. M.; AMORIM, M. C. Caracterização do clima urbano em Teodoro Sampaio/SP: Uma introdução, *Sociedade & Natureza*, v. 20, p. 19-42, 2008.

Texto submetido à RBClimate na data de 12/09/2015