

ESTUDO NUMÉRICO DA ILHA DE CALOR URBANA DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO DURANTE UM VERÃO QUENTE E SECO

*Arisa Sary Umezaki¹
Flávia Noronha Dutra Ribeiro²*

RESUMO

Há previsões de que a região metropolitana de São Paulo sofrerá um aumento de 2 °C a 3 °C em sua temperatura média até o final deste século. Ambientes com temperaturas mais elevadas podem contribuir para exacerbar problemas característicos já existentes em megacidades. Dentre os problemas, destaca-se a ilha de calor urbana, que pode apresentar comportamentos diferentes sob a atuação de eventos meteorológicos de escalas maiores. Em razão disso, no presente estudo investigou-se a ilha de calor na região metropolitana de São Paulo sob a atuação da massa de ar seca e quente em janeiro de 2014, período marcado por altas temperaturas e baixa precipitação, a fim de identificar as características da ilha de calor na região. A partir de modelagem numérica, foi possível notar que a brisa do mar exerce grande influência na intensidade da ilha de calor na região metropolitana de São Paulo. A brisa, em um primeiro momento, intensifica a

¹ Programa de Pós-graduação em Sustentabilidade, Escola de Artes, Ciências e Humanidades – Universidade de São Paulo (EACH-USP). Contato: arissa.omezaki@usp.br.

² Escola de Artes, Ciências e Humanidades – Universidade de São Paulo (EACH-USP). Contato: flaviaribeiro@usp.br.

diferença de temperatura entre a área urbana e as regiões vegetadas. Porém, em momento posterior, causa o resfriamento da região, atenuando o efeito da ilha de calor. A topografia da região também exerceu influência indireta na ilha de calor por meio da propagação da brisa do mar mesmo nos dias em que esta não adentrou na região metropolitana de São Paulo.

Palavras-chave: ilha de calor urbana, região metropolitana de São Paulo, brisa do mar

NUMERICAL STUDY OF THE URBAN HEAT ISLAND OF THE METROPOLITAN REGION OF SÃO PAULO DURING A HOT AND DRY SUMMER

Abstract

There are forecasts that the Metropolitan Region of São Paulo will experience an increase of 2 °C to 3 °C in its average temperature until the end of this century and. Environments with higher temperatures can contribute to exacerbate characteristic problems already existing in megacities. Among the problems, we highlight the urban heat island that can present different behaviors under the influence of meteorological events of larger scales. Therefore, in the present study the heat island in Metropolitan Region of São Paulo under the action of the hot and dry air mass in January 2014, a period marked by high temperatures and low precipitation, was investigated in order to identify the characteristics of the heat island in the region. From numerical modeling it was possible to observe that the sea breeze exerts a great influence on the intensity of the heat island in the Metropolitan Region of São Paulo. Sea breeze, at first, intensifies the heat island is However, afterwards, it causes a cooling effect on the region, attenuating the heat island intensity. The topography of the region also exerted an indirect influence on the heat island through the propagation of the sea breeze even on the days when it did not enter the Metropolitan Region of São Paulo.

Keywords: urban heat island, metropolitan region of São Paulo, sea breeze

5.1 INTRODUÇÃO

Estima-se que a região metropolitana de São Paulo sofrerá uma elevação de 2 °C a 3 °C em sua média de temperatura até o fim do século. A tendência de ambientes mais quentes projeta possíveis impactos negativos na intensificação das ilhas de calor, que podem contribuir com episódios de precipitações

extremas (FREITAS et al., 2007; VEMADO; PEREIRA, 2016). Isso é particularmente importante na região metropolitana de São Paulo, pois sua expansão urbana associada a potenciais impactos negativos causados por precipitações extremas tende a piorar seus problemas característicos de megacidade e aumentar sua vulnerabilidade (NOBRE et al., 2011). Maiores vulnerabilidades associadas a perdas humanas localizam-se em bairros periféricos – a cidade de São Paulo possui 2,7 milhões de pessoas vivendo em favelas e habitações precárias. Esses locais são significativas áreas de risco de escorregamento que, por sua vez, é a causa do maior número de mortes em acidentes naturais na região (NOBRE et al., 2011).

A intensidade da ilha de calor é definida como a diferença de temperatura entre uma área urbana e uma não urbana, mas também pode ser determinada por meio do aumento do calor sensível e da diminuição do calor latente no ambiente (FERREIRA et al., 2013). Diferentes fatores contribuem para que áreas urbanizadas apresentem temperaturas mais elevadas, dando origem às ilhas de calor, sendo um deles a maior presença de prédios e outros elementos que armazenam mais calor. As construções urbanas costumam refletir os raios solares vindos do céu e emitir ondas longas em um mecanismo de múltiplas reflexões, fazendo o calor aumentar na atmosfera urbana (ARNFIELD, 2003). Outra razão é a taxa de evapotranspiração tipicamente mais baixa nas cidades devido à impermeabilização do solo e aos sistemas de drenagem, que removem a maior parte da água das chuvas, além da pouca presença de vegetação. Com isso, a maior parte da radiação solar absorvida é utilizada para aquecer a terra e o ar em forma de calor sensível em vez de ser utilizada na evaporação como calor latente (BARROS; LOMBARDO, 2016).

Além dos fatores de pequena escala descritos, fenômenos de média e grande escalas podem interferir fortemente na intensidade da ilha de calor. Um fenômeno de mesoescala típico que ocorre diariamente é a chegada da brisa do mar sobre a região metropolitana de São Paulo, trazendo ar mais frio e úmido do oceano durante a sua passagem (RIBEIRO et al., 2015; FREITAS et al., 2007). Em condições de grande escala, um efeito que poderia aumentar o contraste de temperaturas seriam situações em que os ventos de escala sinótica estão fracos, sendo desfavoráveis para a mistura do ar das cidades com o do ambiente rural (FREITAS; SILVA DIAS, 2005).

Essa condição sinótica foi presenciada durante o verão austral de 2014, causando o aumento significativo da temperatura do ar de superfície, diminuição da umidade do ar e queda na precipitação em parte do Brasil (RIBEIRO et al.,

2015). A zona de convergência do Atlântico Sul (ZCAS), banda que se estende da Amazônia até a região sudeste do Brasil, é um sistema convectivo responsável por trazer precipitação para a região durante o verão austral. Essa banda diagonal de nuvens convectivas sofre oscilações em sua posição, posicionando-se sobre a região de São Paulo. Entretanto, no verão austral de 2014 houve pouca presença da ZCAS, contribuindo para que o estado de São Paulo presenciasse déficit de precipitação, principalmente entre dezembro de 2013 a março de 2014 (COELHO; CARDOSO; FIRPO, 2016).

Durante o ano de 2014, São Paulo registrou recordes de temperatura máxima do ar nos meses de janeiro e fevereiro e depois, registrando 37,2 °C no dia 17 de outubro (IAG-USP, 2014). Além disso, nesse ano foi presenciada a maior anomalia de precipitação negativa entre 1981-2010: somente 47,8% de precipitação foi observada em relação à média climatológica, sendo que a precipitação observada em janeiro de 2014 (127,2 mm) foi o menor valor observado para o mês considerando a série histórica de 1981-2015 (COELHO; CARDOSO; FIRPO, 2016). O mês de janeiro ainda apresentou radiação solar líquida recorde, ou seja, o maior valor registrado desde 1961 (início das medições dessa variável), com 732,5 MJ/m², enquanto a média climatológica é 602,2 MJ/m² (IAG-USP, 2014).

Ribeiro et al. (2015) investigaram a ilha de calor urbana na região metropolitana de São Paulo no verão de dezembro de 2013 a fevereiro de 2014 e constataram que a intensidade da ilha de calor do verão de 2014 era maior (pelo menos em um fator de 2) que a média de intensidade calculada para anos anteriores, sendo principalmente modulada pela radiação solar líquida.

Maiores intensidades da ilha de calor são preocupantes não somente pelo aumento de casos de precipitações extremas, mas também foram associadas a maiores ocorrências de casos de dengue (ARAÚJO, et al., 2015), aumento no consumo de energia em aparelhos de refrigeração (DAVIS; GERTLER, 2015) e, em alguns casos, na geração de padrões de circulação do ar que promovem o acúmulo de poluentes em áreas urbanas (FREITAS; SILVA DIAS, 2005).

Dessa forma, a investigação da ilha de calor é imperativa para o melhoramento de ambientes urbanos. Isso deve ser feito por meio da identificação de seus potenciais impactos e desenvolvimento de estratégias de adaptação e mitigação, principalmente em áreas tropicais onde essas ações permanecem escassas (BARROS; LOMBARDO, 2016).

Visto isso, o objetivo deste estudo foi analisar a intensidade da ilha de calor urbana na região metropolitana de São Paulo sob influência sinótica da massa de ar quente e seca atuante em janeiro de 2014 por meio de modelagem numérica.

5.2 METODOLOGIA

Nesta seção, primeiramente estão descritas características da região metropolitana de São Paulo. Logo em seguida, estão detalhadas as configurações utilizadas no modelo empregado, além de apresentar explicações sobre como a intensidade da ilha de calor foi calculada. Por fim, estão descritos os testes e estações meteorológicas de superfície utilizados na validação dos resultados gerados pelo modelo.

5.2.1 Região metropolitana de São Paulo

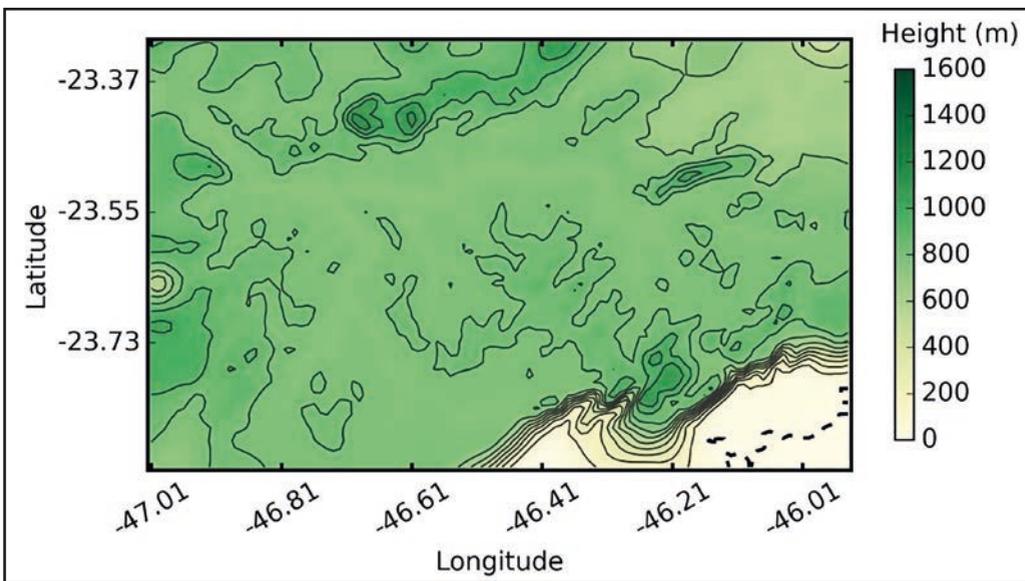
A região metropolitana de São Paulo abrange 39 municípios do estado de São Paulo, ocupando uma área de 7.947 km². Em 2010, abrigava uma população de 19.683.975 pessoas (47,7% do total estadual), com densidade demográfica de 2.476,82 hab./Km² e PIB de R\$ 701,84 bilhões (56,6% do total estadual) em um ambiente 99% urbanizado (IPEA, 2014). A mancha urbana da região metropolitana de São Paulo estende-se mais de 80 km no sentido leste a oeste e 40 km de norte a sul, onde 20 dos seus 39 municípios possuem áreas urbanas conurbadas quase totalmente impermeabilizadas próximas à bacia do Alto Tietê e seus maiores afluentes, Rio Pinheiros e Rio Tamanduateí (NOBRE et al., 2011). A região apresenta taxas de crescimento demográfico expressivas, principalmente em suas fronteiras, correspondentes a cidades-dormitório e periferias, que avançam em direção aos seus últimos remanescentes vegetais naturais (RAIMUNDO, 2006). Dessa forma, a cobertura vegetal existente no município de São Paulo basicamente consiste em fragmentos de vegetação natural secundária, correspondentes a floresta ombrófila densa, floresta ombrófila densa altomontana, floresta ombrófila densa sobre turfeira e campos naturais. Estes se apresentam em porções mais preservadas ao extremo sul da Serra da Cantareira (localizada ao norte do município) e em manchas isoladas como áreas de proteção ambiental. Concentrada em porções menores, há vegetação em áreas urbanizadas (restrita a parques e praças municipais), uma escassa arborização viária e espécimes isolados em terrenos particulares (SÃO PAULO, 2004)

O clima da cidade de São Paulo é típico das regiões subtropicais brasileiras, caracterizado por verões úmidos, de dezembro a março. O máximo das médias diárias de temperatura mensais e máximo valor de precipitação mensal acumulada ocorrem no mês de fevereiro, com temperatura de 22,5 °C e 255 mm precipitados. Em contrapartida, possui invernos secos correspondentes aos meses de junho a agosto, em que a média mínima de temperatura diária mensal se dá

em julho (16 °C) e o menor valor de precipitação acumulada, em agosto (35 mm) (OLIVEIRA et al., 2002).

A topografia da região metropolitana de São Paulo é dominada por morros, variando de 650 m a 1.200 m acima do nível do mar (SILVA; LONGO; ANDRADE, 2017), onde o município de São Paulo encontra-se a 60 km de distância do Oceano Atlântico (OLIVEIRA; BORNSTEIN; SOARES, 2003). Dessa forma, a região é delimitada por cadeias de montanhas: ao norte pela Serra da Mantiqueira, ao sul pela Serra do Mar e a oeste encontra-se o Pico do Jaraguá (SILVA; LONGO; ANDRADE, 2017), como pode ser visto na Figura 5.1.

Figura 5.1 – Topografia da região metropolitana de São Paulo (o eixo x mostra a longitude em graus, e o eixo y mostra a latitude em graus).



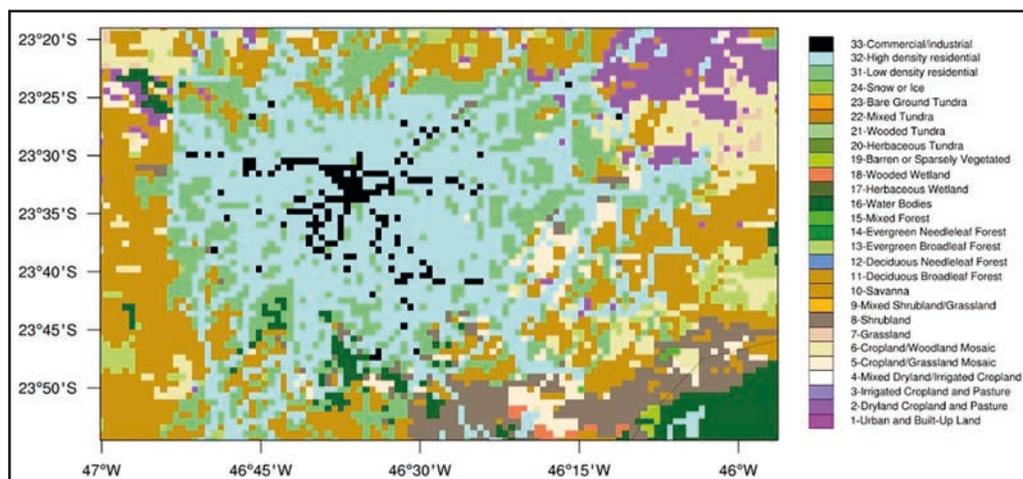
Efeitos combinados de posição geográfica, intensidade relativa do semiestacionário Anticiclone Atlântico Sul e sistemas de baixa pressão continental controlam a variação sazonal dos ventos de superfície na cidade de São Paulo. Assim, induzem ventos de superfície de norte e nordeste durante o verão e de nordeste e leste no inverno. Entretanto, esse padrão é frequentemente afetado em razão da brisa do mar no verão e sistemas de escala sinótica no inverno, como frentes frias. Visto isso, os três fatores de mesoescala que mais influenciam a circulação sobre a cidade de São Paulo são: circulação vale-montanha, brisa do mar e efeitos urbanos, como rugosidade do terreno, construções que produzem efeito de barreira e ilha de calor (OLIVEIRA; BORNSTEIN; SOARES, 2003).

5.2.2 Simulações

O modelo Advanced Research WRF (Weather Forecasting and Research), Versão 3.8.1, foi empregado a fim de se realizarem simulações atmosféricas (SKAMAROCK et al., 2008). O modelo utilizou a opção chamada *single-layer urban canopy model* (SLUCM) para tratar a superfície urbana e sua interação com a atmosfera (CHEN et al., 2011). Foram usadas 3 grades aninhadas: a exterior, com espaçamento horizontal de 9 km e 60 x 60 pontos de grade, a intermediária, com espaçamento horizontal de 3 km e 79 x 61 pontos de grade, e a interna, com resolução horizontal de 1 km e 109 x 67 pontos de grade. O espaçamento vertical tem 38 níveis irregularmente espaçados, mas com menor espaçamento próximo à superfície.

Todas as simulações utilizaram as seguintes parametrizações: (i) esquema de tratamento da camada limite de YSU; (ii) dados meteorológicos e de superfície iniciais e de fronteira da reanálise do ERA-Interim; (iii) topografia do satélite *Shuttle Radar Topography Mission* (JARVIS et al., 2008), com 3 arco-segundos de resolução (~90 m); (iv) esquema de tratamento da superfície de Noah com 4 camadas de solo; e (v) temperatura da superfície do mar atualizada a cada 6 horas com dados de reanálise da ERA-Interim. Os dados de entrada do modelo para a classificação do tipo de uso do solo na grade interior podem ser vistos na Figura 5.2.

Figura 5.2 – Tipos de uso de solo na região metropolitana de São Paulo utilizados como dados de entrada do modelo (o eixo x mostra a longitude em graus, e o eixo y mostra a latitude em graus).



A partir dessas configurações, o modelo simulou dados de temperatura do ar próxima à superfície e radiação solar líquida em médias horárias para o período de janeiro de 2014 em 5 pontos escolhidos na região metropolitana de São Paulo. Quatro dos pontos escolhidos foram localizados em regiões cercadas por vegetação, portanto foram considerados como áreas rurais, sendo: ponto norte (-23.3387° , -046.5044°), ponto sul (-23.8101° , -046.4283°), ponto leste (-23.5616° , -046.0395°) e ponto oeste (-23.643° , -046.9511°). Um quinto ponto foi estabelecido no centro da cidade de São Paulo e considerado como área urbana, aqui chamado de ponto centro (-23.5334° , -046.6169°). Os pontos localizados em diferentes pontos cardeais foram escolhidos para melhor captar elementos que poderiam interferir na circulação atmosférica de forma mais distribuída, como pode ser visto na Figura 5.3, indicando a localização dos pontos na região metropolitana de São Paulo. Isso posto, a fim de se medir a intensidade da ilha de calor, foram calculadas as diferenças entre as temperaturas médias horárias do ponto considerado urbano e dos pontos considerados rurais (temperatura do ponto centro – temperatura de ponto rural). A partir disso, foram realizadas algumas médias e gerados gráficos para a análise dos dados.

Figura 5.3 – Localização dos diferentes pontos na região metropolitana de São Paulo (os marcadores em amarelo representam a localização dos pontos escolhidos para as simulações, e tons de marrom e cinza representam a mancha urbana da região metropolitana de São Paulo).

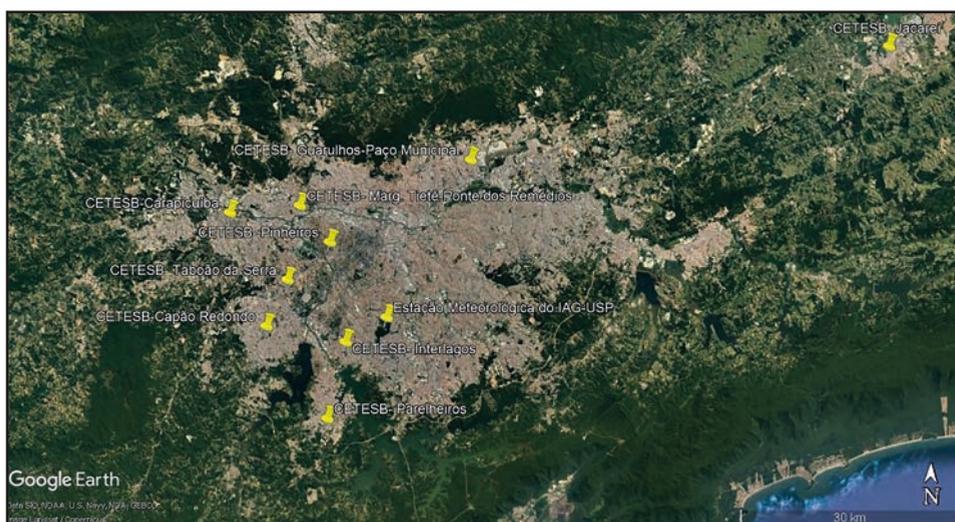


5.2.3 Validação de dados

A fim de validar os dados produzidos pelo modelo nas simulações do mês de janeiro de 2014, os dados simulados de temperatura do ar próximos à superfície foram comparados aos dados observados de diferentes estações meteorológicas de superfície por meio de testes de correlação linear, erro médio quadrático, erro sistemático (*bias*), índice de concordância (*index of agreement*) e taxa de acerto (*hit rate*).

Dessa forma, foram usados dados de temperatura do ar próxima à superfície de estações meteorológicas pertencentes à Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) espalhadas na região metropolitana de São Paulo. Utilizaram-se dados das estações de Capão Redondo, Carapicuíba, Parelheiros, Guarulhos – Paço Municipal, Interlagos, Marginal Tietê – Ponte dos Remédios, Pinheiros e Taboão da Serra. Além das estações meteorológicas citadas, dados da Estação Meteorológica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG-USP) também foram coletados para a validação das simulações. Posto isso, foram realizadas simulações para gerar dados de temperatura do ar próxima à superfície com a localização das estações meteorológicas citadas e, então, os dados simulados foram comparados com os respectivos dados observacionais pertencente a cada estação meteorológica. A localização das estações meteorológicas que tiveram dados de temperatura utilizados na validação das simulações está representada na Figura 5.4.

Figura 5.4 – Localização das estações meteorológicas utilizadas para a validação de dados (os marcadores em amarelo representam a localização das estações meteorológicas, e tons de marrom e cinza representam a mancha urbana da região metropolitana de São Paulo).



5.3 Resultados

Abaixo estão apresentados os resultados do estudo divididos em subseções, sendo a primeira subseção referente à apresentação dos valores dos testes de validação para os resultados gerados pelo modelo. Na próxima subseção estão descritos os resultados da análise do comportamento da temperatura na região metropolitana de São Paulo em janeiro de 2014; por último, encontra-se uma descrição da radiação solar dos mesmos local e período compreendidos.

5.3.1 Validação

Os testes aplicados, no geral, apresentaram resultados satisfatórios com valores que não se distanciaram muito entre as simulações feitas para as diferentes estações, como pode ser visto na Tabela 5.1, com valores dos testes para as diferentes estações meteorológicas. Dessa forma, considerou-se que o modelo apresentou desempenho satisfatório, sendo adequado para o estudo.

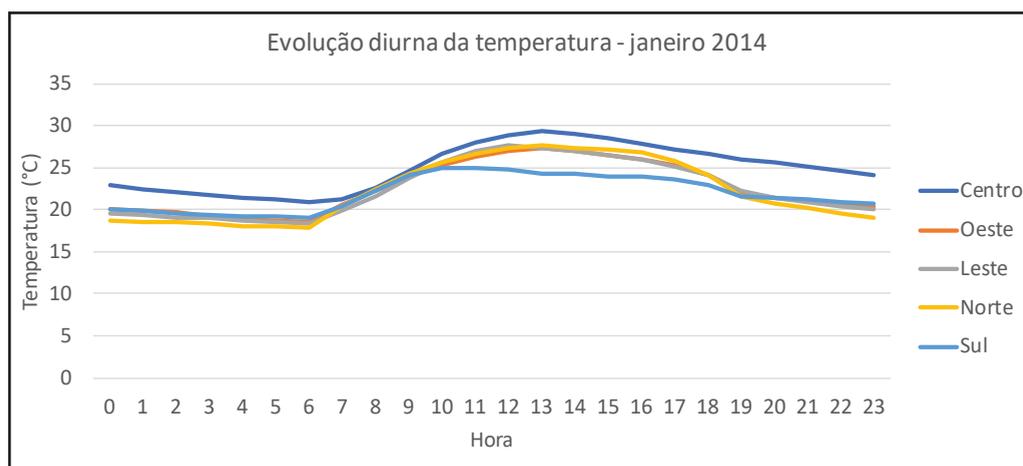
Tabela 5.1 – Valores dos testes de validação para diferentes estações meteorológicas para o mês de janeiro de 2014

Estação	R ²	Erro médio quadrático (MSE)	Raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE)	Erro sistemático (BIAS)	Índice de concordância (IOA)	Taxa de acerto (HR)
Capão Redondo	0,62	6,58	2,56	-0,48	0,87	0,56
Carapicuíba	0,67	5,67	2,38	-0,70	0,89	0,62
Grajaú - Parelheiros	0,63	7,48	2,73	0,14	0,87	0,51
Guarulhos-Paço Municipal	0,67	5,86	2,42	-0,50	0,90	0,62
Interlagos	0,62	5,99	2,45	-0,51	0,99	0,62
Jacareí	0,70	8,68	2,95	-1,39	0,89	0,55
Marginal Tietê	0,62	25,88	5,09	-1,03	0,99	0,62
Pinheiros	0,64	8,21	2,86	-1,23	0,86	0,57
Taboão da Serra	0,64	6,59	2,57	-0,93	0,87	0,59

5.3.2 Temperatura

A partir de medidas de temperatura do ar próximas à superfície simuladas pelo modelo foram feitas médias horárias dos diferentes pontos (centro, oeste, leste, norte e sul), compreendendo todo o mês de janeiro de 2014. Como pode ser visto na Figura 5.4, as médias horárias de temperatura do ponto centro permaneceram mais elevadas em relação às médias horárias de temperatura dos outros pontos durante a maior parte do dia. As temperaturas dos pontos oeste, leste e norte permaneceram sem muitas diferenças entre si, enquanto o ponto sul apresentou médias de temperaturas menores em relação aos outros pontos durante o período diurno. Assim, as respectivas temperaturas médias para o mês de janeiro de 2014 como um todo foram de 24,95 °C para o ponto centro; 22,61 °C para o ponto oeste; 22,47 °C para o ponto leste; 22,28 °C para o ponto norte; e 21,95 °C para o ponto sul, com temperaturas mais amenas durante as primeiras horas da manhã e mais elevadas durante o período da tarde.

Figura 5.4 – Evolução diurna da temperatura do ar próxima à superfície simulada para os pontos centro, oeste, leste, norte e sul durante o mês de janeiro de 2014.

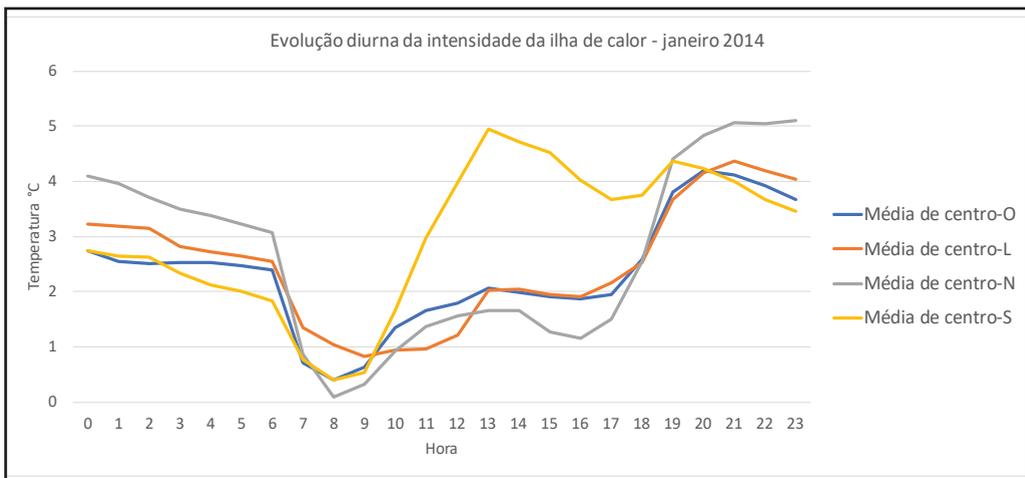


Visto isso, utilizando-se dos dados de temperatura do ar próximas à superfície simuladas pelo modelo, foram calculadas médias horárias das diferenças de temperatura do ponto centro em relação aos demais, representando a evolução diurna da intensidade da ilha de calor para o mês de janeiro de 2014 (Figura 5.5). Nota-se que a intensidade da ilha de calor medida para os pontos oeste, leste e norte apresentaram padrões semelhantes, mostrando-se mais pronunciada durante a noite. A intensidade da ilha de calor aumenta durante o final do período da tarde, às 18h, chegando à sua máxima no período noturno, às 21h, quando

ocorre uma diminuição gradual de sua intensidade até as 6h. No horário do nascer do sol, a intensidade da ilha de calor sofreu uma diminuição mais acentuada, chegando à sua mínima entre 8h e 9h; logo, voltou a aumentar gradualmente até o período da tarde, das 10h às 12h. Durante a tarde, a intensidade da ilha de calor se manteve estável (entre 13h e 17h), exceto pelo ponto norte, que apresentou uma leve queda (entre 15h e 16h).

Apesar de o ponto sul ter mostrado comportamento semelhante aos demais pontos, com intensidade da ilha de calor pronunciada durante a noite e mínima durante a manhã, apresentou um pico positivo bem evidenciado no período da tarde (entre 13h e 14h). A partir das 11h, a intensidade da ilha de calor em relação ao ponto sul aumenta de forma proeminente, atingindo um pico médio de quase 5 °C às 13h, enquanto os outros pontos apresentam intensidade média de cerca de 2° C nesse mesmo horário. Após as 13h, a intensidade da ilha diminuiu e voltou a aumentar de novo às 18h, com comportamento semelhante aos outros pontos.

Figura 5.5 – Evolução diurna da intensidade da ilha de calor em relação ao ponto centro para os pontos oeste, leste, norte e sul a partir de dados simulados para o mês de janeiro de 2014.

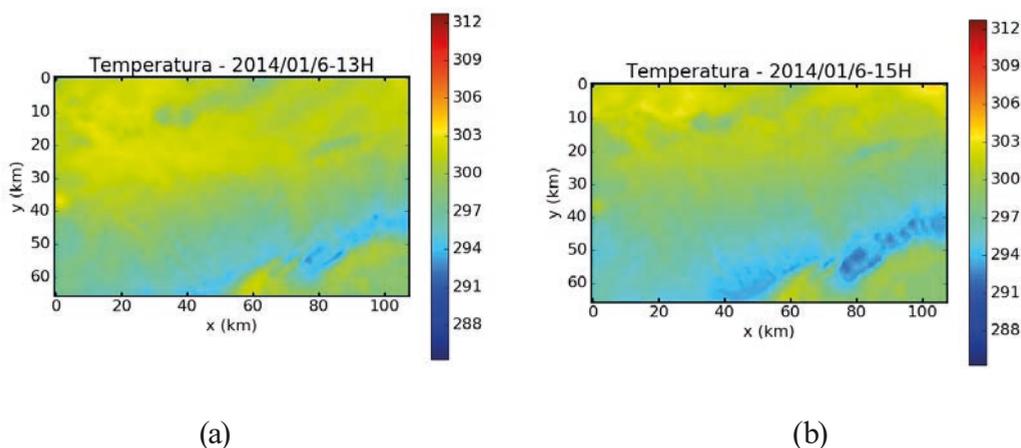


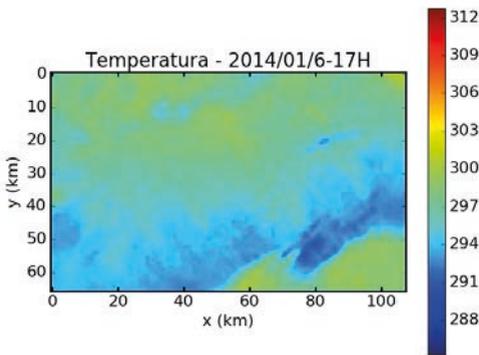
Houve determinados dias em que ocorreram casos de *urban cool island* (não mostrado), indicando que as temperaturas do ponto centro (urbanizado) registraram temperaturas menores que os pontos oeste, leste, norte e sul (rurais). Esses eventos ocorreram em dias aleatórios durante a madrugada e as primeiras horas da manhã, com pico entre 8h e 9h e diferenças de temperaturas variadas, mas geralmente menos pronunciadas que as ilhas de calor.

A fim de avaliar a influência da brisa do mar na região metropolitana de São Paulo foram gerados gráficos representando o campo de temperatura da região por meio de simulações feitas pelo modelo. A passagem da brisa do mar pela região metropolitana de São Paulo pode ser vista na Figura 5.6, que mostra gráficos de temperatura horárias para o dia 6 de janeiro de 2014, quando houve um pico na intensidade da ilha de calor de 7,48 °C em relação aos pontos centro e sul às 13h. A aproximação da frente de brisa do mar, vinda do sudeste trazendo ar mais frio e úmido do oceano, pode ser notada pelos tons de azul (menores temperaturas representadas por cores mais frias).

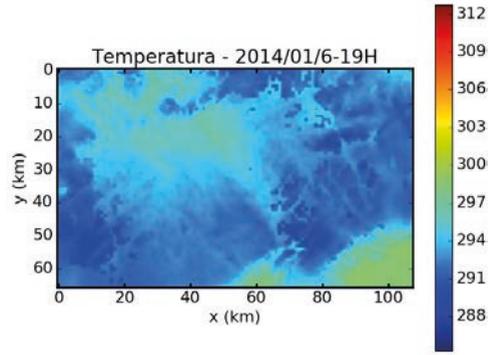
Na Figura 5.6 (a) observou-se a frente de brisa às 13h, próxima à costa, vinda do sudeste, localizada ao sul da região metropolitana de São Paulo. Às 15h (Figura 5.6 (b)) houve intensificação e propagação da frente de brisa para as partes sul e leste da região metropolitana de São Paulo; logo, às 17h (Figura 5.6 (c)), chega também às partes oeste e centro da região. Por fim, às 18h (não mostrado), continuou se propagando, atingindo locais mais ao norte até as 19h (Figura 5.6 (d)), quando não foi mais possível identificar visualmente a frente de brisa. Porém, observou-se a formação de uma região mais quente ao centro da região metropolitana de São Paulo na Figura 5.6 (d), que pode ser ilustrada como a formação de uma ilha de calor.

Figura 5.6 – Gráficos do campo de temperatura do ar próxima à superfície (em K) simulados pelo modelo indicando a passagem da brisa do mar pela região metropolitana de São Paulo no dia 6 de janeiro de 2014, nos quais: (a) representa temperaturas às 13h; (b), às 15h; (c), às 17h; e (d), às 19 h. Tons mais quentes representam temperaturas mais altas, e tons mais frios, temperaturas mais baixas.





(c)



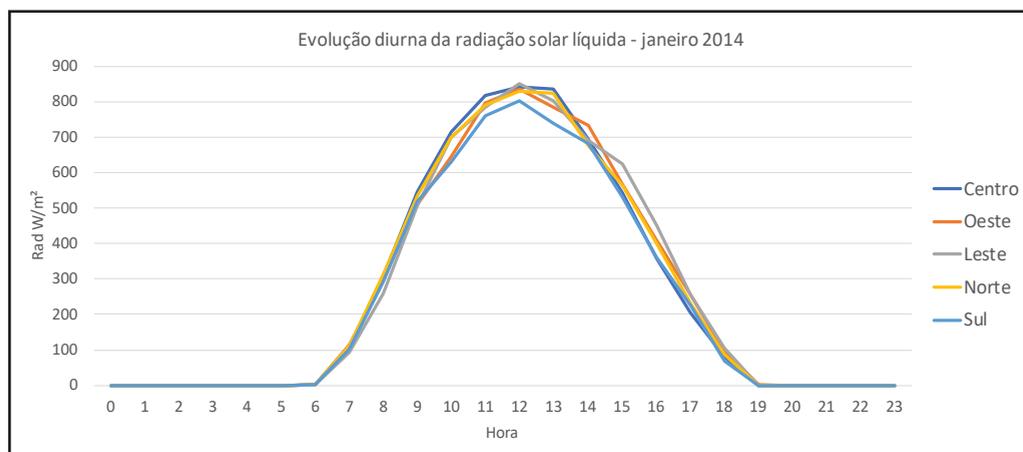
(d)

5.3.3 Radiação solar

Em tentativa de identificar relação entre a quantidade de radiação líquida e a temperatura na região metropolitana de São Paulo foram simuladas pelo modelo médias de radiação solar líquida nos pontos centro, oeste, leste, norte e sul (os mesmos em que foram simulados dados de temperatura) durante janeiro de 2014. Para isso, foram tiradas médias mensais de radiação solar líquida do mês de janeiro de 2014 como um todo, dos diferentes pontos, obtendo-se os seguintes valores: ponto centro de 252,06 W/m²; ponto oeste de 252,06 W/m²; ponto leste de 255,25 W/m²; ponto norte de 252,63 W/m²; e ponto sul de 237,93 W/m². Visto isso, observou-se que a quantidade de radiação solar líquida variou pouco entre os diferentes pontos, exceto no ponto sul, onde foram registrados os menores valores.

Médias de radiação solar líquida horárias também foram calculadas para o mesmo período, a fim de se observar sua evolução diurna. Dessa forma, como mostra a Figura 5.7, foi visto que em todos os pontos houve comportamento semelhante no período noturno, quando não há radiação solar líquida no intervalo entre 19h e 6h. Do nascer do sol, às 6h, até as 9h, as diferenças de radiação líquida entre os diferentes pontos são muito semelhantes; porém, no intervalo entre 10h e 17h surgem algumas variações mais visíveis que são suavizadas até o anoitecer. Dentre todos os pontos, o ponto sul foi o local que apresentou menor radiação líquida durante a maior parte do período com luz solar; nele, as variações foram maiores entre 12h e 14h, sendo que às 13h observou-se a diferença horária máxima de 100 W/m² entre o ponto sul e ponto centro.

Figura 5.7 – Evolução diurna da radiação solar líquida simulada para o mês de janeiro de 2014.



5.4 DISCUSSÃO

Por meio das análises de dados de temperatura do ar próxima à superfície e radiação solar líquida produzidos pelo modelo, destacamos os seguintes resultados:

- (1) Ocorreram casos de *urban cool island* durante a madrugada e primeiras horas da manhã em alguns dias de janeiro de 2014.
- (2) Houve maior intensidade da ilha de calor urbana durante o período noturno.
- (3) O ponto sul apresentou menor quantidade de radiação líquida média total e média horária em janeiro de 2014, com maior discrepância às 13h em relação aos outros pontos.
- (4) Houve um pico positivo na intensidade da ilha de calor durante a tarde somente no ponto sul.
- (5) A temperatura média para o mês de janeiro de 2014 foi maior no ponto centro e menor no ponto sul.

Dados os resultados, estes são discutidos a seguir, na ordem em que foram apresentados, por meio da comparação com outros trabalhos encontrados na literatura.

Em relação ao resultado (1), Ribeiro et al. (2015), em estudo da ilha de calor com dados observacionais da região metropolitana de São Paulo, identificou a ocorrência de uma *urban cool island* durante a manhã, com intensidade

máxima às 9h. A partir desse horário, esta diminuiu sua intensidade até que houvesse a transformação de um cenário de *urban cool island* para a formação de uma ilha de calor às 12h. Esse fenômeno também foi descrito no trabalho de Ferreira, Oliveira e Soares (2013), que, por meio de dados observacionais de temperatura do ar, verificaram um padrão semelhante de *urban cool island* para a cidade de São Paulo. Os autores atribuíram a possibilidade de ocorrência desse fenômeno a uma propriedade termal chamada admitância térmica. Esta pode ser definida como a aptidão de uma superfície em armazenar ou liberar calor, expressando a mudança de temperatura produzida pela mudança de um dado fluxo de calor (OKE, 2009). Os valores de admitância térmica nas áreas urbanas são maiores que os rurais, pois os materiais que constituem o cânion urbano geralmente armazenam ou liberam energia a menores taxas que solos em áreas rurais. Desse modo, nas primeiras horas da manhã o aquecimento solar direto favorece rápidos aumentos de temperatura em áreas rurais devido à sua baixa admitância térmica, experimentando aquecimento ligeiramente maior em comparação a áreas urbanas. Assim, uma rápida diminuição da intensidade da ilha de calor é vista pela manhã, produzindo, em alguns casos, uma *urban cool island* (FERREIRA; OLIVEIRA; SOARES, 2013).

Semelhante ao resultado (2), a evolução diurna da intensidade da ilha de calor com maiores intensidades durante o período noturno e menores intensidades no período diurno foram encontrados no estudo de Ribeiro et al. (2015). Isso poderia ser atribuído ao potencial de as construções das áreas urbanas armazenarem energia recebida dos raios solares durante o dia e o liberarem durante a noite, sugerindo grande parte de influência da radiação solar líquida na intensidade da ilha de calor. Além disso, a máxima de intensidade do fluxo de calor antropogênico que ocorre durante o dia não aparentou ser forte o suficiente para sustentar a máxima ilha de calor durante a noite, inclusive no inverno, quando representa cerca de 15% do valor diário da radiação líquida de superfície (FERREIRA; OLIVEIRA; SOARES, 2011). O potencial de armazenamento de energia solar em construções urbanas pode ser especialmente importante em episódios como o verão de 2014, em que sistemas de alta pressão impedem a formação de nuvens e favorecem o aumento de radiação líquida. Dessa forma, em condições sinóticas de alta pressão há a possibilidade de ocorrer efeito de aumento da liberação de calor para a atmosfera durante a noite e/ou estender a duração de condições de calor em cidades (SUN et al., 2017).

A associação entre a influência da radiação solar líquida no campo de temperatura da região metropolitana de São Paulo pode ser considerada ao analisar

os resultados (3) e (4), em que o ponto sul registrou menores valores de radiação líquida e temperatura em relação aos outros pontos. Ribeiro et al. (2018) identificaram uma influência indireta da topografia da região metropolitana de São Paulo na intensidade de sua ilha de calor, mesmo em dias em que a brisa do mar não se propaga pela cidade (mais ao centro da região metropolitana). A brisa do mar vem do oceano em direção à região metropolitana de São Paulo (de sudeste) resfriando adiabaticamente ao subir a escarpa, chegando ao alto da Serra do Mar, localizada próxima ao ponto sul adotado por esse estudo. Segundo os autores, o resfriamento adiabático fez com que o ar se tornasse mais frio e úmido, tornando essa região do planalto sempre mais fria e mais frequentemente coberta por nebulosidade, podendo servir como uma justificativa para os menores valores de radiação solar líquida do ponto sul no presente estudo. Infere-se que essa menor quantidade no ponto sul influencie as temperaturas mais baixas na região, criando um contraste maior de temperatura entre o planalto ao sul (mais frio) e o centro da região metropolitana de São Paulo (mais quente), situação em que se intensifica a ilha de calor.

Em Ribeiro et al. (2015) a influência da chegada da brisa do mar foi investigada em um estudo de caso do dia 6 de agosto de 2013, quando se registrou às 13h a diferença média de 10,5 °C entre uma estação suburbana localizada ao sul e uma urbana mais ao centro da região metropolitana de São Paulo. Simultaneamente, notou-se aumento de umidade relativa do ar conforme a mudança de direção do vento de nordeste para sudeste, características típicas que indicam a passagem da brisa do mar. Visto isso, pode-se inferir que o motivo da intensidade da ilha de calor medida para o ponto sul no presente estudo ter se apresentado mais pronunciado durante o período da tarde, em vez de durante a noite, como nos outros pontos, possa ser a influência da brisa do mar. Inclusive, os horários em que se registraram as maiores diferenças na radiação solar líquida e intensidade da ilha de calor entre os pontos centro e sul coincidem (perto das 13h).

Por isso, pressupõe-se que nos dias em que a brisa do mar chegou a região metropolitana de São Paulo, em um primeiro momento, quando a brisa alcançou o ponto sul (vinda de sudeste), fez sua temperatura cair, criando um grande contraste em relação ao ponto localizado no centro que ainda não havia sofrido influência de sua chegada, encontrando-se, portanto, mais quente. Já em um segundo momento, quando a brisa chegou ao ponto centro (na parte densamente urbanizada da região metropolitana de São Paulo), a intensidade da ilha de calor calculada a partir do ponto sul diminui, indicando que a brisa resfriou a

área urbana, diminuindo a intensidade da ilha de calor. Vemado e Pereira Filho (2016) observaram que a circulação da brisa do mar interage com a circulação produzida pela ilha de calor na região metropolitana de São Paulo, causando o desenvolvimento de células de convecção mais profundas sobre a área mais densamente urbanizada. Essa interação poderia contribuir com o aumento de episódios de precipitação mais fortes em uma região densamente ocupada, causando prejuízos econômicos e sociais.

Por fim, alguns fatores descritos anteriormente poderiam justificar o resultado (5), em que a temperatura média do ponto centro apresentou-se mais elevada, e a do ponto sul, menos elevada em relação às outras estações. Silva, Longo e Andrade (2017), por meio de modelagem, apontaram fatores dominantes que poderiam explicar grande parte da variação total da temperatura na região metropolitana de São Paulo. Foi observado que 67% da variação total de temperatura foi atribuída a mecanismos de circulação, representando forte influência da brisa do mar, com ventos de sudeste na parte sul da região, enquanto 24% da variância total foi associada à urbanização por meio do calor armazenado nas áreas urbanas e outras fontes antropogênicas. Visto isso, pressupõe-se que a brisa do mar seja forte influência nos padrões de temperatura mais baixa na região sul, e que o calor armazenado nas estruturas urbanas seja um dos principais motivos para que o ponto centro possua temperatura média mais alta.

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A tendência de aumento de temperatura na região metropolitana de São Paulo tende a agravar os problemas típicos de megacidades já existentes na região, dentre eles a intensificação da ilha de calor. Em razão disso, o presente estudo teve o objetivo de investigar a ilha de calor na região metropolitana de São Paulo, utilizando-se o modelo Advanced Research WRF (Versão 3.8.1) para simular dados de temperatura e radiação solar líquida em janeiro de 2014.

Assim, constatou-se que a brisa do mar exerce grande influência na ilha de calor da região metropolitana de São Paulo, contribuindo para sua intensificação em relação à região sul, principalmente no período da tarde. A brisa do mar vinda de sudeste atinge, primeiramente, o sul da região metropolitana de São Paulo, fazendo sua temperatura cair e, conseqüentemente, aumentando o contraste de temperaturas em relação à região central, que no momento ainda não sofreu a influência da brisa. Porém, em momento posterior, a brisa do mar chega ao centro da região metropolitana de São Paulo, causando seu resfriamento e, simultaneamente, diminuindo a intensidade da ilha de calor. Visto

isso, a brisa do mar causa, em um primeiro momento, a intensificação da ilha de calor na região durante o começo do período da tarde, que, depois, perde intensidade ao seu final.

A topografia entre o litoral e a região metropolitana de São Paulo mostrou exercer influência indireta na intensidade da ilha de calor na região, pois desempenha papel na propagação da brisa do mar, que, por sua vez, resfria, formando uma cobertura de nuvens mais densa na região sul. Dessa forma, a região sul recebe menos radiação solar líquida que outros locais, fazendo com que sua temperatura média para todo o mês de janeiro também seja menor. Com isso, a ilha de calor intensifica-se com a passagem da brisa do mar no período da tarde na região sul em relação aos outros locais. Assim, mesmo que não alcance a região metropolitana de São Paulo, a brisa do mar ainda causa o efeito de aumento do gradiente de temperatura.

A partir deste estudo, ficou visível a importância de se ter pontos de medições de variáveis meteorológicas bem distribuídas na região metropolitana de São Paulo. Devido ao fato de a região ser uma conurbação territorialmente extensa com relevo, cobertura e uso do solo diversas, é esperado que padrões diferentes de temperatura surjam entre suas diferentes partes. Partindo de somente 5 pontos (centro, oeste, leste, norte e sul) na região metropolitana de São Paulo, foi possível notar semelhanças e diferenças entre suas partes, inclusive identificar a influência da brisa do mar mais evidente na região mais ao sul. Isso demonstra a importância do cuidado na escolha de dados de estações de superfície para a avaliação da ilha de calor, pois estações de superfície mais bem distribuídas permitem acompanhar de forma mais precisa o campo de temperatura e demais variáveis na região, evitando vieses.

Por fim, apesar de as ilhas de calor não produzirem impactos globais, ficando mais evidentes na escala local, interagem com fenômenos de maiores escalas, podendo gerar impactos diferenciados, se comparados isoladamente. Em razão disso, é preciso considerar efeitos combinados, pois a ilha de calor sob a atuação de fenômenos de escalas maiores pode ser intensificada e causar impactos locais mais significativos como episódios de precipitação extrema. Dessa forma, fica evidente que a população urbana é mais vulnerável às mudanças climáticas, especialmente aquelas com menores condições financeiras, que são geralmente as que ocupam locais de risco.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO R. V. et al. São Paulo urban heat islands have a higher incidence of dengue than other urban areas. **Brazilian journal of infectious diseases**, v. 9, n. 2, p. 146-155, 2015.

ARNFIELD, A. J. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. **International journal of climatology**, v. 23, n. 1, p. 1-26, 2003.

BARROS, H. R.; LOMBARDO, M. **Heat island in the city of São Paulo: the thermal field of parks**. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016.

CHEN, F. et al. The integrated WRF/urban modeling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems. **International journal of climatology**, v. 31, n. 2, p. 273-288, 2011.

COELHO, C. A. S.; CARDOSO, D. H. F.; FIRPO, M. A. F. Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event in São Paulo, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 125, n. 3-4, p. 769-784, 2016.

DAVIS, L. W.; GERTLER P. J. Contribution of air conditioning adoption to future energy use under global warming. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 112, n. 19, p. 5962-5967, 2015.

FERREIRA, M. J; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. Anthropogenic heat in the city of São Paulo, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 124, n. 1, p. 43-56, 2011.

FERREIRA, M. J; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. Diurnal variation in stored energy flux in Sao Paulo city, Brazil. **Urban climate**, v. 5, p. 36-51. 2013.

FREITAS, E. D. et al. Interactions of an urban heat island and sea-breeze circulations during winter over the metropolitan area of São Paulo, Brazil. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 122, n. 1, p. 43-65. 2007.

FREITAS, E. D.; SILVA DIAS, P. L. Alguns efeitos de áreas urbanas na geração de uma ilha de calor. **Revista brasileira de meteorologia**, v. 20, n. 3, p. 355-366, 2005. Disponível em: <http://www.rbmet.org.br/port/revista/revista_artigo.php?id_artigo=140>. Acesso em: 17 maio 2017.

IAG-USP – INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Boletim climatológico anual da estação meteorológica do IAG/USP – 2014**. São Paulo, 2014. Disponível em: <<http://www.estacao.iag.usp.br/Boletins/2014.pdf> >. Acesso em: 9 ago. 2018.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA E ECONOMIA APLICADA. **Atlas do desenvolvimento humano nas regiões urbanas brasileiras**. 2014. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=24037>. Acesso em: 30 jul. 2018.

JARVIS, A. et al. **Hole-filled SRTM for the globe Version 4**. 2008. Disponível em: <<http://srtm.csi.cgiar.org/>>. Acesso em: 18 ago. 2018.

LI, D.; BOU-ZEID, E. Synergistic Interactions between Urban Heat Islands and Heat Waves: The Impact in Cities Is Larger than the Sum of Its Parts. **Journal of applied meteorology and climatology**, v. 52, n. 9, p. 2051-2064, 2013.

NOBRE, C. A. et al. Vulnerabilidades das megacidades brasileiras às mudanças climáticas: região metropolitana de São Paulo. In: MOTTA, R. S. et al. **Mudança do clima no Brasil: aspectos econômicos, sociais e regulatórios**. Brasília: 2011. p. 233-260.

OKE, T. R. **Boundary layer climates**. 2. ed. Nova Iorque: Routledge, 2009.

OLIVEIRA, A. P. et al. Diurnal evolution of solar radiation at the surface in the city of São Paulo: seasonal variation and modeling. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 71, n. 3, p. 231-249. 2002.

OLIVEIRA, A. P.; BORNSTEIN, R. D.; SOARES, J. Annual and diurnal wind patterns in the city of São Paulo. **Water, air and soil pollution: focus**, v. 3, n. 5, p. 3-15. 2003.

RAIMUNDO, S. A paisagem natural remanescente na região metropolitana de São Paulo. **São Paulo em Perspectiva**, v. 20, n. 2, p. 19-31. 2006. Disponível em: <<http://produtos.seade.gov.br/produtos/spp/index.php?men=rev&cod=5073>>. Acesso em: 30 jul. 2018.

RIBEIRO, F. N. D. et al. Effect of sea breeze propagation on the urban boundary layer of the metropolitan region of Sao Paulo, Brazil. **Atmospheric Research**, v. 214, p. 174-188, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.07.015>>. Acesso em: 15 ago. 2018.

RIBEIRO, F. N. D. et al. Urban heat island in the metropolitan area of São Paulo and the influence of warm and dry air masses during summer. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN CLIMATE, 9, 2015, Toulouse. **Proceedings...** Disponível em: <<http://www.meteo.fr/icuc9/LongAbstracts/>>. Acesso em: 15 ago. 2018.

SÃO PAULO (Município). Secretaria do Verde e do Meio Ambiente/Secretaria de Planejamento. **Atlas ambiental do Município de São Paulo: o verde, o território, o ser humano: diagnósticos e bases para a definição de políticas públicas para as áreas verdes do Município de São Paulo**. São Paulo: Secretaria do Verde e Meio Ambiente, 2004.

SILVA, F. B.; LONGO, K. M.; ANDRADE, F. M. Spacial and temporal variability patterns of the urban heat island. In São Paulo. **Environments**, v. 4, n. 2., p. 1-26, 2017.

SKAMAROCK, W. C. et al. A description of the Advanced Research WRF version 3. **NCAR Technical note NCAR/TN-475+STR**, v. 113, 2008. Disponível em: <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2018.

SUN, T. et al. Attribution and mitigation of heat wave-induced urban heat storage change. **Environmental research letters**, v. 12, n. 11, p. 1-9, 2017.

VEMADO, F.; PEREIRA FILHO, A. J. Severe weather caused by heat island and sea breeze effects in the Metropolitan Area of Sao Paulo, Brazil. **Advances in Meteorology**, v. 2016, 2015.

