

Conforto térmico em aglomerados subnormais na cidade de São Luís - Maranhão

Thermal comfort in subnormal agglomerates in the city of São Luís - Maranhão

Comodidad térmica en aglomerados subnormales en la ciudad de São Luís - Maranhão

Recebido: 30/05/2022 | Revisado: 09/06/2022 | Aceito: 12/06/2022 | Publicado: 25/06/2022

Juliete Baraúna Monteiro

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4233-4899>
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil
E-mail: juhbarauna@gmail.com

Dimas de Barros Santiago

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7118-8467>
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil
E-mail: dimas.barros91@gmail.com

Resumo

Esta pesquisa teve o objetivo de avaliar o conforto térmico humano em dois aglomerados informais da cidade de São Luís – Maranhão no ano de 2020, período caracterizado por medidas de isolamento e distanciamento físico. Para mensurar as zonas térmicas de conforto dos habitantes locais foi usado o método horário de graus-dia por meio das equações de DeDear e Brager e Humphreys, e o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) e a Temperatura de Superfície Terrestre (TST), obtidos por meio de imagens orbitais. Os resultados dessas equações apontam que não houve necessidade de resfriamento em nenhum dia do ano analisado. Na maior parte do período os dias foram caracterizados com zona térmica confortável, com destaque para alguns dias com necessidade de aumento da temperatura do ar para melhorar a sensação térmica de conforto na área urbana de São Luís. No entanto, os resultados da distribuição espacial da TST mostram altas temperaturas próximas de 30°C (graus Celsius) nas áreas de adensamento urbano, confirmado pelo mapeamento do uso e da cobertura do solo da região, obtido por meio do NDVI. Esses altos valores ocorrem devido às mudanças locais ocorridas com o uso de materiais construtivos que absorvem boa parte da energia radiante e aquece os ambientes residenciais, causando sensações térmicas desconfortáveis. Nessas áreas se faz necessário a adoção de medidas de amenização térmica para que o ambiente se torne mais confortável.

Palavras-chave: Conforto térmico; Graus-dia; Aglomerados subnormais; Sensoriamento remoto.

Abstract

This research aimed to evaluate human thermal comfort in two informal settlements in the city of São Luís - Maranhão in 2020, a period characterized by measures of isolation and physical distancing. To measure the thermal comfort zones of the local inhabitants, the hourly method of degrees-day was used through the equations of DeDear and Brager and Humphreys, and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Terrestrial Surface Temperature (TST), obtained by through orbital imaging. The results of these equations indicate that there was no need for cooling on any day of the year analyzed. For most of the period, the days were characterized by a comfortable thermal zone, with emphasis on some days with the need to increase the air temperature to improve the thermal sensation of comfort in the urban area of São Luís. However, the results of the spatial distribution of the TST show high temperatures close to 30°C (degrees Celsius) in areas of urban densification, confirmed by the mapping of land use and land cover in the region, obtained through the NDVI. These high values are due to the local changes that have taken place with the use of building materials that absorb much of the radiant energy and heat up residential environments, causing uncomfortable thermal sensations. In these areas it is necessary to adopt measures of thermal attenuation so that the environment becomes more comfortable.

Keywords: Thermal comfort; Degree-days; Subnormal clusters; Remote sensing.

Resumen

Esta investigación tuvo como objetivo evaluar el confort térmico humano en dos asentamientos informales en la ciudad de São Luís - Maranhão en 2020, período caracterizado por medidas de aislamiento y distanciamiento físico. Para medir las zonas de confort térmico de los habitantes locales se utilizó el método horario de grados-día a través de las ecuaciones de DeDear y Brager y Humphreys, y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y la Temperatura Superficial Terrestre (TST), obtenidos por a través de imágenes orbitales. Los resultados de estas ecuaciones indican que no hubo necesidad de refrigeración en ningún día del año analizado. Durante la mayor parte del período, los días se caracterizaron por una zona térmica comfortable, con énfasis en algunos días con la necesidad de aumentar la temperatura del aire para mejorar la sensación térmica de confort en el área urbana de São Luís. Sin embargo, los resultados de la distribución espacial de la TST muestran altas temperaturas cercanas a los 30°C (grados Celsius) en áreas de densificación urbana, confirmado por el mapeo de uso y cobertura del suelo en la región, obtenido a través del NDVI. Estos altos valores se deben a los cambios locales que se han producido con el uso de materiales de construcción que

absorben gran parte de la energía radiante y calientan los ambientes residenciales, provocando sensaciones térmicas incómodas. En estas zonas es necesario adoptar medidas de atenuación térmica para que el ambiente sea más comfortable.

Palabras clave: Comodidad térmica; Grados-día; Conglomerados subnormales; Detección remota.

1. Introdução

Segundo um levantamento do MapBiomias realizado em todo o Brasil para o período de 1985 a 2020, as áreas urbanizadas dobraram de tamanho e as áreas informais cresceram de maneira que hoje o país possui mais 5.127.747 domicílios localizados em aglomerados subnormais, distribuídos em mais de 734 municípios. Dentre os estados brasileiros, Maranhão ocupa a quarta posição em expansão de área urbana informal. São Luís, capital do estado, está classificada como a quarta capital brasileira com o avanço de áreas invadidas (30,9% do total de expansão territorial no estado). São Luís apresenta a maior quantidade de aglomerados subnormais do estado do Maranhão, total 39 unidades territoriais (MapBiomias, 2021). Considerando os aglomerados subnormais existentes no Brasil e especificamente na região Nordeste, e também os dados disponíveis para investigação deste tipo de estudo, a cidade de São Luís – Maranhão foi selecionada como local de análise da presente pesquisa.

Esses números referentes à cidade de São Luís significam que, especificamente em 2020, em meio à pandemia do novo coronavírus, cerca de três em cada dez imóveis onde moravam pessoas na capital maranhense estavam em locais de periferia. Esses locais de informalidade estão inseridos em uma região de clima quente e úmido e apresentam muitos problemas socioeconômicos tais como, alta densidade populacional, padrão urbanístico irregular, habitações construídas com materiais inadequados, sem ou pouca ventilação natural, reduzida ou nenhuma vegetação e carência de abastecimento de água, de fornecimento de energia, de coleta de lixo, entre outros. Esses ambientes residenciais normalmente são áreas pequenas que apresentam acúmulo de pessoas e intenso desconforto térmico em relação ao calor. Esse fator da percepção térmica impacta na saúde e bem-estar e dificulta a permanência das pessoas no interior das habitações (Coury et al., 2020).

As condições de conforto e/ou desconforto térmico sentidas pelos habitantes dessas áreas informais podem ser identificadas por meio de dezenas de índices de conforto adaptativo (equações matemáticas) (Pereira & Assis, 2010). No presente estudo foi adotado o método horário de graus-dia usado para identificar o número de graus pelos quais a temperatura do ar de um local esteve acima ou abaixo de uma temperatura limite (temperatura de referência). A temperatura de referência é uma temperatura de ponto de equilíbrio onde não se faz necessário nenhum ajuste para manter as condições térmicas de conforto (Buyukalaca et al., 2001; CIBSE, 2006; Vendramin et al., 2009; Pasa & Braghini, 2010; Mourshed, 2012; Lee et al., 2014; Azevedo et al., 2015; Spinoni et al., 2015; Stensjö et al., 2017; Spinoni et al., 2018; Liu et al., 2020). Essas condições térmicas também podem ser identificadas espacialmente por meio de técnicas de sensoriamento remoto, através da temperatura de superfície terrestre associada ao Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (Santos et al., 2016; Santiago, 2017; Prado & Silva, 2020). Essa associação possibilita a avaliação entre as modificações na ocupação do solo e a variação da temperatura local (Pereira dos Santos et al., 2020; Batista et al., 2021), visto que a substituição de áreas nativas em construções urbanas altera a temperatura local e interfere no conforto do ambiente para as pessoas residentes.

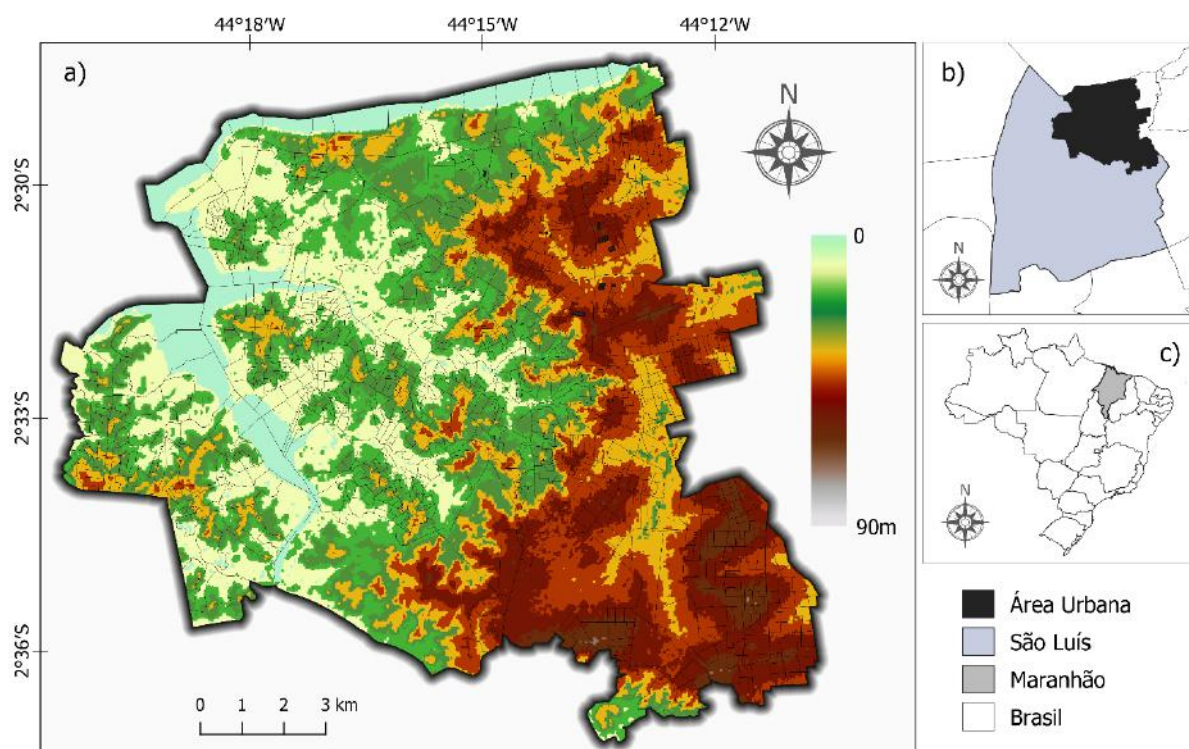
Coury, Pereira e Masiero (2020) afirmam que normalmente os estudos climatológicos urbanos restringem-se às áreas de urbanização formal, onde são priorizados os centros urbanos, as áreas públicas e de lazer e os condomínios residenciais. Posto isso, esta pesquisa justifica-se pelo desejo de caracterizar termicamente locais informais e teve como objetivo avaliar conforto térmico humano em dois aglomerados informais da cidade de São Luís – Maranhão, em um estudo de caso para o ano de 2020, período caracterizado por medidas de isolamento e distanciamento físico. Essa avaliação da necessidade térmica específica ocorreu por meio de duas abordagens, primeiro utilizando faixas de conforto térmico definidas por meio de modelagem adaptativa resultante do método de graus-dia, e por meio da temperatura de superfície e do Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), calculados a partir de imagens orbitais.

2. Metodologia

2.1 Área de Estudo

São Luís, localidade objeto deste estudo e apresentada na Figura 1, é um município localizado na ilha Upaon-Açu no Oceano Atlântico, ao norte do estado do Maranhão na Região Nordeste do Brasil. Esse município tem uma área de 831,7 km², ocupando mais da metade da ilha de São Luís (57 por cento). É o município mais populoso do Maranhão e o quarto da Região Nordeste, com uma população estimada em mais de 1 108 975 habitantes, dividida em pouco mais de 100 bairros (incluindo as subdivisões dos bairros, palafitas e favelas) em uma área de 283 km² de perímetro urbano.

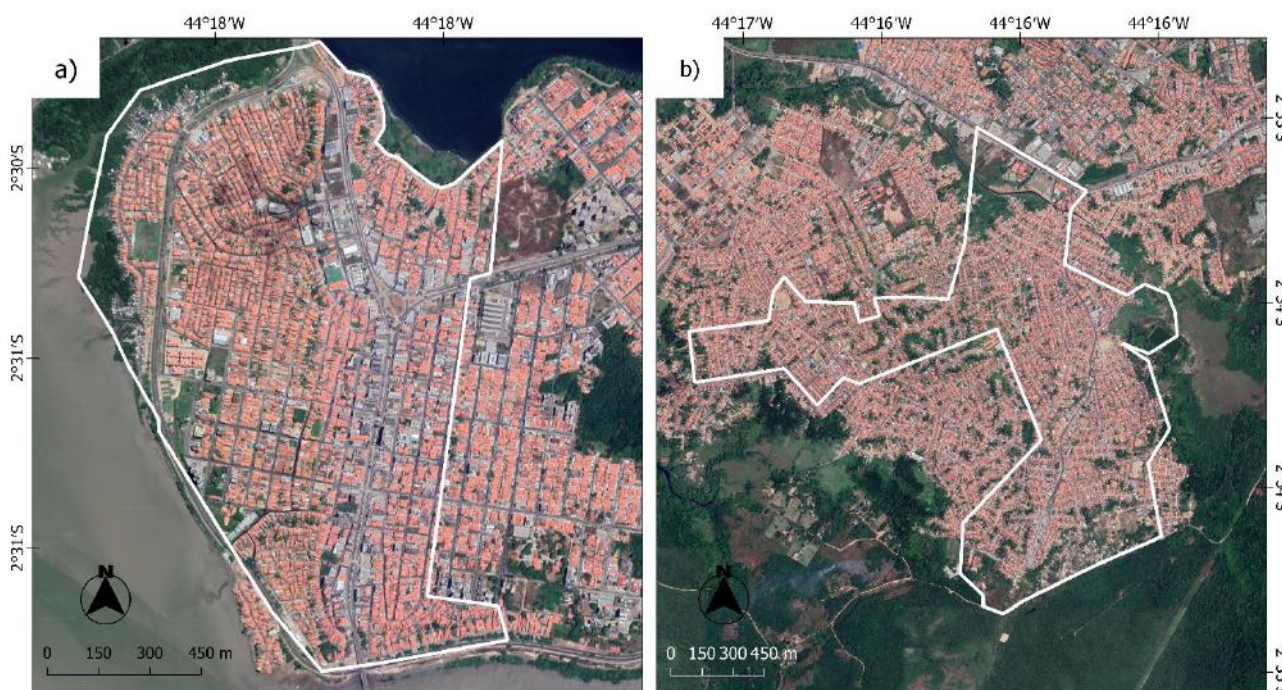
Figura 1. Localização geográfica e elevação topográfica da área de estudo (área urbana de São Luís a), situado na porção nordeste da cidade de São Luís b) e inserido no estado do Maranhão c).



Fonte: Autores (2022). Fonte de dados SRTM: Weber et al. (2004).

A exemplo dos grandes centros urbanos do país, São Luís também apresenta muitos aglomerados subnormais localizados nas áreas centrais e periféricas. Dentre os aglomerados existentes na malha urbana do município foram analisadas especificamente as comunidades Ilhinha (Figura 2a) e Coroadinho (Figura 2b), por serem comunidades caracterizadas por ruas estreitas e mal planejadas e com muitas casas de madeira e alvenaria. Com origem sem planejamento urbano, a área da Ilhinha é um aglomerado localizado em área de mangue local na ponta do bairro São Francisco. Esse aglomerado possui mais de 6.9 mil pessoas residindo em mais de 1.8 mil domicílios, caracterizados em sua grande maioria por construções irregulares sem espaçamento do tipo palafitas (IBGE, 2010). Coroadinho é uma comunidade com uma população de mais 53.945 pessoas residindo em mais 14.278 domicílios, e apresenta áreas de risco, loteamentos sem infraestrutura e ocupação de áreas de proteção ambiental (Aires et al., 2015).

Figura 2. Localização geográfica dos bairros São Francisco a) e Coroadinho b) na cidade de São Luís – Maranhão.



Fonte: Autores (2022). Fonte de dados: Google Earth.

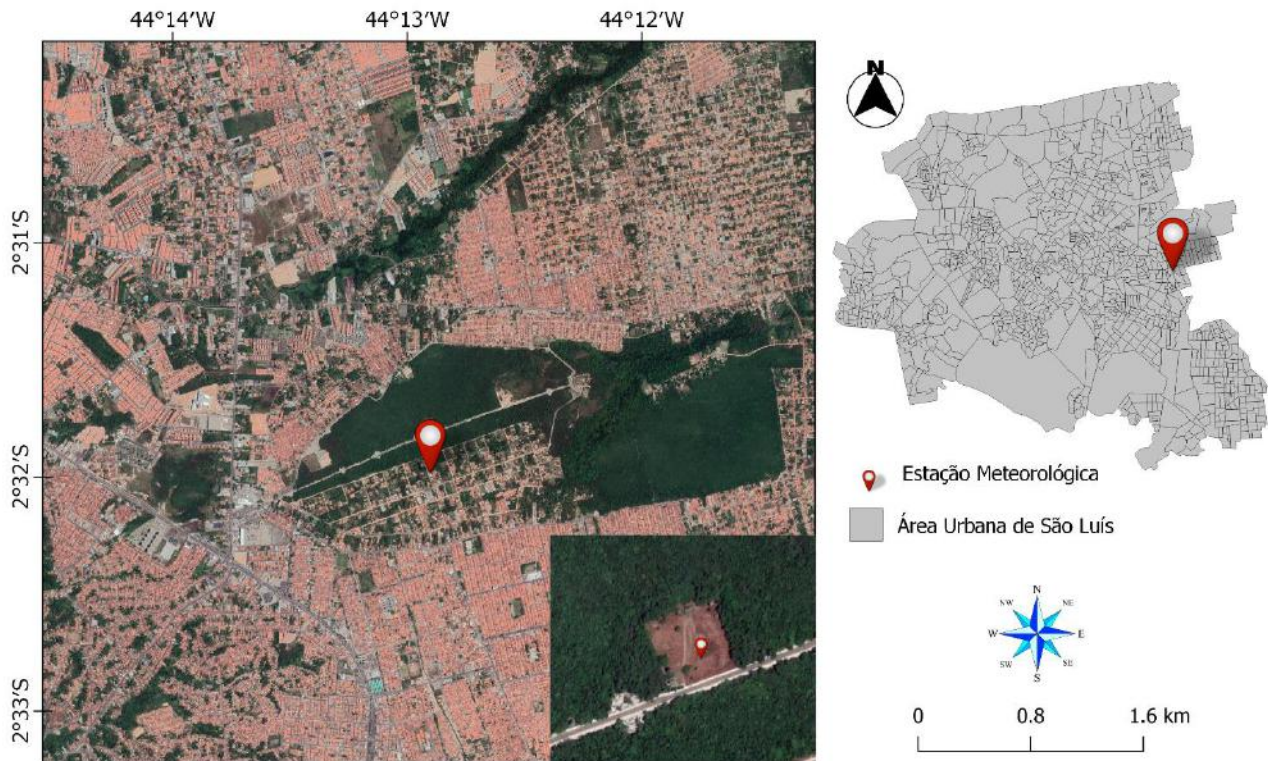
Essas comunidades estão inseridas em uma área que apresenta condições climáticas com características tropicais de tempo quente e úmido com temperatura média do ar de 26 °C (graus Celsius) e umidade relativa do ar 82, 8%, segundo os registros do INMET (2018), normais climatológicas (1981-2010) da temperatura média do ar e umidade relativa do ar para a cidade de São Luís – Maranhão (INMET, 2018).

2.2 Dados

2.2.1 Aquisição e Tratamento dos Dados de Estações

Para caracterizar as faixas de conforto térmico adaptativo foram usados dados horários de temperatura do ar (°C) da Estação Meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para o período de 01 de janeiro a 31 de dezembro de 2020. A estação está localizada dentro da Reserva do Itapiracó que faz parte da Área de Proteção Ambiental do Itapiracó, uma área de 322 hectares com cobertura vegetal enquadrada dentro da formação do bioma amazônico inserida na área urbana da Região Metropolitana de São Luís, como apresenta a Figura 3.

Figura 3. Localização geográfica da Estação Meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), inserida dentro da Reserva do Itapiracó em São Luís – Maranhão.



Fonte: Autores (2022). Fonte de dados: Google Earth.

Com os dados horários de temperatura do ar foram calculados os valores de temperaturas neutras (T_n) pelo modelo adaptativo de DeDear e Brager (DeDear & Brager, 2002) (Equação 1) e também por meio da equação de Humphreys (Humphreys, 1978), descrita na Equação 2. Essas equações são apontadas com melhor aplicabilidade para cidades de climas quentes e boa aproximação com os limites de conforto estudados para o Brasil (Pereira & Assis, 2010; Ferreira & Souza, 2013).

$$T_n = 0.310 \times T_e + 17.8 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

Em que T_n é a temperatura de neutralidade e a T_e é a temperatura medida na hora i .

$$T_n = 0.534 \times T_e + 12.9 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2)$$

Com os valores de temperatura neutra foram calculados os valores de temperatura base (referência de limite de frio e calor). Somando ou subtraindo 2,5 °C da temperatura neutra (T_n) calculada pela Equação 1, e somando ou subtraindo 2 °C da temperatura neutra (T_n) calculada pela Equação 2. Se as condições de umidade relativa forem elevadas (acima de 70%), somar ou subtrair 1°C temperatura neutra (T_n) calculada pela Equação 2.

Posteriormente, foram somadas as diferenças positivas entre a temperatura base calculada (T_b) e a temperatura horária registrada (T_i), configurando em graus-hora. Os graus-hora cumulativos de um dia foram divididos por 24 (vinte e quatro) para obter os graus-hora médios chamados graus-dia de aquecimento (Equação 3) e de resfriamento (Equação 4) (CIBSE 2006; Mourshed, 2012).

$$GDA_d = [\sum_{i=1}^{24}(T_b - T_i)^+] \div 24 \quad (3)$$

Em que GDA_d é graus-dia de aquecimento diário para um dia; T_b é a temperatura base calculada na hora i ; T_i é a temperatura medida na hora i , e o símbolo subscripto (+) indica que apenas diferenças positivas entre T_b e T_i são levadas em consideração.

$$GDR_d = [\sum_{i=1}^{24} (T_i - T_b)^+] \div 24 \quad (4)$$

Em que GDR_d é graus-dia de resfriamento diário para um dia.

Foi calculado o graus-dia de aquecimento (GDA) (Equação 3) para medir o quanto (magnitude em graus) e por quanto tempo (duração em dias) a temperatura do ar ficou abaixo do nível de referência, e o graus-dia de resfriamento (GDR) (Equação 4) para medir o quanto a temperatura esteve mais alta do que a temperatura base específica (temperatura de referência). Como aplicado no estudo de Pereira e Assis (2010), também foram definidas zonas de leve desconforto térmico por calor e frio, somando ou subtraindo 4 °C (Humphreys, 1978) e 3,5 °C (DeDear & Brager, 2002), conforme dados da Tabela 1.

Tabela 1. Classificação da temperatura do ar em função da sensação térmica.

Faixa de Temperatura	Sensação Térmica
$T < T_n - 4 \text{ °C}$	Desconforto por frio
$T < T_n - 2 \text{ °C}$	Pouco frio
$T_n - 2 \text{ °C} < T < T_n + 2 \text{ °C}$	Zona de conforto
$T > T_n + 2 \text{ °C}$	Pouco calor
$T > T_n + 4 \text{ °C}$	Desconforto por calor

Fonte: Pereira e Assis (2010).

2.2.2 Aquisição e Tratamento dos Dados orbitais

Para o cálculo da temperatura de superfície foi utilizada uma imagem do sistema-sensores Landsat – 8, Operational Land Imager (OLI), adquirida a partir do endereço eletrônico <https://earthexplorer.usgs.gov/>, gerenciado pela *United States Geological Survey* – USGS (USGS, 2022). A imagem é referente à órbita 221 e ponto 62 com o mínimo de presença de nuvens sobre a área de estudo e datada de 17 de agosto de 2020. A área de estudo foi delimitada na imagem com o *software Quantum GIS* Versão 3.4-6. Posteriormente, foram realizados os seguintes processos digitais: 1) pré-processamento, correção atmosférica e realce; 2) manipulação; 3) conversão dos números digitais (ND) em radiâncias e reflectâncias monocromáticas e 4) extração dos valores do NDVI e TST.

2.2.2.1 Obtenção dos Índices NDVI e TST

Inicialmente foi feito o pré-processamento das bandas obtidas do Landsat-8, convertendo os números digitais (ND) em radiâncias e reflectâncias monocromáticas. A conversão do ND em radiância espectral do topo da atmosfera (TOA) foi obtida pela Equação 5 (Allen et al., 2002):

$$\rho_{\lambda i}' = a_i + \frac{b_i - a_i}{65535} * ND \quad (5)$$

Em que, a e b são as radiâncias espectrais mínima e máxima ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$), conforme a Tabela 2, detectadas pelo OLI da série Landsat, a_i corresponde a banda 10 (banda termal) do sensor Thermal Infrared Sensor (TIRS) do Landsat 8.

Tabela 2. Bandas espectrais e suas respectivas características.

Banda	Comprimento de Onda	Coeficientes de Calibração	
		a_i	b_i
Band 4 – Vermelha	0.636 – 0.673	-51.54	624.17
Band 5 – Infravermelho Próximo (NIR)	0.851 – 0.879	-31.54	381.96
Bands 10 – Infravermelho Termal (TIRS 1)	10.600 – 12.510	0.10	22.00

Fonte: NASA (2020).

Após a extração da calibração radiométrica, foi calculado a reflectância monocromática de cada banda ($\rho_{\lambda i}$), obtida pela razão entre o fluxo de radiação solar refletido pela superfície e o fluxo de radiação solar global incidente, calculada pela Equação 6 (Allen et al., 2002):

$$\rho_{\lambda i} = \frac{\pi * L_{\lambda i}}{ESUN_{\lambda i} * \cos\theta * d_r} \quad (6)$$

Onde $L_{\lambda i}$ é a radiância espectral de cada banda, $ESUN_{\lambda i}$ é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera em ($W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$), $\cos\theta$ é o ângulo zenital solar e d_r é a razão entre a distância média Terra-Sol (r_0) e a distância Terra-Sol (r) em dado dia do ano (JD), que de acordo com Iqbal (1983), é dada pela Equação 7:

$$D_r = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = 1.000110 + 0.034221 * \cos\Gamma + 0,001280 * \sen\Gamma + 0.000719 * \cos2\Gamma + 0.000077 * \sen2\Gamma \quad (7)$$

Onde: $\Gamma = 360((JD - 1)/365)$. JD : é o dia Juliano (contagem sucessiva de dias a partir do dia 1° de janeiro de cada ano).

O NDVI é obtido por meio da razão entre a diferença das refletividades do NIR (ρ_{NIR}) e do vermelho (ρ_R) pela soma das mesmas descrito na Equação 8 (Allen et al., 2002, Guha et al., 2018):

$$NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_R)}{(\rho_{NIR} + \rho_R)} \quad (8)$$

em que, ρ_{NIR} e ρ_R correspondem as bandas NIR e vermelho do Landsat 5 e 8, respectivamente. O NDVI varia entre -1 a +1. Os valores positivos correspondem as áreas com vigor vegetativo (superfície terrestre) conforme a atividade fotossintética das plantas e de sua densidade na área considerada (pixel). Os valores negativos correspondem a corpos d'água ou presença de nuvens (Santos et al., 2016; Santiago, 2017; Barros Santiago et al., 2019; Correia Filho et al., 2019; Correia Filho et al., 2021; Correia Filho et al., 2022).

Após a obtenção da radiação espectral Banda 10 do sensor TIRS1 para o Landsat-8, foi calculada a T_B pela Equação 9 (Guha et al., 2018):

$$T_B = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} - 273.15 \quad (9)$$

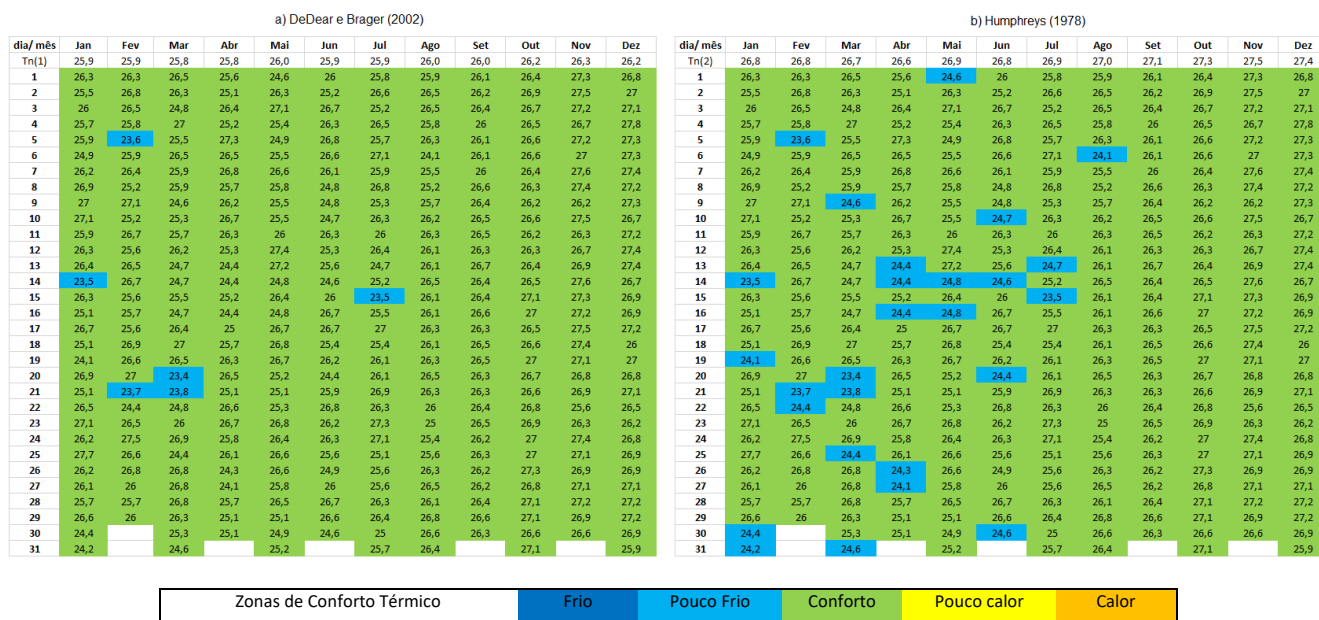
em que, T_B é a temperatura de brilho dada em Celsius ($^{\circ}C$), L_λ é a radiância espectral, K_1 e K_2 correspondem a $774.88 W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ e de $1321.08 K$, respectivamente.

3. Resultados e Discussão

3.1 Faixas de Conforto Térmico Adaptativo

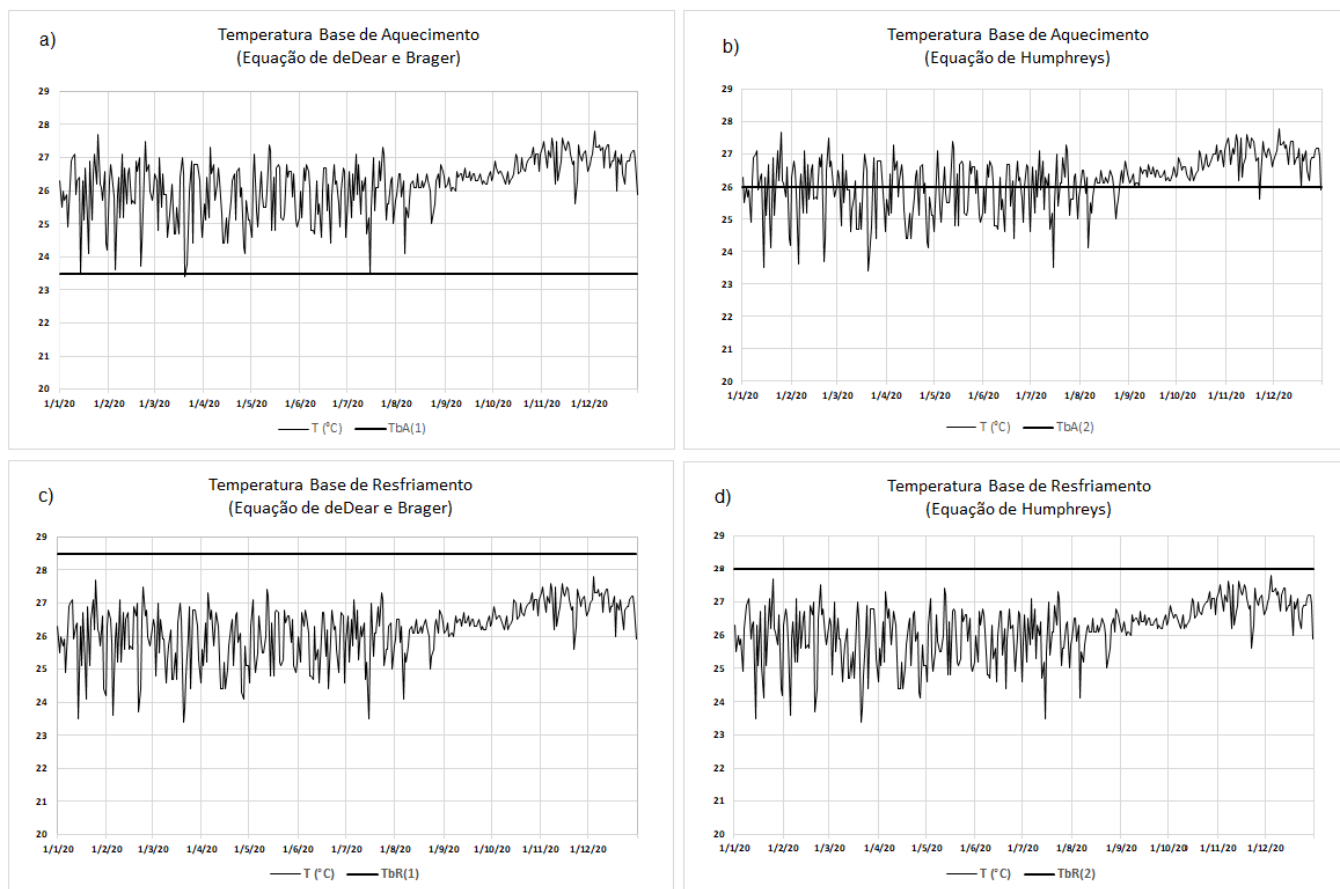
Durante o período de estudo, os valores médios diários da temperatura do ar (T_a) variaram entre 23.4 – 27.8 °C (graus Celsius) e a média anual esteve em 26.2 °C. A variação média mensal da temperatura neutra esteve entre 25.8 – 27.5 °C, a depender do valor da temperatura do ar local. Não foi adotado um valor fixo (constante) de temperatura neutra, mas sim valores variáveis calculados a partir das Equações (1) e (2). Foram identificadas somente duas zonas térmicas a partir da classificação das temperaturas diárias em função das zonas térmicas (Tabela 1). A classificação aponta resultados semelhantes nos dois índices adaptativos, vez que ambos caracterizaram a maior parte dos dias do ano como confortáveis termicamente, destacando apenas alguns poucos dias que apresentaram desconforto térmico em relação ao frio (pouco frio), mostrado na Figura 4.

Figura 4. Classificação das temperaturas diárias da cidade de São Luís (MA) para o ano de 2020, de acordo com os dois índices adaptativos.



Pela equação de DeDear e Brager (DeDear & Brager, 2002), a temperatura de neutralidade apresentou média mensal de 25.9 °C, a temperatura base de aquecimento 23.4 °C (Figura 5a) e a temperatura base de resfriamento 28.4 °C (Figura 5c). Pela equação de Humphreys (Humphreys, 1978), a temperatura de neutralidade apresentou média mensal de 26.9 °C, a temperatura base de aquecimento 25.9 °C (Figura 5b) e a de resfriamento 27.9 °C (Figura 5d). Esses valores diferem dos valores adotados por Büyükalaca (2001), que em seu estudo para a Turquia admitiu a temperatura base de 18.0 °C para graus-dia de aquecimento e 22.0 °C para resfriamento; Pasa e Junior (2010), que em seu estudo para a região Sul do Brasil assumiu a temperatura base entre 20-22.0 °C para graus-dia de aquecimento e 23-25.0 °C para resfriamento; Valor et al. (2001), que adotou a temperatura base de 15.0 °C para o graus-dia de aquecimento e 21.0 °C para resfriamento em seu estudo para a Espanha. No entanto, os valores de temperatura base de resfriamento aqui encontrados equiparam-se com os valores adotados por Tselepidaki (1994), que admitiu 28.0 °C para a Grécia; e Said (1992), que assumiu 27.8 °C em seu estudo para a Arábia Saudita.

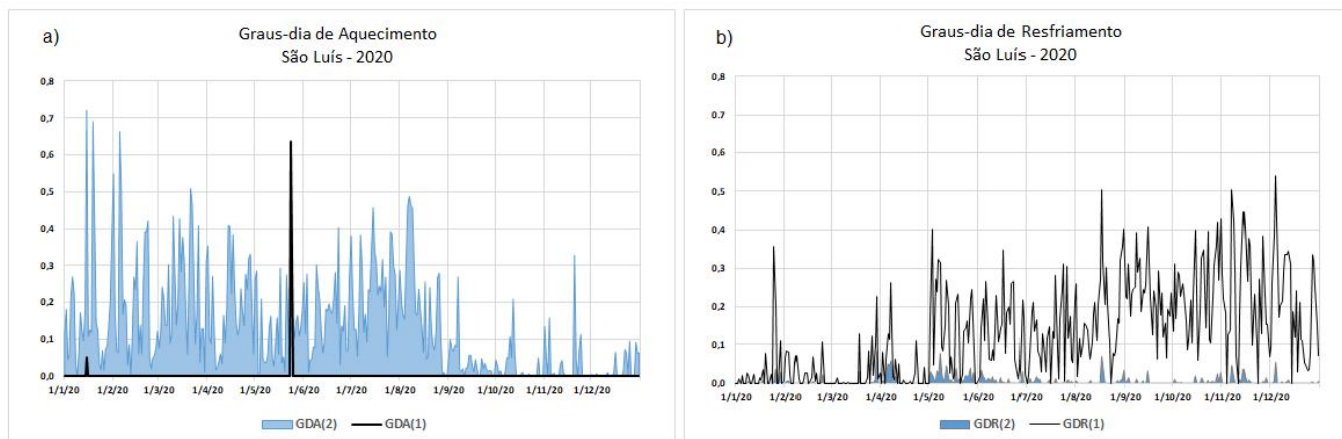
Figura 5. Variação da temperatura base de aquecimento e resfriamento definidas a partir das equações dos modelos adaptativos de DeDear & Brager a) e c) e de Humphreys b) e d) na cidade de São Luís, Maranhão para o ano de 2020.



Fonte: Autores (2022). Fonte de dados: INMET (2022, com atualização permanente).

Nota-se que a equação de Humphreys (1978) identificou a necessidade de aquecimento (GDA2) (Figura 6a) na maior parte dos dias do ano e o valor máximo foi de 0.7 °C. Ainda na figura 6a, percebe-se que o grau-dia de aquecimento (GDA1) calculado pela equação de DeDear e Brager (2002) definiu a temperatura do ar abaixo da temperatura base (referência) somente em dois dias do ano. Na Figura 6b, a equação de DeDear e Brager (2002) identificou a necessidade de resfriamento em boa parte do ano com os valores máximos a 0.6 °C, enquanto os valores máximos determinados pela equação de Humphreys (1978) foi 0.1 °C.

Figura 6. Graus-dia de aquecimento a) e de resfriamento b) a partir das equações dos modelos adaptativos de DeDear e Brager (GDA1 e GDR1) de Humphreys (GDA2 e GDR2) na cidade de São Luís, Maranhão para o ano de 2020.



Fonte: Autores (2022) Fonte de dados: INMET (2022, com atualização permanente).

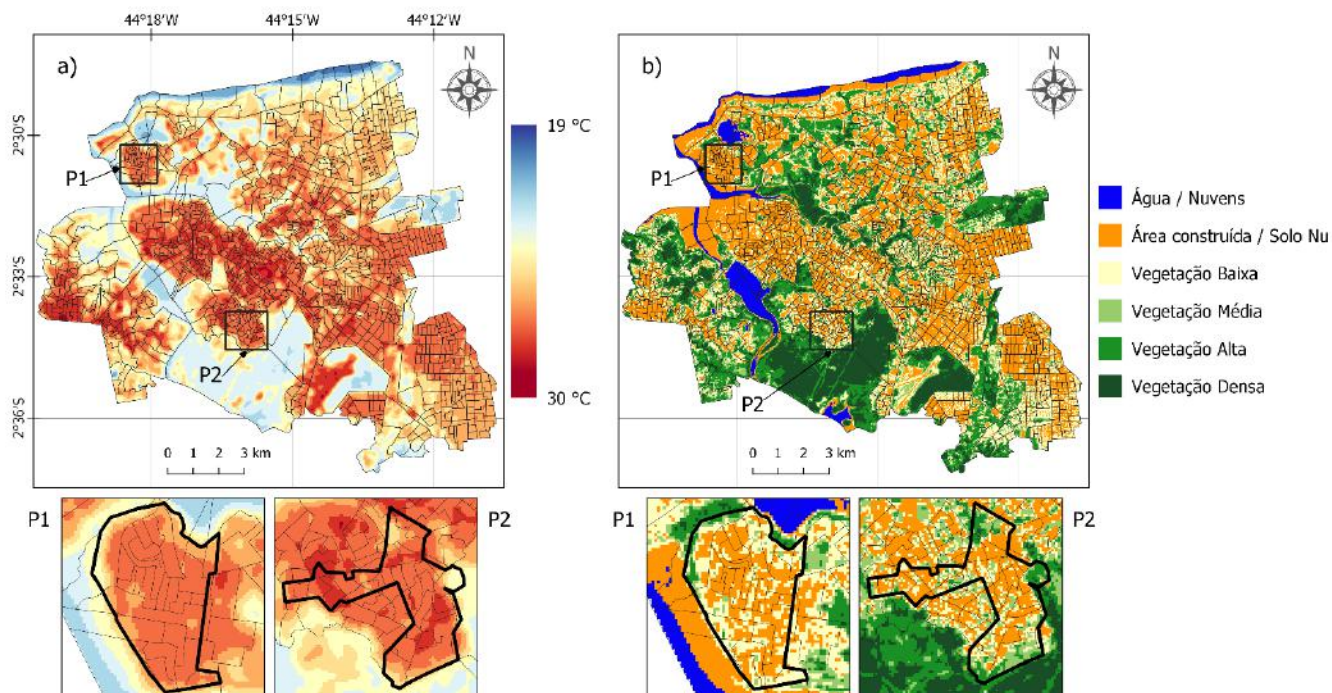
Em uma área urbana com características de altas temperaturas durante todo o ano, esperava-se obter valores mais altos quanto à necessidade de resfriamento e ao desconforto por calor; no entanto, pode-se justificar esses baixos valores de temperatura do ar pela localização da estação meteorológica na cidade. A Organização Meteorológica Mundial (OMM) estabelece normas e alturas padrões para instalação dos instrumentos meteorológicos, mas é consenso na literatura quanto aos estudos de clima urbano que para o local de instalação das estações meteorológicas deve-se buscar um local que seja um espaço livre de agentes que interfiram na coleta e comunicação de dados do equipamento, mas também que possa representar as características da área de interesse de monitoramento.

3.2 Distribuição espacial da TST e NDVI

A distribuição espacial da TST e NDVI está disposta na Figura 7, dando ênfase aos bairros São Francisco (ponto 1) e Coroadinho (ponto 2). Espacialmente, observa-se que as alterações promovidas de forma antropogênica, na tentativa de suprir as necessidades por moradias, promove a substituição de vegetação nativa por áreas de concreto, telhados e asfalto. Essas transformações aumentam a absorção de radiação solar incidente, que por sua vez resulta na redução significativa do albedo e, assim no aumento da TST (Santiago & Gomes, 2016; Correia Filho et al., 2019).

A partir disso, a Figura 7a, mostrou os maiores valores de TST na área central da malha urbana de São Luís, com valores próximos dos 30 °C. As áreas com menores temperaturas foram encontradas onde se observou áreas de vegetação densas e corpos d'água, como visto na Figura 7b. Devido a energia necessária para realizar os processos fotossintéticos, a vegetação absorve grande parte da radiação incidente, conseqüentemente as temperaturas diminuem na área local (Santos et al., 2016). Estudo realizado por Freitas et al. (2013) também encontrou as maiores médias de temperatura e também as menores taxas médias de umidade relativa do ar em locais com intenso adensamento de construções, resultados que corroboram com o presente estudo.

Figura 7. Distribuição espacial da TST a) e NDVI b) com destaque para os pontos correspondentes aos bairros São Francisco (ponto 1) e Coroadinho (ponto 2), respectivamente.



Fonte: Autores (2022).

Esses dois aglomerados possuem áreas construídas de forma desordenada, o que promove sensação de desconforto térmico para os indivíduos residentes. Oliveira et al. (2010), mencionam que estes locais promovem áreas de desconforto térmico por estarem relacionados a diferentes formas de absorção de calor dos materiais, com a emissão de calor antropogênico (veículos, indústrias, refrigeradores, entre outros), a taxa de evaporação da água e a falta de áreas verdes no perímetro urbano da cidade (Souza et al., 2012). Corroborando com Xavier et al. (2021), que menciona o fato do aumento das temperaturas efetivas na cidade de Vitória - Espírito Santo estar intimamente ligado ao processo de urbanização vivenciado pelo município. Vez que as alterações da morfologia urbana e das dinâmicas das cidades influenciam na elevação da temperatura do ar, na diminuição da umidade e consequentemente na piora da sensação de conforto térmico. Assim, vale ressaltar a importância dos estudos sobre conforto térmico e sua relação com as interferências antropogênicas e visando formas de mitigações para um melhor bem-estar populacional.

4. Conclusão

Os valores gerados pelas equações dos modelos adaptativos de DeDear e Brager e de Humphreys mostraram que existe a diferença resultante de 1.0 °C nos valores da temperatura neutra, 2.5 °C na temperatura base de aquecimento e 0.5 °C na temperatura base de resfriamento. A classificação das temperaturas diárias em função das zonas térmicas mostrou que com exceção de alguns poucos dias, não houve a necessidade de amenização da temperatura em relação ao frio e que em nenhum dia do período analisado houve desconforto térmico em relação ao calor na cidade de São Luís – Maranhão. Já quando observado a distribuição espacial da TST e NDVI, as maiores temperaturas foram encontradas em áreas de construções, visto que o material utilizado na construção absorve muita energia radiante, tornando o ambiente de moradia com sensações térmicas desconfortáveis, trazendo a necessidade de medidas de mitigações para tornar os ambientes mais confortáveis.

Como trabalhos futuros sugere-se a escolha de locais com mais dados disponíveis em uma mesma área urbana, bem como o aumento dos dados espaço-temporais para melhor identificação na variação espaço-temporal do conforto térmico humano em áreas urbanas.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão da bolsa em nível de doutorado, e ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia (UACA/CTRN) da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, pela oportunidade de realização do doutorado.

Referências

- Aires, A., Caroline, L., Correia, P. H., Panet, R. & Andréas, P. (2015). Miséria e Maré: Estudo sobre as palafitas na Comunidade da Portelinha. *Revista do CEDS*. Periódico do Centro de Estudos em Desenvolvimento Sustentável da UNDB. 3(1). <http://www.undb.edu.br/ceds/revistadocecs>.
- Allen R, Bastiaanssen W, Waters R, Tasumi M. & Trezza, R. (2002). Surface energy balance algorithms for land (SEBAL), Idaho implementation – Advanced Training and User’s Manual 2002, version 1.0, 97p.
- Azevedo, J. A., Chapman, L. & Muller, C. L. (2015). Critique and suggested modifications of the degree days methodology to enable long-term electricity consumption assessments: a case study in Birmingham, UK. *Meteorological Applications*, 22, 789–96. DOI: 10.1002/met.1525.
- Barros Santiago, D. D., Correia Filho, W. L. F., de Oliveira-Júnior, J. F., & da Silva Junior, C. A. (2019). Mathematical modeling and use of orbital products in the environmental degradation of the Araripe Forest in the Brazilian Northeast. *Modeling Earth Systems and Environment*, 5(4), 1429-1441.
- Batista, B. A., Correia Filho, W. L. F., de Oliveira-Júnior, J. F., de Barros Santiago, D., & dos Santos, C. T. (2021). Avaliação da expansão urbana na Cidade de Maceió, Alagoas–Nordeste do Brasil. *Research, Society and Development*, 10(11), e253101119537-e253101119537.
- Büyükalaca, O., Bulut, H., & Yilmaz, T. (2001). Analysis of variable-base heating and cooling degree-days for Turkey. *Applied Energy*, 69, 269 – 283.
- CIBSE - The Chartered Institution of Building Services Engineers. (2006). *Degree-days: Theory and application*. Rep. TM41, 98p.
- Correia Filho, W. L. F., de Barros Santiago, D., de Oliveira-Júnior, J. F., & da Silva Junior, C. A. (2019). Impact of urban decadal advance on land use and land cover and surface temperature in the city of Maceió, Brazil. *Land use policy*, 87, 104026.
- Correia Filho, W. L. F., de Barros Santiago, D., de Oliveira-Júnior, J. F., da Silva Junior, C. A., da Silva Oliveira, S. R., da Silva, E. B., & Teodoro, P. E. (2021). Analysis of environmental degradation in Maceió-Alagoas, Brazil via orbital sensors: a proposal for landscape intervention based on urban afforestation. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 24, 100621.
- Correia Filho, W. L. F., de Oliveira-Júnior, J. F., dos Santos, C. T. B., Batista, B. A., de Barros Santiago, D., da Silva Junior, C. A., ... & Freire, F. M. (2022). The influence of urban expansion in the socio-economic, demographic, and environmental indicators in the City of Arapiraca-Alagoas, Brazil. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 25, 100662.
- Correia Filho, W. L. F., Santiago, D. B., Oliveira Júnior, J. F., & Da Silva Junior, C. A. (2019). Impact of Urban Decadal Advance on Land Use and Land Cover and Surface Temperature in the City of Maceió, Brazil. *Land Use Policy*, 1, 1-11.
- Cury, B. S., Pereira, C. T. & Masiero, E. (2020). Revisão de estudos microclimáticos em áreas de urbanização informal: conforto térmico e a pandemia de covid-19. Simpósio Brasileiro On-line de Gestão Urbana. SBN 978-65-86753-13-4
- De Dear, R. J. & Brager, G. S. (2002). Thermal Comfort in Naturally Ventilated Buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings*, 34 (6), 549-561.
- Freitas, A. F., Melo, B. C. B., Santos, J. S. & Araújo L. E. (2013). Avaliação microclimática em dois fragmentos urbanos situados no Campus I e IV da Universidade Federal da Paraíba. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 6(4), 777-92.
- Frota, A. B. & Schiffer, S. R. (2003). *Manual de conforto térmico: arquitetura e urbanismo*. 7.ed. São Paulo: Studio Nobel.
- Guha, S., Govil, H., Dey A. & Gill, N. (2018). Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy. *Eur J Remote Sens*, 51: 667-678.
- Humphreys, Michael. (1978). Outdoor Temperatures and Comfort Indoors. *Building Research & Practice*, 6 (2), 92p. DOI: 10.1080/09613217808550656.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2010). *Censo demográfico: Aglomerados Subnormais*. Rio de Janeiro, RJ.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2017). *Áreas urbanizadas do Brasil: 2015*. Rio de Janeiro, RJ. 28p.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia (2002). *Normais Climatológicas do Brasil 1991-2020*. Brasília, DF.
- Iqbal, M. (1983). An introduction to solar radiation. Library of Congress Cataloging in Publication data. *Academic Press Canadian*, 390p.

- Lee, K., Baek, H. & Cho, C. (2014). The Estimation of Base Temperature for Heating and Cooling Degree-Days for South Korea. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53, 300-309.
- MapBiomias - Mapeamento Anual de Cobertura e Uso da Terra do Brasil (2022). Coleção 6. <https://mapbiomas.org/>
- Mourshed, Monjur. (2012). Relationship between annual mean temperature and degree-days. *Energy and Buildings*, 54, 418–425.
- NASA - National Aeronautics and Space Administration (2020). Landsat Science. <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>
- Oliveira, S.; Andrade, H. & Vaz, T. (2011). The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat: A case study in Lisbon. *Building and Environment*, 46 (11).
- Pasa, C. C. M. U. & Junior, A. B. (2010). Aplicação do método graus-dia para avaliação do desempenho energético de edificações unifamiliares. *XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção*. São Carlos, SP.
- Pereira dos Santos, A., Henrique Simionatto, H., & Mendonca Felici, E. (2020). Variação do índice NDVI e da temperatura da superfície terrestre na malha urbana do município de Paracatu-Mg entre 1985 e 2005. *In Colloquium Exactarum*, 12 (2).
- Pereira, I. M. & Assis, E. S. (2010). Avaliação de modelos de índices adaptativos para uso no projeto arquitetônico bioclimático. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, 10 (1), 31-51. ISSN 1678-8621.
- Prado, L. B., Fialho, E. S., & Santos, L. G. F. (2020). O Sensoriamento remoto e o clima urbano: uma perspectiva de investigação através do campo térmico de superfície na área central do município de Viçosa–MG. *Revista Brasileira de Climatologia*, 27.
- Said SAM. (1992). Degree-day base temperature for residential building energy prediction in Saudi Arabia. *ASHRAE Trans*, 98, 346–353.
- Santiago, D. B. & Gomes, H. B. (2016). Heat islands in the city of Maceió/AL using Orbital Data from Landsat 5. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9(3), 793-803. DOI:10.5935/1984-2295.20160053
- Santiago, D. B., Gomes, H. B. & Ferreira, L. S. (2019). Ilha de calor e a influência no conforto térmico da região integrada de desenvolvimento da grande Teresina (ride). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 12(1), 213-225. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.1.p213-225>
- Santos, J. B., de Barros Santiago, D., de Barros, H. G., & Amorim, R F. (2016). Avaliação microclimática no município de Petrolina, Pernambuco, Brasil usando técnicas de sensoriamento. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9(5), 1322-1334. <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20160090>
- SIDRA. Sistema IBGE de Recuperação Automática. Censo Demográfico. (2010). <https://sidra.ibge.gov.br/territorio>.
- Sousa, D. M. & Nery, J. T. (2012). O Conforto térmico na perspectiva da Climatologia Geográfica. *Geografia*, Londrina, 21 (2), 65-83.
- Tselepidaki I., Santamouris M., Asimakopoulos D. N. & Kontoyiannidis S. (1994). On the variability of cooling degree-days in an urban environment: application to Athens, Greece. *Energy Build*, 21, 93–99.
- Valor, E., Meneu, V. & Caselles, V. (2001). Daily air temperature and electricity load in Spain. *J. Appl. Meteorol*, 40, 1413–1421.
- Vendramin, A. L. & Souza, S. N. M. et al. (2009). Exame de caso sobre o método de graus-dia para avaliação do dia para avaliação do desempenho energético de uma edificação unifamiliar. *Acta Scientiarum*. Technology, Maringá, 31 (1), 9-14. DOI: 10.4025/actascitechnol.v31i1.305
- Weber, E., Hasenack, H. & Ferreira, C.J.S. (2004). Adaptação do modelo digital de elevação do SRTM para o sistema de referência oficial brasileiro e recorte por unidade da federação. Porto Alegre. UFRGS Centro de Ecologia. <<https://www.ufrgs.br/labgeo/index.php/dados-espaciais/260-modelos-digitais-de-elevacao-do-srtm-no-formato-geotiff>>.
- Xavier, T. C., Oliveira, W. D., & Fialho, E. S. (2021). Análise das condições de conforto térmico da cidade de Vitória, ES. *Revista Do Departamento de Geografia*, 41, e172471-e172471.