

**VARIAÇÕES TEMPORAIS E ESPACIAIS DA INTENSIDADE DA ILHA
DE CALOR URBANA NA CIDADE DO RECIFE – PE (BRASIL)**

TEMPORAL AND SPATIAL VARIATIONS OF THE INTENSITY OF THE URBAN HEAT ISLAND IN
THE CITY OF RECIFE - PE (BRAZIL)

Ayobami Badiru Moreira

Doutora em Geografia na Universidade Federal de Pernambuco
Av. Prof. Moraes Rego, 1335 - Cidade Universitária, Recife - PE.
E-mail: ayo.badiru@hotmail.com

Ranyére Silva Nóbrega

Prof. Dr. Universidade Federal de Campina Grande
Rua Aprígio Veloso, 882, Cidade Universitária, Campina Grande, PB, Brasil
E-mail: ranyere.silva@professor.ufcg.edu.br

Vicent Dubreuil

Professeur de géographie. Université de Rennes
LETG-Rennes-COSTEL; OSUR
E-mail: vincent.dubreuil@univ-rennes2.fr

RESUMO

Este estudo investigou os elementos que favorecem a formação da Ilha de Calor Urbano (IHU) na cidade de Recife/PE (Brasil) e os padrões temporais e espaciais desse fenômeno em toda a malha urbana. Para isso, a superfície urbana foi mapeada de tanto de acordo com a cobertura e estrutura através de classificação não supervisionada de imagem de satélite quanto da sobreposição do Modelo Digital de Terreno (DTM) com o Modelo Digital de Superfície (DSM). Foram obtidos dados atmosféricos registrados em oito pontos de observação, que foram analisados em escalas horárias, diárias, mensais e sazonais. A partir dos dados atmosféricos e de superfície, a espacialização do UHI foi realizada com modelagem espacial multivariada por meio de janelas rolantes. Três áreas principais de alta intensidade de UHI foram identificadas em Recife. Embora a UHI seja principalmente noturna, também foi identificada no período da tarde. A UHI desenvolveu-se mais rapidamente na estação chuvosa, com núcleos bem definidos de intensidade “muito forte” logo após o pôr do sol. No período seco, esses núcleos só se destacaram a partir da meia-noite e o horário de maior intensidade de UHI na cidade foi durante a noite (próximo às 2h). Os resultados obtidos podem subsidiar análises voltadas ao planejamento urbano e avançar na construção de estratégias de adaptação e mitigação do impacto do UHI na cidade.

Palavras-chave: Ilha de Calor Urbana (ICU), Clima Urbano, Paisagem Urbana, Recife.

ABSTRACT

This study investigated the elements that favor the formation of the Urban Heat Island (UHI) in the city of Recife/PE (Brazil) and the temporal and spatial pattern of this phenomenon throughout its urban fabric. For this, the urban surface was mapped according to its coverage and structure through both unsupervised classification of satellite image and the overlay of the Digital Terrain Model (DTM) with the Digital Surface Model (DSM). Atmospheric data recorded at eight observation points were obtained, which were analyzed in hourly, daily, monthly and seasonal time scales. From the atmospheric and surface data, the UHI spatialization was performed based on multivariate spatial modeling by rolling windows. Three main areas of high intensity of UHI were identified in Recife. Although UHI is mainly nocturnal, it has also been identified in the afternoon hours. UHI developed more rapidly in the rainy season, with well-defined nuclei of “very strong” intensity just after sunset. In the dry period, these nuclei only stood out from midnight onwards and the time of greatest UHI intensity in the city was during the night (close to 2 am). The results obtained can support analyzes aimed at urban planning and advance in the construction of adaptation and mitigation strategies for the impact of the UHI on the city.

Keywords: Urban Heat Island (UHI), Urban Climate, Urban Landscape, Recife.

1. Introdução

A Ilha de Calor Urbana (ICU) é uma anomalia térmica relacionada à expansão urbana e às modificações que este processo realiza sobre o balanço de energia na superfície (Oke, 1982; Oke et al, 2017). Ela pode ser identificada como um gradiente térmico ao longo da área construída das cidades. Como a expansão urbana é um fenômeno irreversível e crescente em diversas partes do mundo, sua compreensão e implicações é um desafio para os pesquisadores.

Stewart e Oke (2012 p.1884) apresentam a paisagem como um conceito-chave neste desafio e a define como uma porção de terra em escala local com características físicas e/ou culturais que foram moldadas por agentes físicos e/ou culturais. Estes autores explicam que as principais propriedades da paisagem que influenciam a intensidade da ICU são a cobertura e a estrutura da superfície. Corpos d'água, gramados e ruas pavimentadas são exemplos de diferentes tipos de cobertura da superfície, as suas propriedades termodinâmicas modificam o potencial de aquecimento/resfriamento do solo. A estrutura da superfície é relacionada à altura e ao espaçamento dos elementos verticais (como os edifícios e as árvores) e atua no clima local na modificação do fluxo de vento, no transporte de calor atmosférico e no saldo de radiação (STEWART;OKE, 2012 p.1884).

Khan et al. (2021) explicam que ainda são necessárias mais pesquisas de ICU com considerável interesse em climas tropicais. Apesar da elevada quantidade de estudos de ICU nas áreas urbanas ao longo do mundo, a América do Sul ainda é sub-representada (KHAN et. al, 2021). A necessidade de estudos de ICU nas cidades tropicais reside na alta intensidade de radiação solar disponível ao longo do ano além dos problemas estruturais que a maioria dessas cidades enfrenta devido à falta de um planejamento urbano adequado. O aumento do consumo de energia, concentração de poluentes, maior disseminação de epidemias e risco de morte para crianças, idosos e pessoas com condições médicas especiais são exemplos de problemas intensificados direta ou indiretamente pela intensidade do ICU.

No caso da cidade do Recife, a relação entre a cidade e o clima é marcada por conflitos. Do ponto de vista termodinâmico, a temperatura do ar desta cidade reflete nas transformações da superfície e tem se apresentado com a tendência geral de acréscimo ao longo dos últimos anos (MEDEIROS, 2020; GUEDES;SILVA, 2020). Porém, ao considerar a variabilidade espacial da temperatura do ar ao longo da malha urbana, a quantidade de pontos públicos de coleta de dados ainda é insuficiente. Dificultando o conhecimento dos

padrões do campo térmico urbano nesta cidade, do qual a ICU é o principal fenômeno. Neste sentido, a partir de pontos de coleta de dados complementares, o presente estudo investigou os elementos que favorecem a formação da ICU em Recife e o padrão temporal e espacial deste fenômeno ao longo da sua malha urbana.

2. Material e métodos

2.1. Área de estudo

A área de estudo compreende a cidade do Recife, capital do estado de Pernambuco, localizada na costa oriental da Região Nordeste do Brasil (NEB). Sua população é estimada em 1.653.461 habitantes (IBGE, 2020) e seu limite territorial compreende a uma área de 218,50 km², subdividido em 94 bairros agrupados por 6 Regiões Político-Administrativas (RPA), como apresentado na Figura 1.

Apesar de território ser predominantemente urbano (IBGE, 2020), a presença das Zonas de Ambiente Natural (ZAN) Beberibe e Capibaribe, no limite oeste da cidade, forma uma paisagem seminatural, com elevada concentração de cobertura vegetal arbórea e habitações esparsas e contrastando com a densidade urbana presente nas demais áreas da cidade. Neste sentido, o mapa apresentado na Figura 1 subdivide a paisagem desta cidade em dois grupos principais: o seminatural e o urbano.

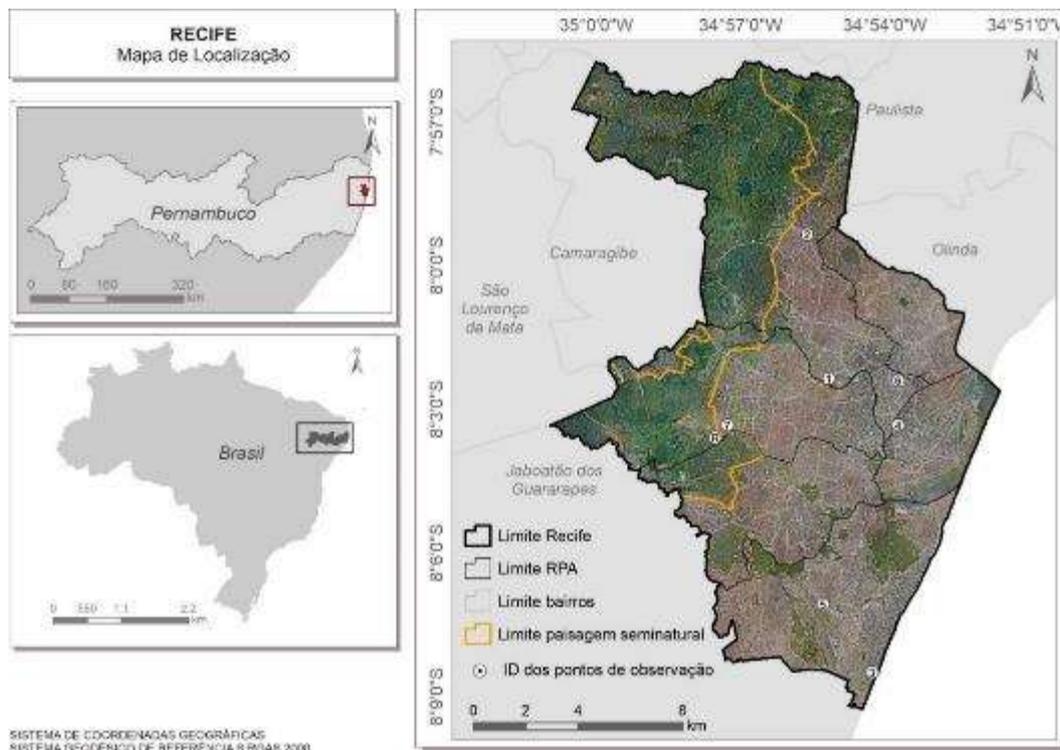


Figura 1, Mapa de localização da área cidade do Recife – PE, com destaque para o limite dos bairros, das Regiões Político-Administrativas (RPA), da paisagem seminatural e os pontos de observação de dados | Fonte dos dados: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Fonte da figura: autores

Recife corresponde ao tipo climático Tropical Litorâneo do Nordeste Oriental (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007), caracterizado por chuvas de outono/inverno e baixas amplitudes de temperatura e umidade do ar, com um regime de precipitação anual intenso, com elevada variabilidade pluviométrica e direção predominante do vento de sudeste durante todo o ano (WANDERLEY et al., 2018, p. 154). Apesar da elevada variabilidade pluviométrica, o período entre os meses de março a agosto concentra a maior frequência de eventos pluviométricos intensos e os maiores acumulados pluviométricos (SOUZA et al., 2012, p. 262; WANDERLEY et al., 2018, p. 162). Deste modo, estes meses se referem ao período chuvoso, enquanto os meses de demais (de setembro a fevereiro) ao período seco desta cidade.

2.2. Procedimento metodológico

A quantificação da paisagem urbana foi realizada a partir da delimitação de classes e subclasses de cobertura e estrutura da superfície (Quadro 1). As classes de cobertura da superfície foram delimitadas pela classificação não-supervisionada de imagem de satélite, a partir de cálculos do Índice de Vegetação por diferença Normalizada (IVDN), conforme

Amorim (2019, p. 28) . As imagens utilizadas foram provenientes do satélite Landsat-8 sensor OLI, (órbita 214/ ponto 66), referentes ao dia 29 de outubro de 2019.

As subclasses de estrutura da superfície são relativas ao atributo vertical da paisagem e foram delimitadas com base na sobreposição das classes de cobertura da superfície à camada de dados resultante da subtração do Modelo Digital de Superfície (MDS) ao Modelo Digital do Terreno (MDT). Outro dado calculado para complementar a compreensão da estrutura da superfície foi o Fator de Visão do Céu (FVC) a partir do MDS, conforme Moreira et al. (2021, p. 34). Os MDS e MDT são provenientes do perfilamento a laser do projeto Pernambuco Tridimensional (PE3D) e foram reamostrados para a resolução espacial de 2 metros.

Quadro 1. Classes e subclasses de cobertura do solo e respectivos critérios de delimitação

Classe	Critério da Subclasse
1 Corpos hídricos	-
2 Cobertura Vegetal (CV)	-
2.1 CV rasteira	Até 1,50 metros
2.2 CV arbustiva	Entre 1,51 e 3,00 metros
2.3 CV arbórea	Acima de 3,01 metros
3 Superfície Edificada (SE)	-
3.1 SE solo exposto	Até 1 metro
3.2 SE horizontal	De 1 a 6 metros
3.3 SE média	De 6,1 a 20 metros
3.4 SE vertical	Acima de 20 metros

Fonte: os autores

Os dados atmosféricos utilizados são referentes ao ano de 2018 (de 01 de janeiro a 31 de dezembro), provenientes de duas fontes: a) da Estação 82900 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), utilizada como estação de referência rural (E_{ref}); b) de 7 termohigrômetros (TH) instalados ao longo da cidade (Figura 2 e Figura 3), disponibilizados pelo Grupo de Estudos em Climatologia Tropical e Eventos Extremos (Tropoclima). Os TH utilizados foram da marca Hobo, modelo U23-001 Temp/RH, fixados em abrigo à 1,50 m de altura e intervalo temporal de 30 minutos (Figura 4). A escolha dos locais de instalação dos TH considerou a diversidade da paisagem circundante.

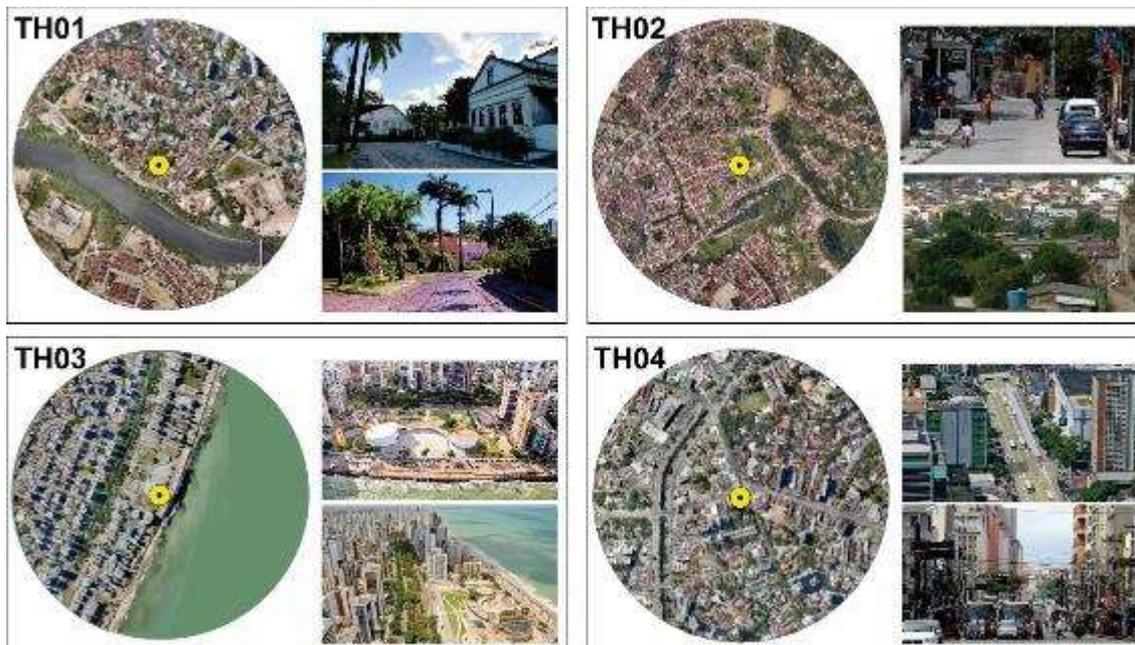


Figura 2. Representação da localização e paisagem representativa do TH01, TH02, TH03 e TH04 | Fonte: os autores

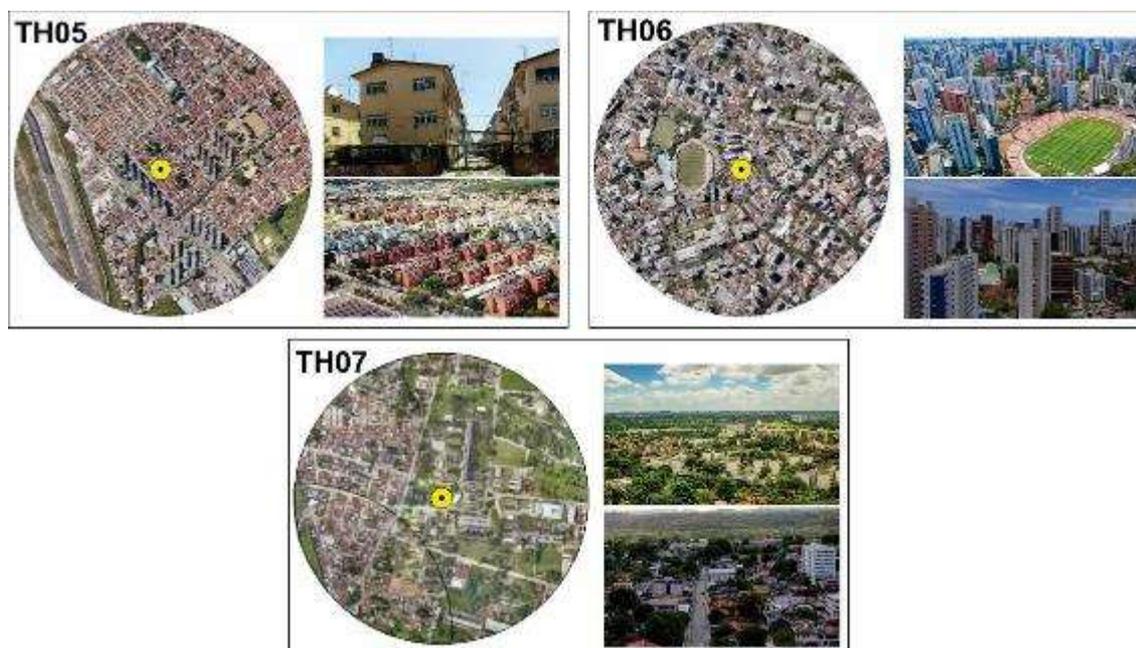


Figura 3. Representação da localização e paisagem representativa do TH05, TH06 e TH07 | Fonte: os autores



Figura 4. Instalação dos termohigrômetros e tabela de disponibilidade dos dados | Fonte: os autores

Estes dados foram analisados nas escalas temporais horária, diária, mensal e sazonal. Todos os dados horários obtidos foram representados em horário local (UTC -3). Os dias com dados faltantes foram excluídos da análise. O dia da análise de ICU é representado a partir do horário do nascer do sol (Figura 5), pois a ICU é um fenômeno que tende a se intensificar no período noturno. O horário de nascer-do-sol e pôr-do-sol nos solstícios de inverno e verão no ano de 2018 foram respectivamente às 05:31 - 17:11 e 05:00 - 17:36. Como estes horários não sofrem uma variação expressiva ao longo do ano na latitude do Recife, o horário adotado para o início do dia de ICU foi às 6:00 durante todo o ano.

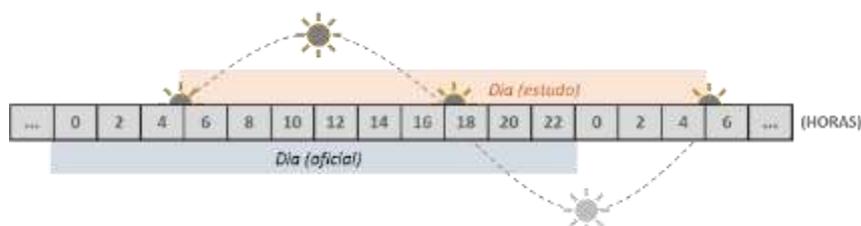


Figura 5. Ilustração da diferença entre os intervalos de dia oficial (em azul) e de estudo (em laranja) | Fonte: os autores

Considerando que a ICU ocorre sob condições atmosféricas estáveis, os dias que apresentaram volume pluviométrico superior a 0.2 mm foram excluídos da análise. Além disto, a análise respeitou os critérios de qualidade metodológica para observações de ICU propostos por Stewart (2011, p. 31). O cálculo da ICU foi realizado para cada TH e correspondeu às escalas temporais citadas. A Equação 1 definiu os valores de ICU, onde $T_{a,th}$ e $T_{a,ref}$ são a temperatura do ar no termohigrômetro e na estação de referência rural respectivamente.

$$ICU = T_{a,th} - T_{a,ref} \quad \text{Equação 1}$$

A partir dos valores horários de ICU, a ICU máxima ($ICU_{m\acute{a}x}$) foi identificada como o horário com os registros mais intensos de ICU em todos os TH. Os valores médios diários de ICU foram submetidos à Análise de Agrupamento (AA) para identificar similaridades entre os TH. A intensidade da ICU foi analisada sob duas perspectivas: a geral e a local. A perspectiva geral é relativa à classificação de magnitude de ICU (Quadro 2) proposto por Fernández García (1996), amplamente adotada por diversos autores tanto para qualificar os valores de ICU quanto para comparar a ICU entre cidades distintas (AMORIM, 2020, p. 33; DUBREUIL et al., 2020, p. 17).

Quadro 2. Classificação de magnitude da ICU

Intervalo	Magnitude
0 °C – 2 °C	Fraca
2 °C – 4 °C	Moderada
4 °C – 6 °C	Forte
Acima de 6 °C	Muito forte

Fonte: Adaptado de Fernández García (1996)

A perspectiva local lida com a distribuição de frequência de ICU inerente a cada TH, pois entende-se que a intensidade relativa da ICU em cada ponto pode variar de acordo com as características locais. Por exemplo: uma ICU extremamente forte em um ponto periurbano pode ser identificada como habitual em um ponto central da cidade. Por isto, a intensidade relativa da ICU foi identificada para cada série de cada TH a partir do cálculo dos quantis. A Equação 2 representa o cálculo utilizados, onde *Prob* representa a probabilidade contínua dos valores de ICU (*X*) para cada quantil (*Qp*). Os limites (*p*) utilizados para cada classe estão apresentados no Quadro 3.

$$\text{Prob}(X \leq Qp) = p \quad (\text{Equação 2})$$

Quadro 3. Intervalos dos quantis e classes de intensidade de ICU.

Classe	Intervalo
<i>Extremamente Fraca</i>	$Qp \leq 0,05$
<i>Muito Fraca</i>	$0,05 < Qp \leq 0,15$
<i>Fraca</i>	$0,15 < Qp \leq 0,25$
<i>Habitual</i>	$0,25 < Qp \leq 0,50$
<i>Forte</i>	$0,50 < Qp \leq 0,75$

Classe	Intervalo
<i>Muito forte</i>	$0,75 < Qp \leq 0,95$
<i>Extremamente forte</i>	$Qp > 0,95$

Fonte: Os autores.

Foram identificados dois dias representativos (um para o período chuvoso e outro para o seco), considerando dias com ICU mais intensas os quais apresentaram a classe “extremamente forte” de intensidade relativa de ICU em todos os TH nestes períodos. Estes dias foram considerados na análise da evolução horária da ICU e na sua distribuição espacial. A espacialização da ICU foi realizada a partir dos dados obtidos pelos TH por meio da modelagem espacial multivariada por janelas móveis, conforme utilizado por Amorim (2020); Dubreuil et al., (2002) e Foissard (2016). As variáveis de superfície utilizadas neste processo (Quadro 5) são baseadas nas classes de cobertura do solo (Quadro 1).

Quadro 4: Variáveis independentes do modelo.

Variável	Classes
1 Corpos hídricos	Corpos hídricos
2 Vegetação	União de todas as subclasses de vegetação
3 Urbano 1	Subclasse SE solo exposto
4 Urbano 2	Subclasse SE horizontal
5 Urbano 3	União das classes SE média e SE vertical

Fonte: Os autores.

As variáveis de entrada do modelo foram representadas em camadas no formato *raster* com resolução espacial 30 metros. A construção das camadas respeitou o melhor raio de abrangência de cada variável (Quadro 5), definido pelas janelas móveis. Portanto, cada célula dos *rasters* representa a fração da cobertura da variável correspondente dentro do raio determinado ao redor da célula.

Quadro 5. Janelas móveis utilizadas e respectivos raios de abrangência.

Janela	Raio
3x3	90 metros
5x5	150 metros
7x7	210 metros
9x9	270 metros

Janela	Raio
13x13	390 metros
17x17	510 metros

Fonte: Os autores.

Para observar a estimativa da evolução horária da ICU, este procedimento foi realizado nos seguintes horários: 09h, 12h, 15h, 18h, 21h, 0h, 3h e 6h (horário local). Além disto, o horário que registrou a maior intensidade de ICU no conjunto de dados, correspondeu ao horário de ICU máxima ($ICU_{máx}$) dos dias representativos.

3. Resultados

3.1. A paisagem urbana e a ICU nos pontos observados

A Tabela 1 lista a porcentagem de cada classe de cobertura/estrutura da paisagem mapeadas no perímetro da paisagem urbana, o qual é composto 67% pela Superfície Edificada (SE). A Cobertura Vegetal (CV) e os Corpos Hídricos (CH) cobrem respectivamente 27% e 6% da paisagem urbana. O mapeamento destas classes ao longo da cidade e seus valores no entorno dos TH estão apresentados pela Figura 6.

Tabela 1. Porcentagens das classes de cobertura/estrutura da paisagem urbana de Recife

Classe	Porcentagem da Cobertura
Superfície Edificada (SE)	67%
SE Exposto	20%
SE Horizontal	35%
SE Media	11%
SE Vertical	1%
Cobertura Vegetal (CV)	27%
CV Arbórea	15%
CV Arbustiva	4%
CV Rasteira	8%
Corpo Hídrico (CH)	6%

Fonte: Os autores

A classe SE representa melhor as transformações antrópicas responsáveis pela alteração do saldo de radiação na superfície, a SE Vertical e a SE Média correspondem a 12% do perímetro edificado. Esta porcentagem, apesar de aparentemente baixa, tem a característica de estar concentrada em áreas específicas da cidade (Figura 6), o que reflete na redução do Fator de Visão do Céu (FVC) e, conseqüentemente, na ICU resultante. As demais classes também apresentam pontos de concentração ao longo do perímetro construído, por exemplo, a RPA 01 concentrou a maior cobertura hídrica e a RPA 03 a maior cobertura vegetal, o que pode interferir positivamente na resposta térmica destas regiões.

A AA identificou dois grupos distintos dentre os TH: os TH01, TH02 e TH07 corresponderam ao Grupo 1 e os demais ao Grupo 2. Quando observadas as porcentagens das variáveis da paisagem do entorno de cada TH (Figura 6), as menores intensidade da ICU no Grupo 1 refletem o seu entorno, com os maiores valores de FVC, menores percentuais de superfície impermeabilizada e maiores percentuais de superfície vegetada. O segundo grupo representou paisagens densamente urbanizadas, com os maiores percentuais de impermeabilização de superfície e menor quantidade de vegetação. Por conseqüência, apresentam as maiores intensidades de ICU.

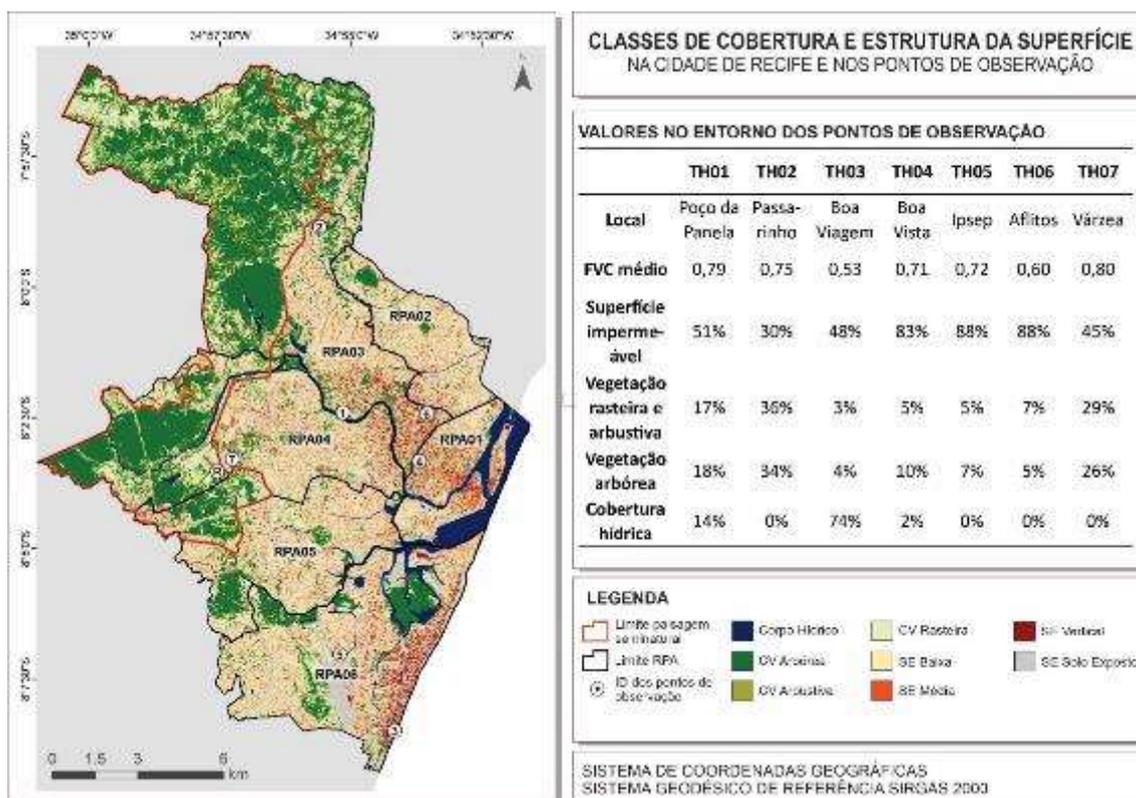


Figura 6. Mapeamento das classes de cobertura/estrutura da superfície e seus valores nos entornos dos pontos de observação | Fonte: os autores

A partir dos diagramas *boxplot* dos valores de ICU horária nos pontos observados (Figura 7) é possível identificar que o TH04 apresentou o maior valor médio de ICU (2,3 °C), seguido do TH 05 (2,2 °C) e do TH06 (2,0 °C). A menor média de ICU foi registrada pelo TH02 (0,8 °C). O TH03 se destacou tanto no maior (7,0 °C) quanto no menor (-3,2 °C) registros absolutos, de modo que este TH obteve a maior variabilidade horária de ICU. A menor dispersão foi registrada no TH07.

Foi identificada uma elevada variabilidade da ICU por meio dos intervalos das classes de intensidade relativa da ICU nos TH (Figura 7). Por exemplo, a intensidade relativa de ICU “habitual” no TH07 corresponde à ICU “muito fraca” no TH06. As maiores intensidades e variabilidades de ICU foram identificadas no Grupo 2, sobretudo nos TH03 e TH04, localizados nos bairros de Boa Viagem e Boa Vista respectivamente.

A magnitude média mensal da ICU no Grupo 01 não ultrapassou 2°C (Figura 8) ao longo do período do estudo, de modo que se classifica como “fraca” (FERNÁNDEZ GARCÍA, 1996). Neste grupo, o TH01 apresentou as maiores variabilidades, sendo o mês de julho mais intenso. No Grupo 02, o mês de junho também apresentou as maiores intensidades de ICU, em conjunto com os meses de julho e agosto (exceto no TH06, com maiores intensidades entre julho e setembro). De forma geral, os meses chuvosos registraram ICU mais intensas em comparação aos demais.

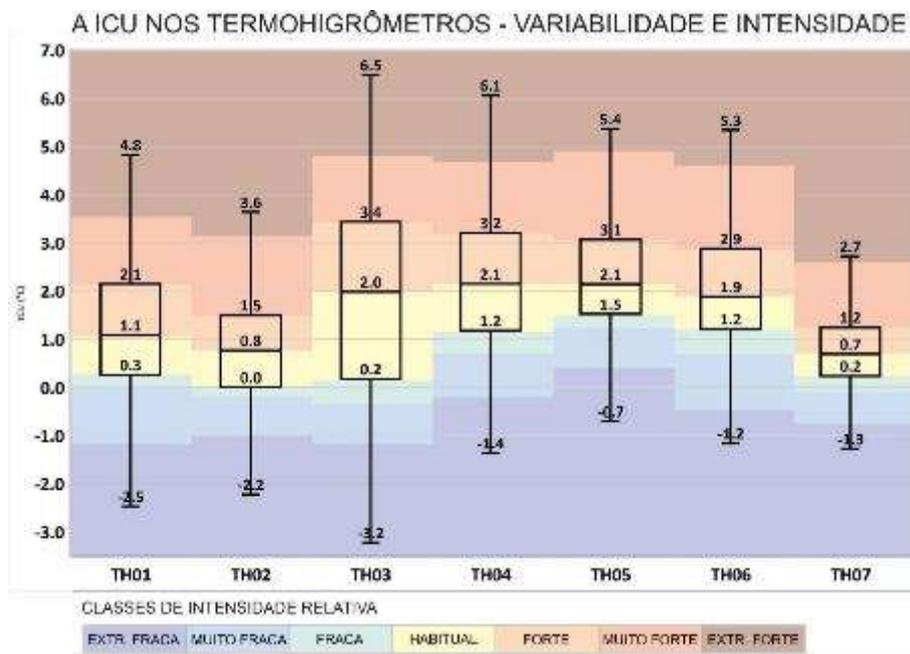


Figura 7. Diagramas *boxplot* dos valores de ICU horária nos pontos observados e representação dos intervalos de intensidade relativa de ICU pelo seguinte gradiente: azul escuro (extremamente fraca), azul (muito fraca),

azul claro (fraca), verde (habitual), amarelo (forte), laranja (muito forte) e vermelho (extremamente forte) |Fonte: os autores

3.2. Padrões horários e espaciais da ICU nos pontos observados

Os dias 12/06/2018 e 27/12/2018 foram selecionados como dias representativos de ICU para os períodos chuvoso e seco respectivamente. Estes dias foram selecionados por terem registrado intensidade relativa de ICU “extremamente forte” em todos os TH. Os dados de ICU destes dias foram utilizados tanto para analisar o comportamento horário da ICU nos TH quanto como dados de entrada na modelagem, de modo a estimar o comportamento espacial horário da ICU ao longo da área de estudo. A Tabela 2 apresenta as correlações globais de cada simulação, as quais variaram entre 0,72 e 0,96 para o dia representativo chuvoso, e entre 0,67 e 0,92 no dia representativo seco. De forma geral, as correlações globais foram melhores nos horários noturnos nos dois dias.

As correlações estatísticas entre cada classe em cada janela selecionada estão apresentadas na Tabela 3. Esta tabela mostra que as correlações entre a ICU e os corpos hídricos foram muito próximas de zero em todas as janelas, variando entre -0,04 e 0,09. A vegetação apresentou elevada correlação negativa com a ICU em quase todos os horários, com os maiores valores nos horários noturnos (quando a ICU está mais intensa); as correlações positivas foram baixas (0,08 e 0,14) e registradas às 9h e 12h do dia representativo seco.

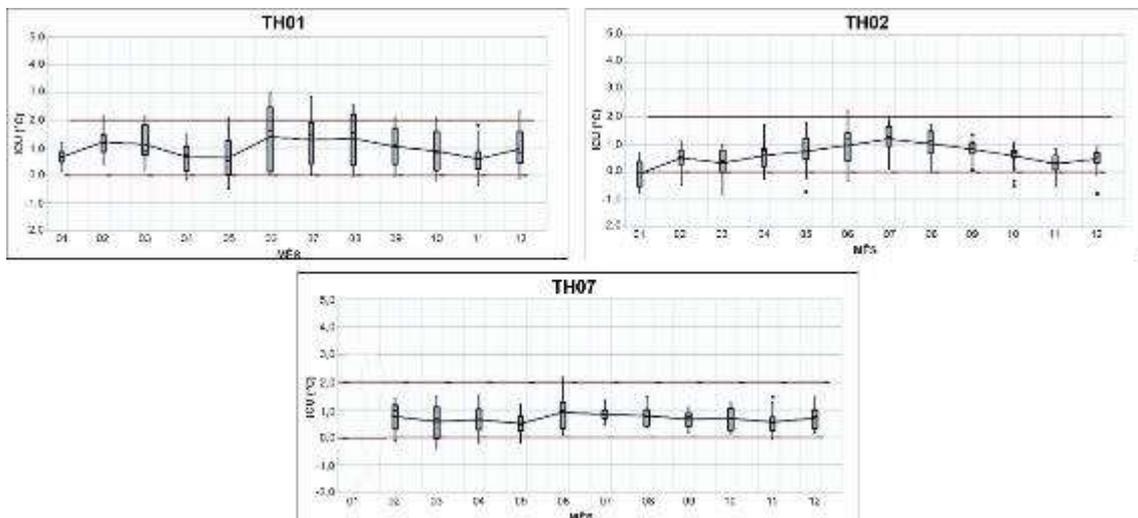


Figura 8. Variabilidade média mensal da ICU durante o ano de 2018 nos TH01, TH02 e TH07, pertencentes ao Grupo 01: TH01 | Fonte: os autores

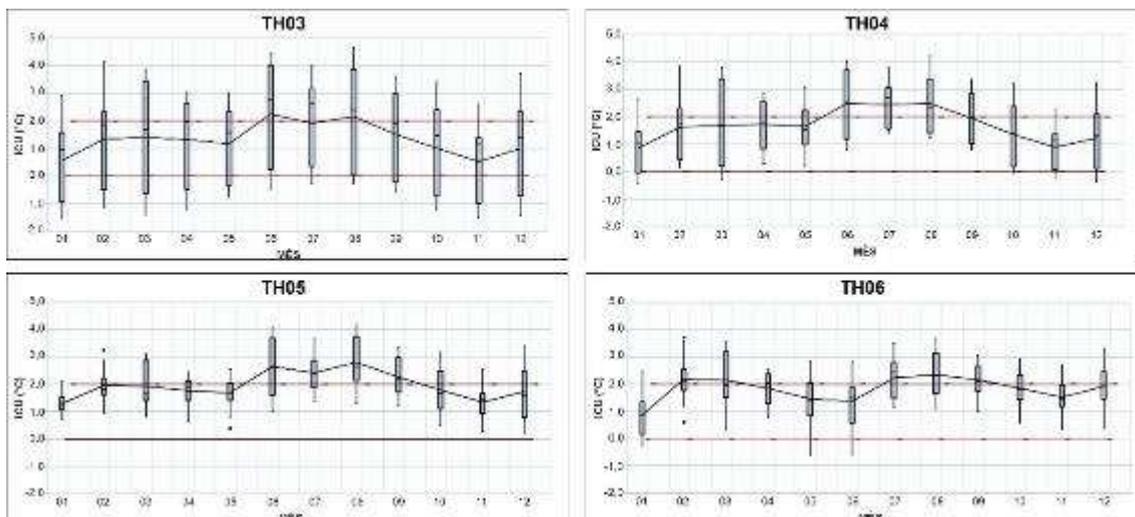


Figura 9. Variabilidade média mensal da ICU durante o ano de 2018 nos TH03, TH04, TH05 e TH06, pertencentes ao Grupo 02: TH001 | Fonte: os autores

Tabela 2. Correlações globais das simulações para os dias representativos.

Dia	9h	12h	15h	18h	21h	0h	3h	5h
12/06/18	0,89	0,89	0,72	0,95	0,96	0,94	0,92	0,95
27/12/18	0,70	0,71	0,77	0,67	0,91	0,92	0,80	0,80

Fonte: Formato baseado em Amorim (2021). Autoria própria.

A predominância do coeficiente negativo na classe vegetação representa o papel desta classe em reduzir a intensidade da ICU. O contrário ocorre com as demais classes (3, 4 e 5) que representam a cobertura edificada. Em geral, estas classes também apresentaram os melhores valores em janelas mais largas, assim como verificado por Amorim (2020) e por Foissard et al. (2019).

Tabela 3. Correlações estatísticas entre a intensidade da ICU e as classes de entrada do modelo para o dia representativo do período chuvoso

Dia	Classe	9h	12h	15h	18h	21h	0h	3h	5h
12/06	1(Corpos hídricos)	7x7 (0,01)	7x7 (0,02)	7x7 (0,03)	5x5 (0,03)	5x5 (0,03)	5x5 (0,03)	5x5 (0,03)	5x5 (0,03)
12/06	2(Veget.)	7x7 (-0,02)	7x7 (-0,66)	7x7 (-0,66)	7x7 (0,87)	7x7 (0,91)	7x7 (0,95)	17x17 (0,95)	7x7 (-0,83)
12/06	3(Solo)	13x13 (0,11)	17x17 (0,74)	17x17 (0,64)	17x17 (0,56)	17x17 (0,63)	17x17 (0,70)	17x17 (0,67)	17x17 (0,55)
12/06	4(Urb. Horizontal)	5x5 (0,61)	17x17 (0,46)	5x5 (0,78)	17x17 (0,75)	17x17 (0,76)	17x17 (0,77)	17x17 (0,81)	9x9 (0,76)
12/06	5(Urb. Vertical)	13x13 (-0,16)	7x7 (0,16)	13x13 (0,31)	13x13 (0,64)	13x13 (0,60)	13x13 (0,60)	13x13 (0,54)	13x13 (0,58)
27/12	1(Corpos hídricos)	7x7 (-0,04)	7x7 (-0,01)	7x7 (0,06)	5x5 (0,09)	5x5 (0,02)	5x5 (0,02)	5x5 (0,03)	5x5 (0,02)

Dia	Classe	9h	12h	15h	18h	21h	0h	3h	5h
27/12	2(Veget.)	5x5 (0,08)	13x13 (0,14)	5x5 (- 0,33)	5x5 (- 0,90)	7x7 (- 0,86)	17x17 (- 0,88)	7x7 (- 0,84)	7x7 (-0,78)
27/12	3(Solo)	17x17 (0,30)	5x5 (0,28)	9x9 (0,75)	17x17 (0,76)	17x17 (0,61)	17x17 (0,61)	17x17 (0,53)	17x17 (0,38)
27/12	4(Urb. Horizontal)	5x5 (0,34)	17x17 (0,06)	17x17 (- 0,04)	17x17 (0,37)	17x17 (0,62)	17x17 (0,84)	17x17 (0,79)	13x13 (0,68)
27/12	5(Urb. Vertical)	13x13 (-0,49)	7x7 (- 0,84)	7x7 (- 0,19)	13x13 (0,52)	13x13 (0,62)	13x13 (0,43)	9x9 (0,60)	13x13 (0,73)

Fonte: Formato baseado em Amorim (2021). Autoria própria.

3.2.1. Padrões horários e espaciais da ICU no dia representativo do período chuvoso

Os valores horários de ICU para o dia 12/06/2018 estão apresentados na Figura 10. A Figura 11 mostra a ICU estimada pelo modelo para toda a área de estudo em oito horários distintos. O nascer do sol ocorreu às 05:29 horas no dia 12/06/2018. O início do dia (6 h) marcou valores elevados de ICU na maioria dos TH, ainda decorrentes da dissipação da ICU do dia anterior. O período matutino apresentou ICU predominantemente fraca (de 0 a 2 °C), com registro prolongado de ilha de frescor nos TH02 e TH03. A elevada incidência de radiação solar ao meio-dia reduziu os contrastes térmicos entre as superfícies, de modo que a estimativa da ICU neste horário foi próxima a 0 °C na maior parte da cidade.

O período vespertino apresentou um aumento gradual da ICU, sem registro nem estimativa de ilha de frescor. Enquanto os TH do Grupo 1 continuaram com ICU predominantemente fraca, os demais começaram a registrar ICU moderada (de 2 °C a 4 °C) a partir das 14 horas. A estimativa da ICU às 15 horas indica pequenas áreas isoladas de ICU acima de 3 °C. Os TH do Grupo 1 permaneceram registrando ICU de fraca a moderada durante todo o período noturno. O pôr-do-sol foi registrado às 17:09 h, a partir deste horário, a ICU se intensificou mais rapidamente nos TH do Grupo 2 e no TH01, às 20 horas a ICU já se apresentava como forte nestes pontos (de 4°C a 6 °C). Os mapas de ICU entre as 18h e 0h mostram que durante o período noturno os núcleos de ICU forte (de 4 a 6 °C) e muito forte (acima de °C) se intensificaram e se expandiram ao longo da malha urbana neste dia.

Enquanto o TH02 e TH07 atingiram ICU máxima às 00 h e às 20 h respectivamente, nos demais TH a ICU continuou a aumentar ao longo da madrugada, ultrapassando 5 °C em todos os TH do Grupo 2 e alcançando classe de intensidade muito forte (acima de 6 °C) no TH03. Este maior contraste térmico entre os grupos favoreceu o ressurgimento das ilhas de frescor a partir da meia noite nos ambientes com maior presença de vegetação e ICU mais

intensas nos seus núcleos, principalmente entre as 2 e 3 horas. Neste dia, os maiores valores de ICU ocorreu às 2 horas, por isto, este momento foi identificado como o horário de ICU máxima (ICU_{max}) no dia representativo chuvoso.

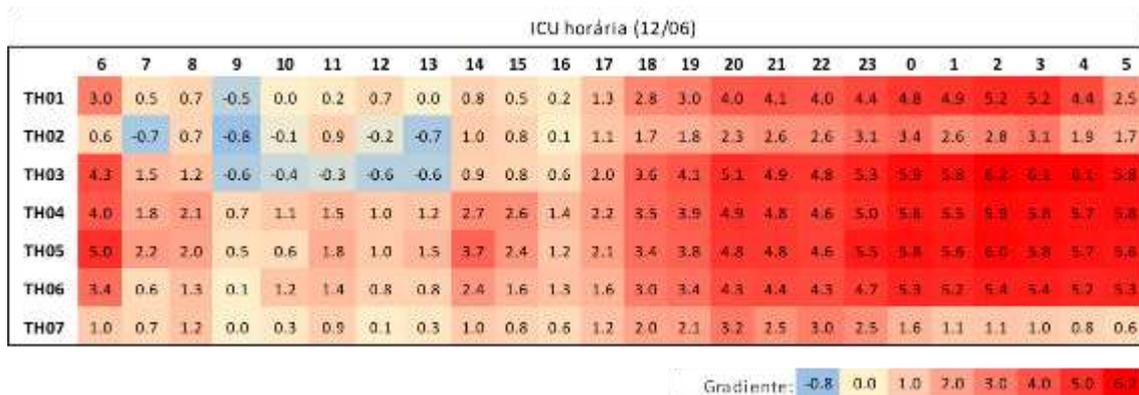
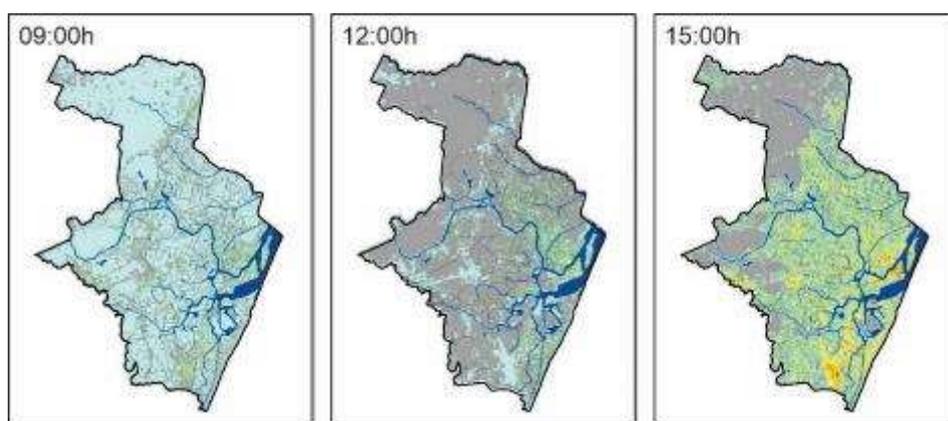


Figura 10. Valores horários de ICU em cada TH durante o dia 12/06/2018 | Fonte: os autores.

3.2.2. Padrões horários e espaciais da ICU no dia representativo do período seco

Os valores horários de ICU para o dia 27 de dezembro de 2018 estão apresentados na Figura 12. A Figura 13 mostra a ICU estimada pelo modelo para toda a área de estudo neste dia em oito horários distintos. O amanhecer do sol foi registrado às 05:03 h e os valores elevados de ICU registrados às 6 h são remanescentes da ICU do dia anterior. O período da manhã concentrou os menores valores de ICU, os quais foram predominantemente negativos na maioria dos TH, com exceção do TH06 que apresentou ICU de negativa a fraca, porém sem ultrapassar 1 °C. Os mapas da ICU (Figura 13; 9 e 12 h) também indicaram ilha de frescor predominante ao longo da cidade às 9 h e um gradual aumento das áreas de ICU fraca ao meio-dia.



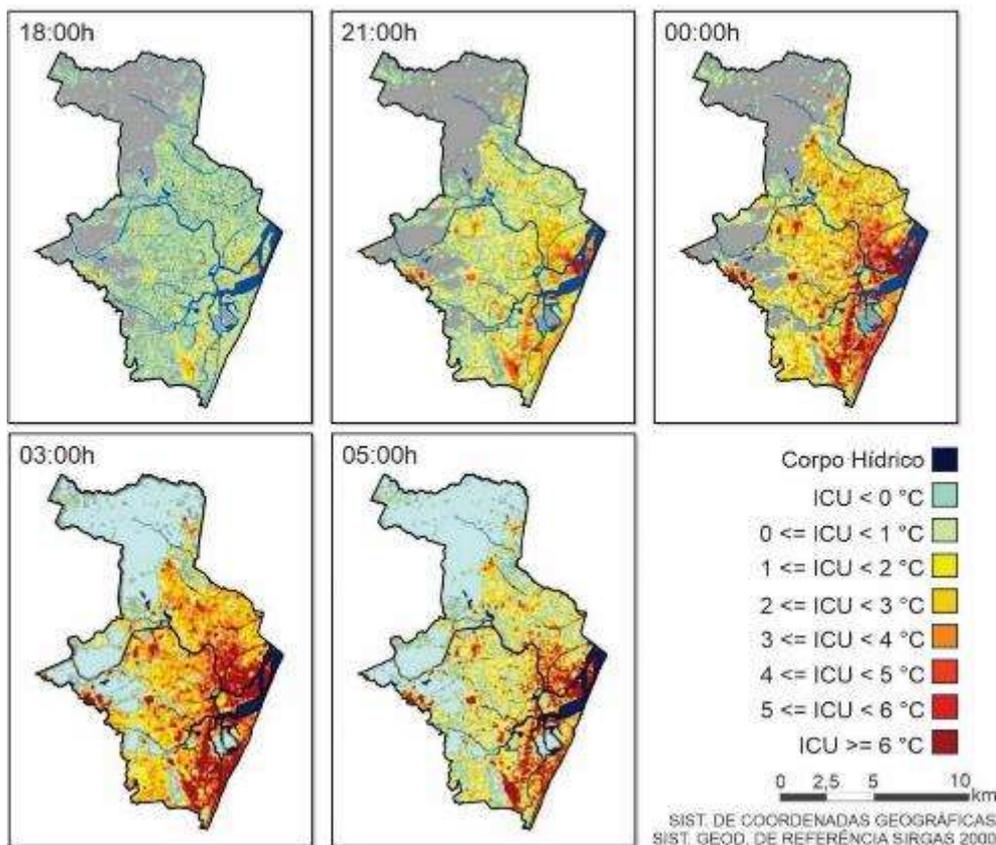


Figura 11, Espacialização da ICU ao longo da área de estudo estimada pelo modelo no dia 12 de junho de 2018 em 8 horários (09, 12, 15, 18, 21, 00, 03 e 05 horas) | Fonte: os autores.

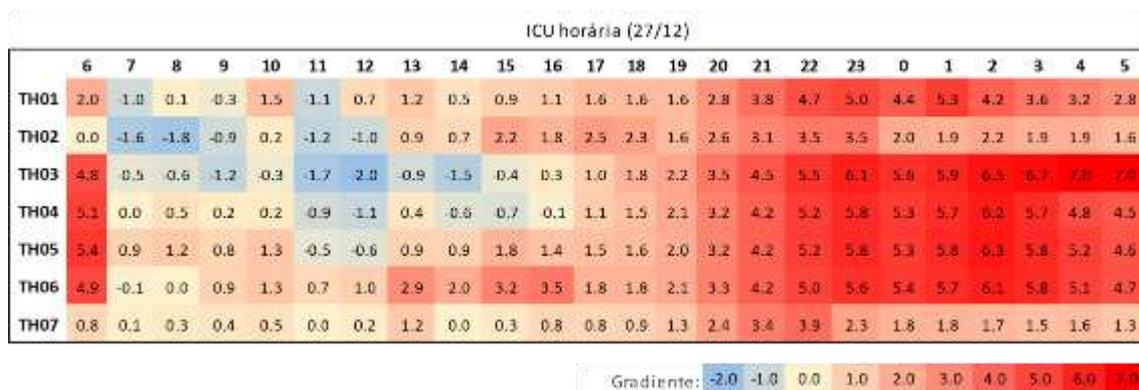


Figura 12. Valores horários de ICU em cada TH durante o dia 27/12/2018 | Fonte: os autores.

A intensidade da ICU, apesar de ainda fraca, continuou crescente após o meio-dia na maioria dos TH. A exceção se encontrou nos TH01, TH03 e TH04, os quais tiveram ICU negativa/nula durante a maior parte da tarde. Apesar destes três TH apresentarem características muito distintas entre si, a ICU estimada para as 15h (Figura 13) mostra que as áreas próximas dos corpos hídricos e com maior cobertura vegetal apresentaram ICU mais

reduzida neste horário. Nisto, a maior parte da RPA 01 (no centro da cidade, onde o TH04 está localizado) apresentou ICU negativa.

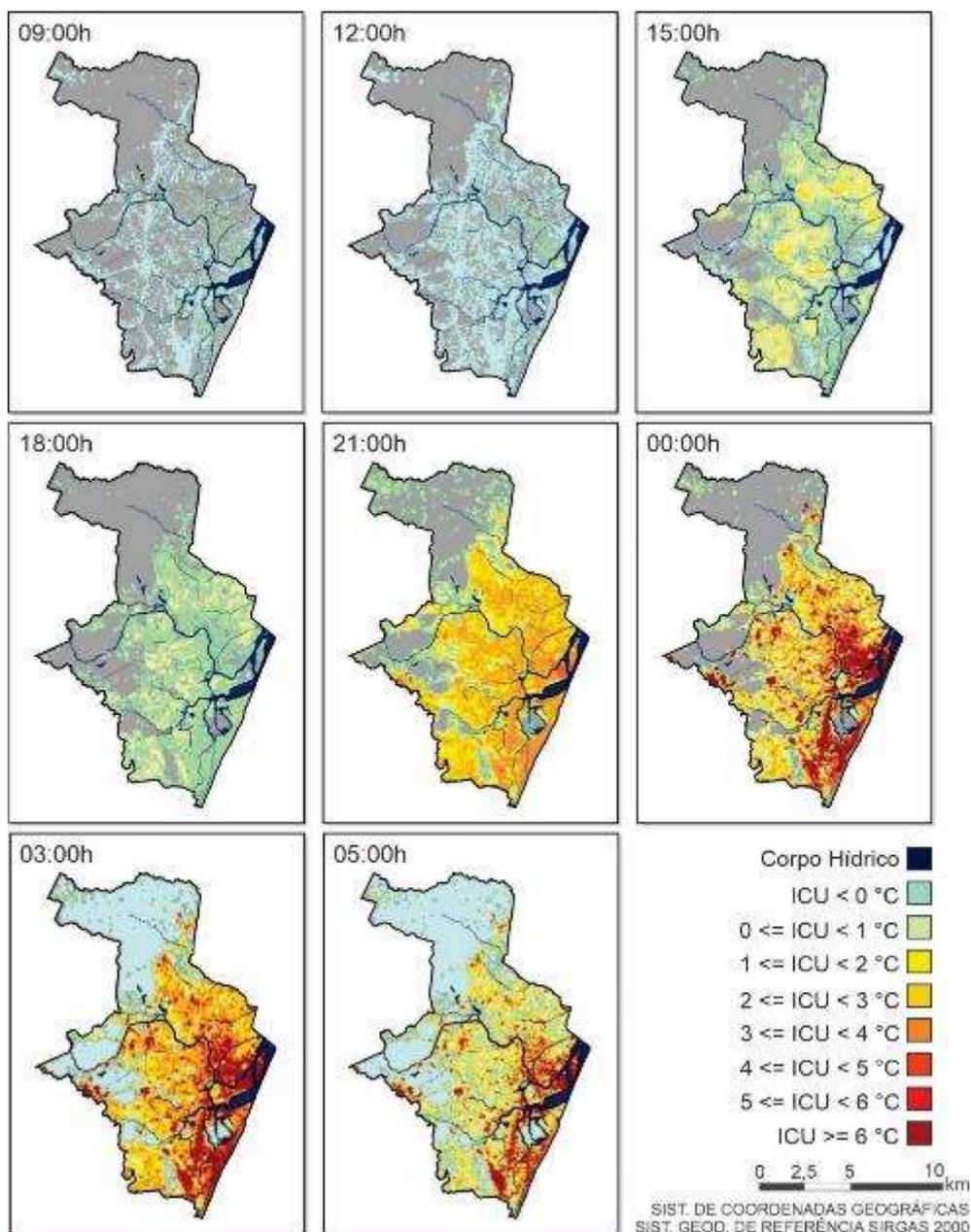


Figura 13. Espacialização da ICU ao longo da área de estudo estimada pelo modelo no dia 27 de dezembro de 2018 em 8 horários (09, 12, 15, 18, 21, 00, 03 e 05 horas) | Fonte: Os autores.

O pôr-do-sol foi registrado às 17:38, os valores observados e espacializados às 18 h mostram que a ICU se apresentou principalmente nula ou fraca neste horário, porém logo em seguida, às 19 h, passou a registrar ICU acima de 2 °C nos TH do Grupo 2 e continuou se intensificando nas horas seguintes do período noturno em todos os TH. Os núcleos mais intensos de ICU, nas classes “forte” e “muito forte” foram registrados a partir da meia-noite na RPA 01 (centro), nos bairros da margem direita do Rio Capibaribe e nos bairros da orla

marítima. A madrugada foi o período de maior intensidade de ICU, sobretudo às 2hs (Figura 12), sendo assim o horário da $ICU_{máx}$ neste dia.

3.3. Discussões sobre a paisagem urbana e a ICU resultante em Recife

A Figura 14 mostra a média da distribuição espacial da $ICU_{máx}$ nos dois dias representativos por bairros (a) e por pixel (b). Os bairros com maiores $ICU_{máx}$ estão destacados e listados na Tabela 4. Esta figura também destaca três áreas (áreas A, B e C, contornadas em laranja no mapa) que se destacaram pelos valores de $ICU_{máx}$.

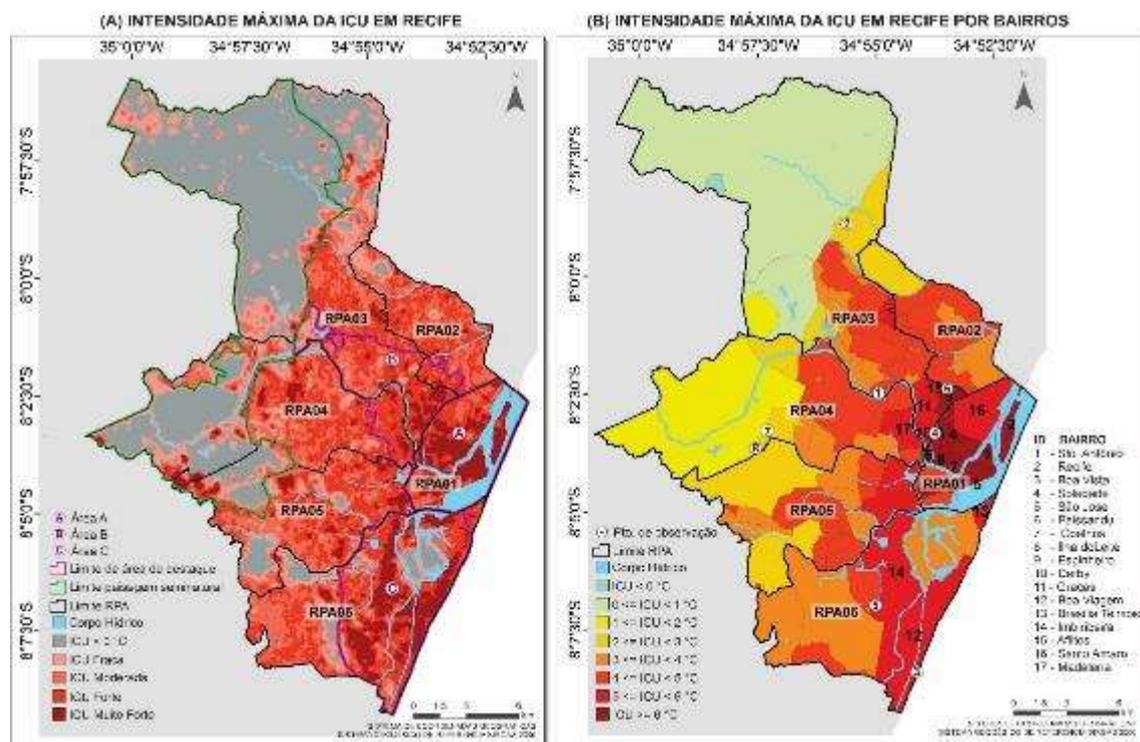


Figura 14. Intensidade máxima da ICU em Recife (A) e a sua média por bairros (B), com destaque para os bairros de maior intensidade de ICU, os limites das RPA, os pontos de observação e as áreas de destaque | Fonte: os autores.

Tabela 4. Lista dos bairros com maiores valores médios de $ICU_{máx}$.

Cod	Bairro	$ICU_{máx}$	RPA	Cod	Bairro	$ICU_{máx}$	RPA
1	Santo Antônio	6,8	RPA01	10	Derby	5,9	RPA03
2	Recife	6,8	RPA01	11	Graças	5,8	RPA03
3	Boa Vista	6,8	RPA01	12	Boa Viagem	5,7	RPA06
4	Soledade	6,7	RPA01	13	Brasília	5,5	RPA06
5	São José	6,6	RPA01	14	Imbiribeira	5,4	RPA06
6	Paissandu	6,6	RPA01	15	Aflitos	5,3	RPA03
7	Coelhos	6,5	RPA03	16	Santo Amaro	5,2	RPA01

destes bairros (NUNES, 2008, 2017). Percebe-se na (Figura 16) que enquanto a classe SE Vertical na Área B continua densamente concentrada, as áreas de ICU “muito forte” se restringem a pontos isolados, incluindo onde o TH06 está localizado.

Os valores resultantes de ICU encontrados no TH01 e TH06 exemplificam a descontinuidade da ICU na Área B à medida que se distancia da RPA01. Os valores de ICU registrados pelo TH06 foram muito mais próximas aos do TH04, localizado na RPA01. Isso se dá possivelmente tanto pela maior porcentagem de cobertura vegetal quanto pelas intervenções urbanísticas que limitam o gabarito das edificações e a paisagem histórica nos bairros nesta área.

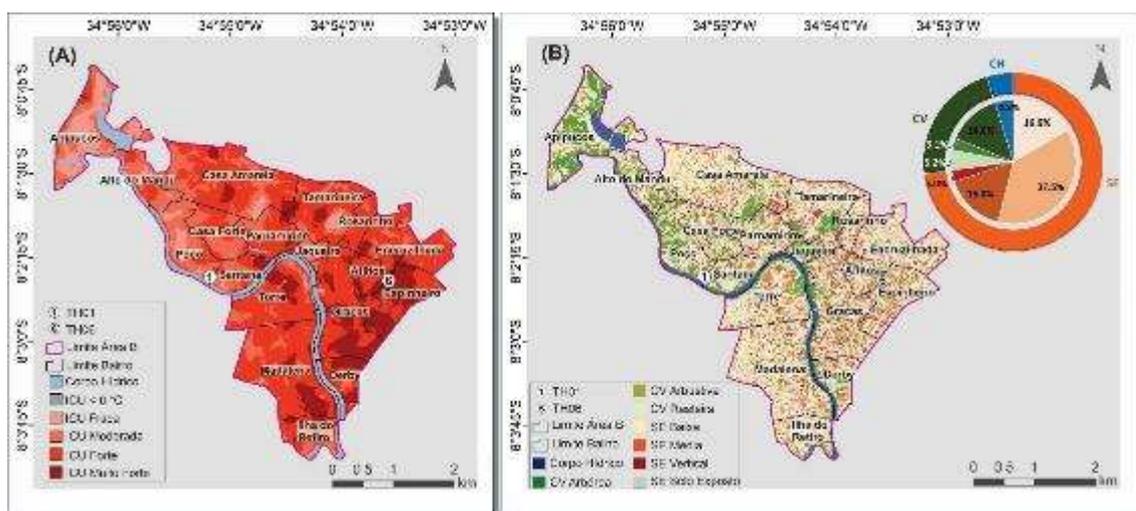


Figura 16. Intensidade máxima da ICU na Área B (A) e suas classes de cobertura/estrutura da superfície, com destaque para limite dos bairros, TH01 e TH06 | Fonte: Os autores.

A Área C corresponde aos bairros de Boa Viagem, Pina, Imbiribeira, Ipsep e parte do bairro do Ibura, pertencentes à RPA06 e adjacentes à orla marítima da cidade. A RPA06 se destaca por possuir as maiores concentrações de SE Vertical e de SE Média: 43% e 26% respectivamente. Esta concentração é maior à medida que se aproxima da linha de costa, onde se localiza o TH03 (Figura 17), atuando como uma barreira física para a penetração dos ventos alísios na cidade.

A influência da barreira de edifícios na Área C sobre o clima urbano ainda não é totalmente compreendida. A verticalização desta área, refletida na redução do FVC, atuam como um obstáculo para o fluxo do vento, predominantemente de sudeste, propiciando a intensificação de ICU nos bairros adjacentes (MOREIRA et al., 2021). A elevada intensidade da ICU nos bairros da Imbiribeira e de Ipsep é um exemplo disto.

O Parque dos Manguezais (I) apresentou a menor intensidade de ICU na Área C. Por estar localizado no bairro do Pina, este parque contribuiu para amenizar o valor médio da ICU neste

no período seco, assim como Anjos e Lopes (2017) identificaram em Aracajú. Neste período o vento também se apresentou mais constante, com menor frequência de calmarias, e com maior frequência da classe de velocidade do vento acima de 3,0 m/s. No período chuvoso a velocidade do vento foi reduzida, apresentando maior frequência entre 1,5 e 2,0 m/s.

Apesar da ICU média mensal ter se apresentado mais amena no período seco, ela não pode ser negligenciada. Medeiros (2018) mostra que os meses de agosto a dezembro apresentam a maior incidência de insolação nesta cidade. Apesar das médias mensais de ICU serem inferiores nos meses secos, estes meses apresentam maior ocorrência de outliers. Além disto, é importante estar atento às tendências climáticas em diversas escalas que influenciam a sazonalidade nesta cidade e ao aumento da ICU em ambos os períodos.

Guedes e Silva (2020) alertam para uma tendência na redução persistente da umidade relativa do ar no Recife; maior tendência de aumento de período de estiagem, veranicos e ondas de calor mais intensas do que nas décadas anteriores; deslocamento positivo do aquecimento padrão da temperatura; e noites mais quentes, sobretudo durante a primavera.

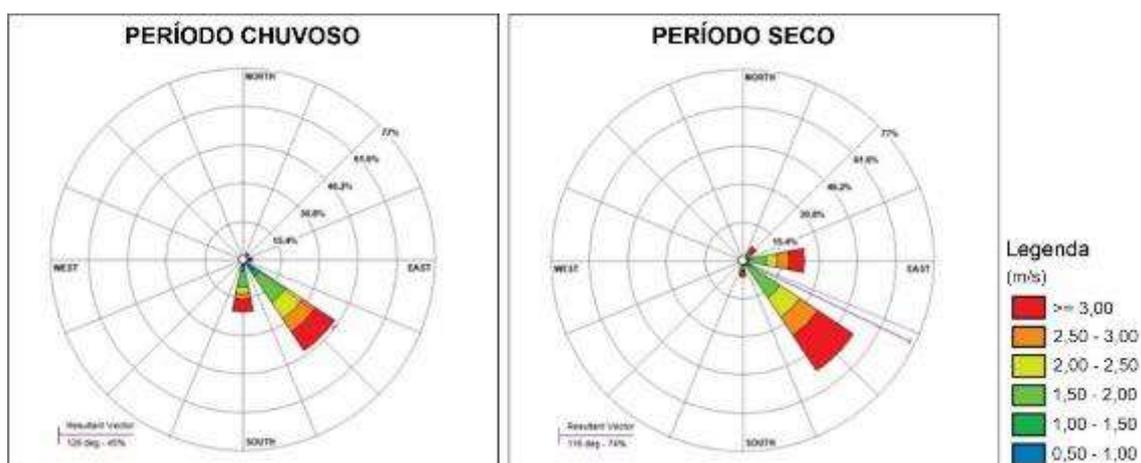


Figura 18. Gráficos de rosa dos ventos para o período chuvoso (esquerda) e período seco (direita) na cidade do Recife. Fonte: INMET | Fonte: os autores.

Medeiros (2020) também aponta resultados similares aos de Guedes e Silva (2020) e adiciona a ocorrência de um deslocamento dos meses chuvosos desta cidade; tendência negativa de intensidade do vento, tanto reais quanto previstas para daqui a 5 e 10 anos; madrugadas mais quentes; aumento da insolação; e redução significativa da umidade relativa tanto atuais quanto para daqui a 5 e 10 anos.

Assim, os valores da intensidade relativa de ICU mostraram que as classes “extremamente fortes”, e conseqüentemente os dias representativos estudados, ocorreram principalmente em momentos de maior estiagem em ambos os períodos. Estas tendências climáticas no Recife apontadas por Medeiros (2020) e por Guedes e Silva (2020) e listadas acima chamam atenção por propiciarem um cenário favorável para o aumento da frequência e da intensidade da ICU em Recife em ambos os períodos.

A variabilidade horária mostra que a ICU no Recife é predominantemente noturna, em geral, entre as 19h e 5h. Apesar da maior intensidade noturna, o comportamento diurno registrado pelos TH não pode ser ignorado: O TH05 (Ipsep), apresentou ICU diurna média de 2 °C às 12:00 da tarde no período chuvoso. O TH06 (Aflitos), também apresentou configuração diurna de ICU, registrando média de 2 °C às 14:00 do período seco. Em contrapartida, o TH03 (Boa Viagem) apresentou ilha de frescor bem definida entre 8h e 16h (período seco) e 9h e 14h (período chuvoso).

O TH03, localizado na linha de costa, apresentou maior ilha de frescor no período diurno. Neste caso, seu efeito se deve à sua proximidade com o mar, este TH está instalado próximo a uma avenida de elevado fluxo e em uma paisagem densamente verticalizada e elevada quantidade de superfície impermeabilizada, ademais, a temperatura da superfície do mar é mais elevada no período noturno. O conjunto destes fatores pode ser o responsável pela ICU intensa no período noturno no TH03 (com configuração similar e até mais intensa do que a registrada no centro da cidade pelo TH04) e à elevada variabilidade horária neste ponto. A elevada variabilidade horária da ICU, com formação de ilhas de frescor diurna, em pontos localizados na linha de costa também foi discutida por Brito (2016) na cidade de Fortaleza/CE e por Anjos e Lopes (2017) na cidade de Aracajú, os quais atribuem as ilhas de frescor identificadas nos parques da cidade de Aracajú/SE, à variabilidade do vento.

4. Considerações finais

Três principais áreas de ocorrência intensa de ICU em Recife foram identificadas. A primeira coincide com os limites da RPA01, contendo o centro histórico e comercial da cidade; a segunda localiza-se na Zona Norte (na RPA03) e contém todos os bairros contemplados pela Lei dos Doze Bairros; e a terceira corresponde aos bairros de Boa Viagem, Pina, Imbiribeira, Ipsep e parte do bairro do Iburá, pertencentes à RPA06 e adjacentes à orla marítima da cidade.

Apesar da ICU ser um fenômeno principalmente noturno, o estudo identificou a sua ocorrência nos horários vespertinos, com magnitudes predominantes de fraca a moderada. As ilhas de frescor ocorrem principalmente nos horários matutinos. Sazonalmente, o período chuvoso apresentou ICU mais intensas. Apesar disto período seco chama atenção por apresentar a maior incidência de insolação. Comparando os resultados dos dias representativos, a ICU se desenvolveu mais rapidamente no período chuvoso, apresentando núcleos bem definidos de ICU “muito forte” logo após o pôr-do-sol. No período seco, estes núcleos só se destacaram a partir da meia noite e o horário de maior intensidade da ICU na cidade é durante a madrugada (próximo às 2 horas da manhã).

O presente estudo encoraja as pesquisas futuras a procurarem formas de refinar a modelagem espacial da ICU a partir da obtenção de uma rede maior de pontos de coletas de dados climáticos e transectos móveis. Além disto, os resultados obtidos podem embasar análises voltadas ao planejamento urbano e avançar na construção de estratégias de adaptação e mitigação do impacto da ICU sobre a cidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (Facepe).

Referências

AMORIM, M. C. C. T. **Ilhas de Calor Urbanas: Métodos e Técnicas de Análise**. Revista Brasileira de Climatologia, 2019. v. 18, n. edição especial, p. 361–376. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v0i0.65136>>.

_____; DUBREUIL, V. Intensity of urban heat islands in tropical and temperate climates. **Climate**, 2017. v. 5, n. 4, p. 1–13. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2225-1154/5/4/91>>.

AMORIM, M. C. De C. T. Daily evolution of urban heat islands in a Brazilian tropical continental climate during dry and rainy periods. **Urban Climate**, dez. 2020. v. 34, n. July, p. 100715. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100715>>.

ANJOS, M.; LOPES, A. Urban Heat Island and Park Cool Island intensities in the coastal city of Aracaju, North-Eastern Brazil. **Sustainability**, 2017. v. 9, n. 8, p. 1379. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su9081379>>.

ANJOS, R. S.; WANDERLEY, L. S. De A.; NÓBREGA, R. S. Análise espacial da precipitação e possíveis fatores que contribuem para sua espacialização em Recife-PE. **Revista Brasileira de**

Geografia Física, v. 13, n. 1, p. 018., 2020 Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/242040>>.

BRITO, L. S. D. O. **Estudo de Ilha de Calor na Região Metropolitana de Fortaleza utilizando o modelo WRF**. [S.l.]: 2016. 90 p. Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2016.

DUBREUIL, V. et al. Fréquence et intensité des îlots de chaleur à rennes : bilan de 16 années d'observations (2004-2019). **Climatologie**, v. 17, p. 6., 2020 Disponível em: <<https://climatology.edpsciences.org/10.1051/climat/202017006>>.

DUBREUIL, V.; MONTGOBERT, M.; PLANCHON, O. Une méthode d'interpolation des températures de l'air en Bretagne : combinaison des paramètres géographiques et des mesures infrarouge NOAA - AVHRR. **Hommes et Terres du Nord**, v. 1, n. 1, p. 26–39, 2002. Disponível em: <https://www.persee.fr/doc/htn_0018-439x_2002_num_1_1_2795>.

FERNÁNDEZ GARCÍA, F. **Manual de Climatología aplicada. Clima, medio ambiente y planificación**. 1. ed. Madrid: Espacios Y Sociedades, 1996. V. 2.

FOISSARD, X.; DUBREUIL, V.; QUÉNOL, H. Defining scales of the land use effect to map the urban heat island in a mid-size European city: Rennes (France). **Urban Climate**, v. 29, 2018, p. 100490. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212095518300877>>.

FOISSARD, Xavier. **L'îlot de chaleur urbain et le changement climatique : application à l'agglomération rennaise**. [S.l.]: 2016. 248 p. Tese (Doutorado). Géographie, Université Rennes 2, Rennes, 2016. Disponível em: <<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01381999>>.

GUEDES, R. V. De S.; SILVA, T. L. Do V. Análise Descritiva da Precipitação, Temperatura, Umidade e Tendências Climáticas no Recife - PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 07, p. 3234, 2020. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/246169>>.

IBGE. Recife (PE), **Cidades e Estados**. 2020. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe/recife.html>>. Acesso em: 22 maio 2021.

The energetic basis of the urban heat island

JONGTANOM, Y.; KOSITANONT, C.; BAULERT, S. Temporal Variations of Urban Heat Island Intensity in Three Major Cities, Thailand. **Modern Applied Science**, v. 5, n. 5, p. 105–110., 2011 Disponível em: <<http://www.ccsenet.org/journal/index.php/mas/article/view/11148>>.

KHAN, A.; CHATTERJEE, S.; WENG, Y. **Context and background of urban heat island. Urban Heat Island Modeling for Tropical Climates**. [S.l.]: Elsevier, 2021, p. 1–35.

LI, D. et al. Urban heat island: Aerodynamics or imperviousness? **Science Advances**, v. 5, n. 4, p. 4299, 2019. Disponível em: <<https://advances.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/sciadv.aau4299>>.

MEDEIROS, R. M. Insolação decadal para o município de Recife - PE, Brasil. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 12, n. 2, p. 124–137, 2018. Disponível em: <<https://revista.ufr.br/rga/article/view/5269>>.

_____. Impactos e variabilidade no clima urbano de Recife - PE (Brasil). **OKARA: Geografia em debate**, 7 maio. 2020. p. 21–40. Disponível em: <<https://periodicos.ufpb.br/index.php/okara/article/view/43687>>.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Texto, 2007.

MOREIRA, A. B. et al. O Fator de Visão do Céu e o clima urbano na cidade do Recife - PE/ Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 28, p. 28–47, 2021. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v28i0.71518>>.

OKE, T. R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. **Journal of Climatology**, v. 1, n. 3, p. 237–254, 1981. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/joc.3370010304>>.

_____. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 108, n. 455, p. 1–24, 1982. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/qj.49710845502>>.

_____ et al. **Urban Climates**. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.

SOUZA, W. M.; AZEVEDO, P. V. De; ARAÚJO, L. E. De. Classificação da Precipitação Diária e Impactos Decorrentes dos Desastres Associados às Chuvas na Cidade do Recife-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 2, p. 250, 2012. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/232788>>.

STEWART, I. D. A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 2, p. 200–217, 2011. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/joc.2141>>.

_____; OKE, T. R. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 12, p. 1879–1900, 2012. Disponível em: <<https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>>.

TEIXEIRA, A. F. D. M.; QUINTAS NETO, A. P. Privatização do acesso aos ventos marítimos: O caso do bairro Boa Viagem - Recife/PE. **Revista Movimentos Sociais e Dinâmicas Espaciais**, v. 7, n. 1, p. 142–157, 2018. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistamseu/article/view/237715>>.

WANDERLEY, L. S. A. et al. As chuvas na cidade do Recife: Uma climatologia de extremos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, p. 149–164, 2018. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/56034>>.

WU, X.; ZHANG, L.; ZANG, S. Examining seasonal effect of urban heat island in a coastal city. **PLOS ONE**, v. 14, n. 6, p. e0217850, 2019. Disponível em: <<https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0217850>>.

ZHOU, B. **On the assessment of surface urban heat island: size, urban form, and seasonality**. [S.l.]: 2017. 136 p. Tese (Doutorado), Institut für Erd- und Umweltwissenschaften, Universität Potsdam, Postdam, 2017. Disponível em: <<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:kobv:517-opus4-404383>>.