



## Balanco de energia e ilhas de calor no perímetro urbano de Campos dos Goytacazes, RJ: Um estudo de caso

Renata Silva Barreto Sales<sup>1</sup>, Dhiego da Silva Sales<sup>2</sup>, José Carlos Mendonça<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Bacharel em Física, Mestre em Engenharia Ambiental. Instituto Federal Fluminense, Instituto Federal Fluminense - Campus Macaé. Rod. Amaral Peixoto, Km 164, Imboassica, CEP 28200000 - Macaé, RJ, (22) 33991504, E-mail: renata.s.barreto@hotmail.com, Orcid ID. 0000-0001-7778-3208; <sup>2</sup>Bacharel em Geografia, Mestre em Engenharia Ambiental., Instituto Federal Fluminense - Campus Macaé. Rod. Amaral Peixoto, Km 164, Imboassica, 28200000 - Macaé, RJ, (22) 33991504, E-mail dhiego.sales@outlook.com, Orcid ID. 0000-0001-6541-4720. <sup>3</sup>Dr. em Produção Vegetal, Professor Associado, Laboratório de Engenharia Agrícola- Leag, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, Av. Alberto Lamego, 2000/ CCTA/P1/SL209, Parque Califórnia, CEP 28013-602, Campos dos Goytacazes, RJ. (22) 27397308. E-mail: mendonca@uenf.br (autor correspondente), Orcid ID. 0000-0001-9894-9369

Artigo recebido em 13/06/2022 e aceito em 06/11/2022

### RESUMO

De acordo com a ONU é crescente a tendência de urbanização sendo projetado um crescimento mundial em termos absolutos atingindo 70% em 2050. Utilizando imagens digitais orbitais e técnicas de sensoriamento remoto, este trabalho teve por objetivo avaliar o comportamento do balanço de energia da cidade de Campos dos Goytacazes, RJ contextualizando o estresse hídrico e correlacionando-o com a temperatura da superfície. Observou-se que o solo urbanizado em comparação com a área não construída apresentou os maiores fluxos de calor sensível e de calor no solo. Nas áreas urbanas foram encontrados os menores valores de saldo de radiação e fluxo de calor latente, gerando temperaturas mais elevadas no solo urbano e as áreas vegetadas apresentaram um maior fluxo de calor latente e menor fluxo de calor do solo. Observou-se ainda uma correlação de 96% entre o estresse hídrico e a temperatura, influenciando fortemente os fluxos da energia.

**Palavras-chaves:** sensoriamento remoto, landsat 8, ilhas de calor, SEBAL

## Energy balance in the urban perimeter of Campos dos Goytacazes, RJ: A case study

### ABSTRACT

According to the UN, the urbanization trend is growing, with a global growth projected in absolute terms reaching 70% in 2050. Using orbital digital images and remote sensing techniques, this work aimed to evaluate the behavior of the energy balance of the city of Campos dos Goytacazes, RJ contextualizing water stress and correlating it with surface temperature. It was observed that the urbanized land compared to the non-built-up area presented the highest fluxes of sensible heat and heat in the soil. In urban areas, the lowest values of radiation balance and latent heat flux were found, generating higher temperatures in the urban soil, and vegetated areas presented a greater latent heat flux and lower soil heat flux. There was also a correlation of 96% between water stress and temperature, strongly influencing energy flows, or for changes in the energy balance of the environment, further analyzes are proposed in different water conditions to compare with the results obtained with this work.

**Keywords:** remote sensing, landsat 8, heat islands, SEBAL, temperature

### Introdução

De acordo com as Nações Unidas (2019) é crescente a tendência de urbanização, sendo relatado que em 2014 a fatia de 54 % da população mundial era urbana e projetando um crescimento desta população em termos absolutos e percentuais, onde, em 2050, a população urbana atingirá o montante 70% da população mundial. Deste modo,

o planejamento urbano adequado é fundamental, e este deve contemplar o impacto térmico da urbanização, pois a não observância deste efeito tende acarretar prejuízo econômicos e biológicos. Já Pereira et al. (2021) citam que avanço das cidades tem ocorrido na maioria dos casos de modo desorganizado e sem o devido planejamento,

gerando cidades dispersas, de baixa densidade e com sérios problemas sociais e ambientais.

As modificações em escala microclimática promovidas pelos seres humanos é um fato inquestionável na comunidade científica (OKE, 1973). Costa et al. (2022) citam que a crescente população urbana tem gerado a necessidade de expansão das cidades, causando transformações no meio ambiente, capazes de criar um microclima próprio, podendo formar ilhas de calor. As modificações do balanço energético são ocasionadas devido à supressão da cobertura natural do solo para dar lugar ao solo urbano que tem na água precipitada pouca ou nenhuma infiltração, pois este tipo de cobertura torna boa parte do solo impermeável, acarretando alterações no ciclo hidrológico, além da redução do fluxo de calor latente (LE) e o aumento do fluxo de calor sensível (H).

Medeiros et al. (2020) e Amorim et al. (2020) citam que os constantes processos de substituição de áreas verdes por áreas impermeabilizadas e edificadas tendem a modificar as temperaturas locais e alterar os microclimas e como consequência, pode-se observar a ocorrência do fenômeno Ilha de Calor Urbana (ICU). Silva Filho et al. (2019) e Romero et al. (2020) citam que o balanço de energia é de grande importância para a caracterização do microclima. Ele possibilita analisar a interação entre as variáveis ambientais e a superfície, bem como, identificar também efeitos decorrentes das atividades antrópicas.

Dubreuil et al. (2020) e Foissard et al. (2019) destacam a importância de estudos neste âmbito nas cidades médias e pequenas, pois estes espaços nas últimas décadas veem apresentando um crescimento significativo, com a formação de centros urbanos dinâmicos regionalmente e que seguem a mesma proposta de delineamento espacial observado nas grandes metrópoles

Sahnoun et al. (2021) afirmaram que as estimativas precisas dos fluxos de energia na superfície são cruciais para muitas aplicações agroambientais, incluindo a determinação do balanço hídrico, manejo da irrigação, zoneamentos agroecológicos, simulações de mudanças globais no uso da terra e previsão da produção de culturas

agrícolas. Modelos de balanço de energia por sensoriamento remoto são atualmente os mais indicados para estimativa desses fluxos em ambas as escalas, temporal e espacial.

Já Stewart e Oke (2009) comentam que a diferenciação do uso do solo como urbano e rural não é muito precisa na literatura, ficando esta análise a cargo da interpretação de cada autor, além de existir grandes diferenças e particularidade em cada cidade. Sendo proposto pelos mesmos autores, uma nova forma de classificar o solo para a análise urbana, intitulada de Zonas Climáticas Locais ou do termo em inglês *Local Climate Zones* (LCZ), onde descrevem 17 LCZ padrões, podendo estas serem combinadas para formar outras classificações e ajustar de modo mais preciso, a área a ser estudada.

Utilizando-se de 8 LCZ, sendo 7 zonas provenientes das zonas pré determinadas pelos autores e 1 zona combinada este trabalho teve por objetivo avaliar os fluxos de energia à superfície, contextualizando e correlacionando o estresse hídrico com a temperatura da superfície, a fim de observar o padrão de comportamento da energia sobre o solo urbano da cidade de Campos dos Goytacazes, RJ.

## Material e métodos

### Área de estudo

A cidade Campos dos Goytacazes se localiza na região Norte do estado do Rio de Janeiro a cerca de 280 km da capital e está situada no bioma da Mata Atlântica. A cidade contabilizou 463.731 habitantes e densidade demográfica de 115,16 hab/km<sup>2</sup> no censo de 2010 do IBGE. Segundo a classificação climática de Köppen, o clima da região é classificado com Aw, isto é, clima tropical úmido, com verão chuvoso, inverno seco e temperatura média do ar no mês mais frio superior a 18°C.

Na Figura 1, observa-se em azul do perímetro urbano da cidade, além dos pontos de controle onde foram dispostos os termohigrômetros para a confrontação dos dados calculados.

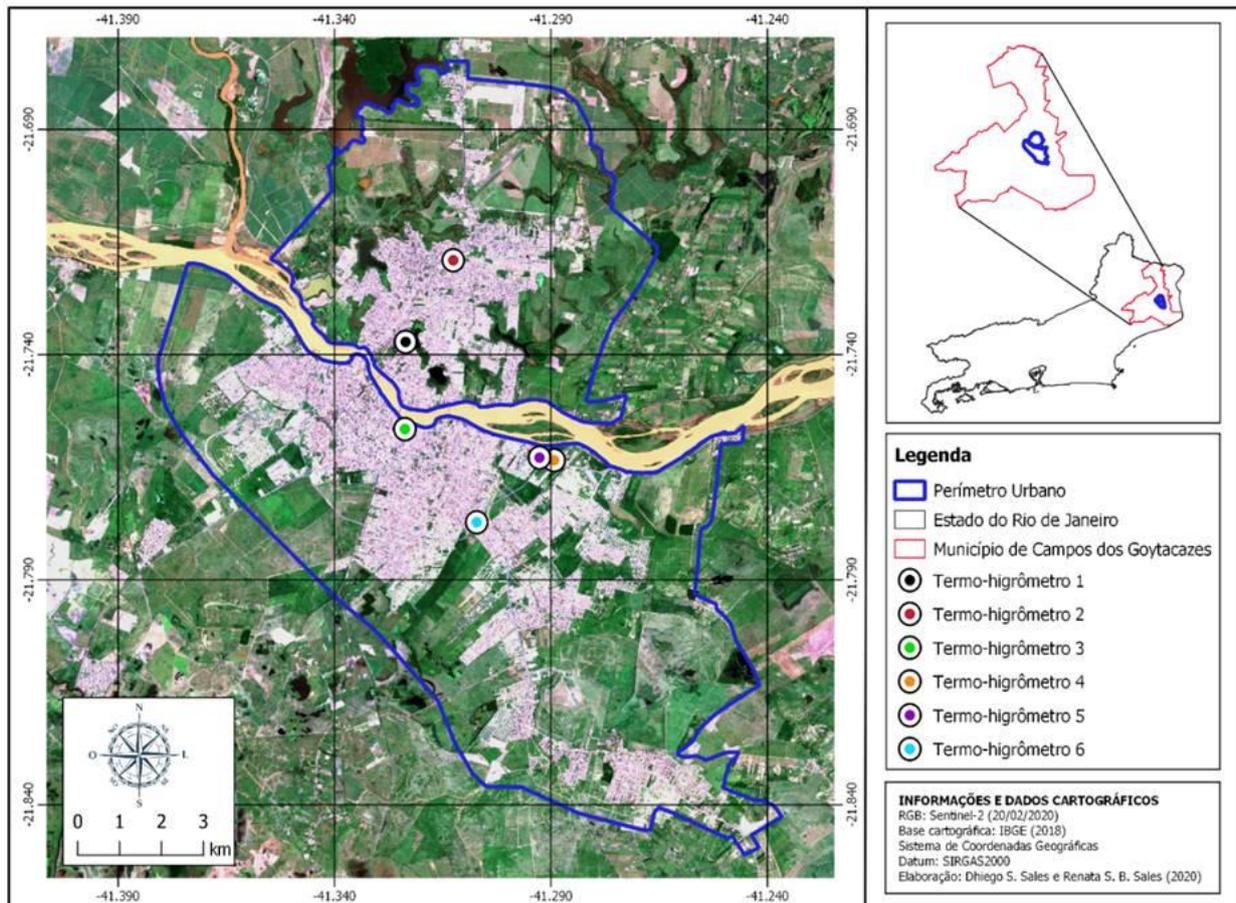


Figura 1: Perímetro urbano da cidade e a localização dos termo-higrômetros para validação dos dados de superfície. Fonte: (recorte de imagem do Landsat 8 RGB 3:2:1).

### Correção atmosférica

Os dados matriciais em escala de cinza dos sensores OLI e TIRS do satélite Landsat-8 foram obtidos do *United States Geological Survey* (USGS) por meio do portal *Earth Explorer*, sendo escolhida a imagem do dia 20 de fevereiro de 2020, órbita 216 e ponto 075, com horário central de 12:45 (GMT) não havendo nuvens na área analisada.

Adicionalmente foram instalados 6 termo-higrômetros HOBO® v2 (U23-001), com acurácia de 0,21 °C e faixa de operação de - 40 a 70 °C dentro da área analisada para validação dos dados termais do satélite.

Para a correção atmosférica da banda termal do sensor TIRS foi utilizada a metodologia baseada na transferência radioativa com um único canal, sendo utilizado a ferramenta online de Barsi *et al.* (2003, 2005) para obter os valores de transmissividade atmosférica  $\tau$ , radiância emitida  $L_u$  e recebida  $L_d$  de uma atmosfera simulada com base nos dados reais obtidos da estação meteorológica do INMET, sendo possível observar os dados na Tabela 1.

A Equação 1, apresentada abaixo, foi utilizada para a correção atmosférica da banda 10 do satélite Landsat-8.

$$L_T = \frac{L_{TOA} - L_u - \tau(1-\epsilon)L_d}{\tau\epsilon} \quad (1)$$

A Radiância Espectral de superfície ( $L_T$ ) foi convertida em temperatura de superfície ( $T_S$ ) pela equação de Planck.

Os dados dos 6 termo-higrômetros foram utilizados para precisar a acuraria da metodologia empregada para a obtenção da temperatura por meio do satélite Landsat-8, sendo empregado as análises estatísticas Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE) (2) e Erro Médio Absoluto (MAE) (3):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_{Sim,i} - x_{Obs,i})^2}{N}} \quad (2)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \frac{\sum_{i=1}^N |x_{Obs,i} - x_{Sim,i}|}{x_{Obs,i}} \quad (3)$$

Onde  $X_{Sim}$  e  $X_{Obs}$  são os valores simulados e observados respectivamente.

Na Tabela 1 são apresentados os dados de entrada e de saída para a correção atmosférica.

Dados de Entrada	
Data da Passagem	20/02/2020
Latitude/ Longitude	-21.754/ -41.324
Altitude	0,017 km
Pressão	1009,7 mb
Temperatura	31,8 °C
Umidade Relativa	54%
Dados de Saída	
Transmissividade Atmosférica ( $\tau$ )	0,69
Radiância Emitida pela Superfície ( $L_u$ )	2,90 W·m <sup>-2</sup> ·sr <sup>-1</sup> · $\mu$ m <sup>-1</sup>
Radiância Recebida pela Superfície ( $L_d$ )	4,58 W·m <sup>-2</sup> ·sr <sup>-1</sup> · $\mu$ m <sup>-1</sup>

Tabela 01 – Dados para correção atmosférica. Fonte: Barsi *et al.* (2003, 2005)

### Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL)

Silva Filho *et al.* (2019) citam que o balanço de energia é de grande importância para a caracterização do microclima. Ele possibilita analisar a interação entre as variáveis ambientais e a superfície, bem como, identificar também efeitos decorrentes das atividades antrópicas

O algoritmo *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL), criado por Bastiaanssen *et al.* (1998a, 1998b) foi empregado neste trabalho com o objetivo de produzir as cartas de saldo de radiação, fluxo de calor do solo, fluxo de calor latente e fluxo de calor sensível. O algoritmo calcula o balanço de energia da superfície tendo o fluxo de calor latente como resíduo da Equação (4).

$$R_n = H + G + LE \quad (4)$$

Onde  $R_n$  é o saldo de radiação em W/m<sup>2</sup>; H é o fluxo de calor sensível em W/m<sup>2</sup>; G é o fluxo de calor do solo em W/m<sup>2</sup>; LE é o fluxo de calor latente em W/m<sup>2</sup> e H é o fluxo de calor sensível em W/m<sup>2</sup>.

Sendo que o saldo de radiação ( $R_n$ ) é obtido por meio da análise do fluxo radioativo da superfície.

$$R_n = (1 - \alpha)R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (5)$$

Onde  $R_{S\downarrow}$  é a radiação de ondas curtas incidentes (sendo considerada constante para toda a cena);  $\alpha$  é o albedo da superfície;  $R_{L\downarrow}$  é a radiação de onda longa emitida pela atmosfera, aqui nesse estudo também será considerado constante para toda a cena;  $R_{L\uparrow}$  é a radiação de onda longa emitida pela superfície por cada pixel e  $\epsilon_0$  é a emissividade da superfície para cada pixel da cena.

Já o fluxo de calor do solo (G) é a taxa de energia térmica armazenada no solo, sendo calculado primeiramente, pelo SEBAL, a taxa G/ $R_n$  pelo algoritmo empírico desenvolvido por Bastiaanssen (2000).

$$G/R_n = T_s/\alpha (0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2)(1 - 0,98NDVI^4) \quad (6)$$

Onde  $T_s$  é a temperatura da superfície em °C e NDVI é o índice de vegetação por diferença normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*). O NDVI foi calculado por meio da diferença normalizada da reflectância da banda 4 e 5 do Landsat-8.

$$NDVI = \frac{\rho_5 - \rho_4}{\rho_5 + \rho_4} \quad (7)$$

Onde  $\rho_4$  e  $\rho_5$  são, respectivamente, as refletâncias na faixa do vermelho e o infravermelho.

O fluxo de calor sensível é fração da energia térmica que é perdida para o ar por meio da condução e convecção do calor. Ele varia em função do gradiente de temperatura, da rugosidade da superfície e da velocidade do vento, sendo calculada pela equação (8).

$$H = \rho C_p \frac{dT}{r_{ah}} \quad (8)$$

Onde  $\rho$  é a densidade do ar (kg/m<sup>3</sup>),  $C_p$  é o calor específico do ar (1004 J/kg/K),  $dT$  é a diferença de temperatura entre duas alturas (neste trabalho foi considerado  $z_1 = 0,1$  m e  $z_2 = 2,0$  m), e  $r_{ah}$  é a resistência aerodinâmica (s/m).

Uma metodologia que torna possível a resolução desta equação, apesar de  $dT$  e  $r_{ah}$  serem desconhecidos para cada pixel da imagem, é a adoção de dois pixels ancoras (pixel quente e pixel

frio) e  $r_{ah}$  resolvido por uma condição de estabilidade neutra:

$$r_{ah} = \frac{\ln(z_2/z_1)}{u_* \times k} \quad (9)$$

Onde  $u^*$  é a velocidade de fricção do ar (m/s), e  $k$  é a constante de von Karman (0,41).

**Regional Water Stress Index - RWSI**

Neste trabalho foi utilizado o índice de estresse hídrico baseado no mecanismo do CWSI (*Crop Water Stress Index*) (JACKSON et al., 1981), sendo aqui referido por RWSI (*Regional Water Stress Index*), semelhante ao trabalho de Gao et al. (2011). Onde a equação é descrita a seguir:

$$RWSI = 1 - \frac{ET}{ET_{wet}} \quad (10)$$

Onde  $ET$  é o fluxo de calor latente atual da região ( $m^3 \text{ ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ) e  $ET_{wet}$  é o potencial fluxo de calor latente para a região ( $m^3 \text{ ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ). Para que o fluxo de calor latente seja máximo, o fluxo de calor

sensível deverá ser mínimo, aproximando-se do valor nulo e portanto,  $ET_{wet} = R_n - G$ . Deste modo a Equação 10 pode ser descrita como:

$$RWSI = \frac{H}{R_n - G} \quad (11)$$

**Zonas de clima local**

A dicotomida Urbano-Rural é usado de diversos estudo do clima urbano (Pyrgou et al., 2020; Parker, 2020; Theophilou e Serghides, 2015), contudo essa classificação não descreve de modo claro qual é a real composição dos materiais desses solos. Pensando nisso Stewart e Oke (2012) definiram uma classificação chamada de Zonas Climáticas Locais ou do termo em inglês *Local Climate Zones* (LCZ) que apresentam 17 LCZ padrões que podem se combinados para formar outras classificações e ajustar de modo mais precisamento com a área a ser estudada.

Deste modo foram escolhidos 8 LCZ para investigar o comportamento da radiação nestas áreas, podendo ser visualizada na Figura 2 e descritas na Tabela 2:

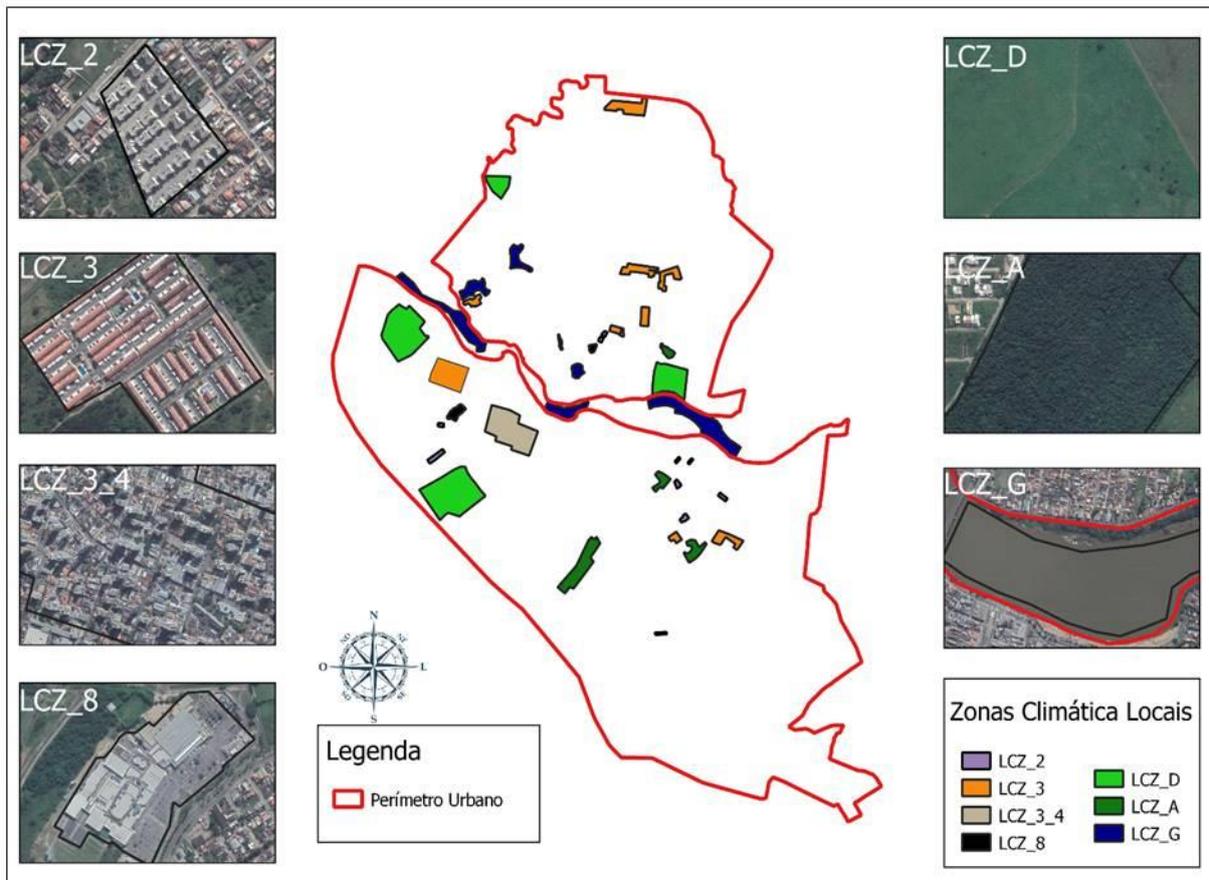


Figura 2: Localização das 8 LCZ (Zonas Climáticas Locais). Fonte: Os autores. Recortes da Imagem do Landsat 8.

Tabela 02 – Descrição das Zonas Climáticas Locais

	LCZ	Descrição
Construção	2	Área compacta com construções de médio porte.
	3	Área compacta com construções de pequeno porte.
	3_4	Área compacta com construções de pequeno e grande porte.
	8	Área com construções esparsas e de pequeno porte.
Solos	D	Plantas baixas (pastagem).
	A	Árvores densas.
	G	Água.

**Resultados e discussão**

Nos dias que antecederam a passagem do satélite Landsat-8 ocorreram precipitações acima das normais climatológicas. De acordo com os dados do INMET, em fevereiro até a data da passagem do satélite, havia precipitado 80 mm de chuva, sendo o esperado para todo o mês de fevereiro 61,2 mm. Como o dado obtido pelo satélite é um “retrato” de um momento é importante destacar o contexto climatológico em que essa imagem se insere.

Para observar melhor o contexto hídrico em que a cena se encontra foi obtido o Índice de Estresse Hídrico Regional (RWSI - *Regional Water Stress Index*), sendo possível observar a carta de RWSI na Figura 3.

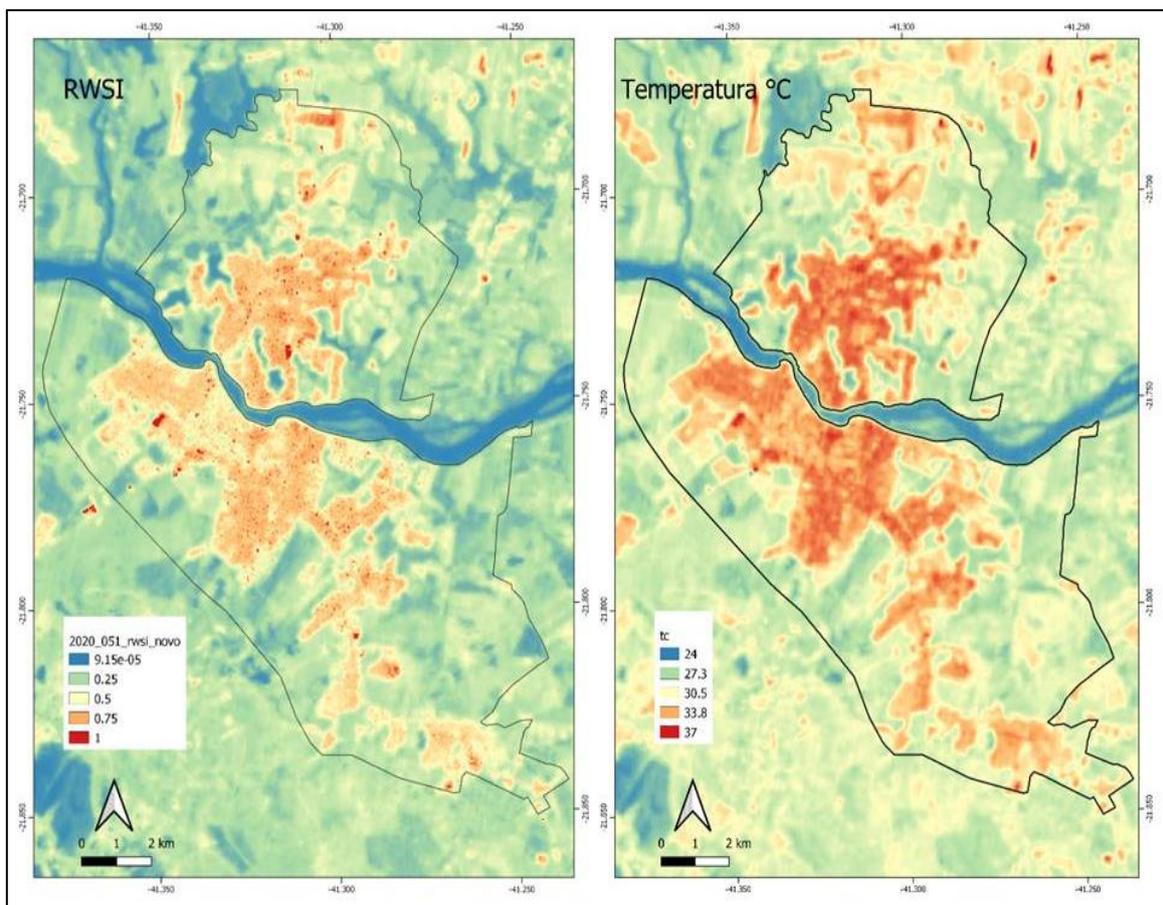


Figura 3: Apresentação das cartas dos valores do Índice de Estresse Hídrico Regional (RWSI - *Regional Water Stress Index*) e da Temperatura da Superfície (Ts), na área de estudo.

Nessa Figura pode-se notar que os valores de RWSI maiores de 0,9 estão localizados no solo urbano, mas especificamente sobre os telhados. É coerente os telhados apresentarem valores elevados de RWSI, mesmo sobre essas condições de muita chuva, visto que eles são projetados para o não armazenamento da água.

Toda área não urbanizada, bem como algumas poucas áreas do solo urbano apresentam o RWSI menor do 0,5. Contudo o solo urbano está com o RWSI predominantemente acima de 0,5, demonstrando que mesmo em uma condição de chuvas acima das esperadas a área urbana apresenta pouca disponibilidade hídrica, o que reflete no saldo de radiação solar.

Variações na disponibilidade hídrica do ambiente modifica o saldo de radiação, ou seja, um ambiente mais úmido tem a tendência de apresentar um maior fluxo de calor latente e um menor fluxo de calor sensível o que implica em uma temperatura mais amena.

Na Figura 3 pode-se observar ainda que as temperaturas são mais elevadas nas regiões onde os

valores do RWSI também são mais elevados, ou seja, com maior estresse hídrico. Este fato é corroborado com o gráfico da Figura 4, que apresenta o  $R^2$  positivo e muito elevado (0,958), indicando que a temperatura e o estresse hídrico tem uma excelente correlação direta. Portanto, essa análise tem a tendência de ter menores temperaturas do que se a mesma tivesse sido realizada em uma condição de chuvas normais.

Na Figura 5 são apresentadas as cartas do saldo de radiação ( $R_n$ ) e dos fluxos de calor do solo ( $G$ ), latente ( $LE$ ) e sensível ( $H$ ).

Na Figura 5 (ET) observa-se que a região urbana apresenta valores menores para fluxo de calor latente, corroborando com a Figura 3 pois como o solo urbano apresenta maiores valores de RWSI, há menos água disponível para evaporar, ou seja, pouca ou nenhuma energia, nesta área, é convertida em calor latente e isso se deve ao fato de que o solo urbano normalmente tem alta taxa de impermeabilização, e, portanto, pouca água armazenada.

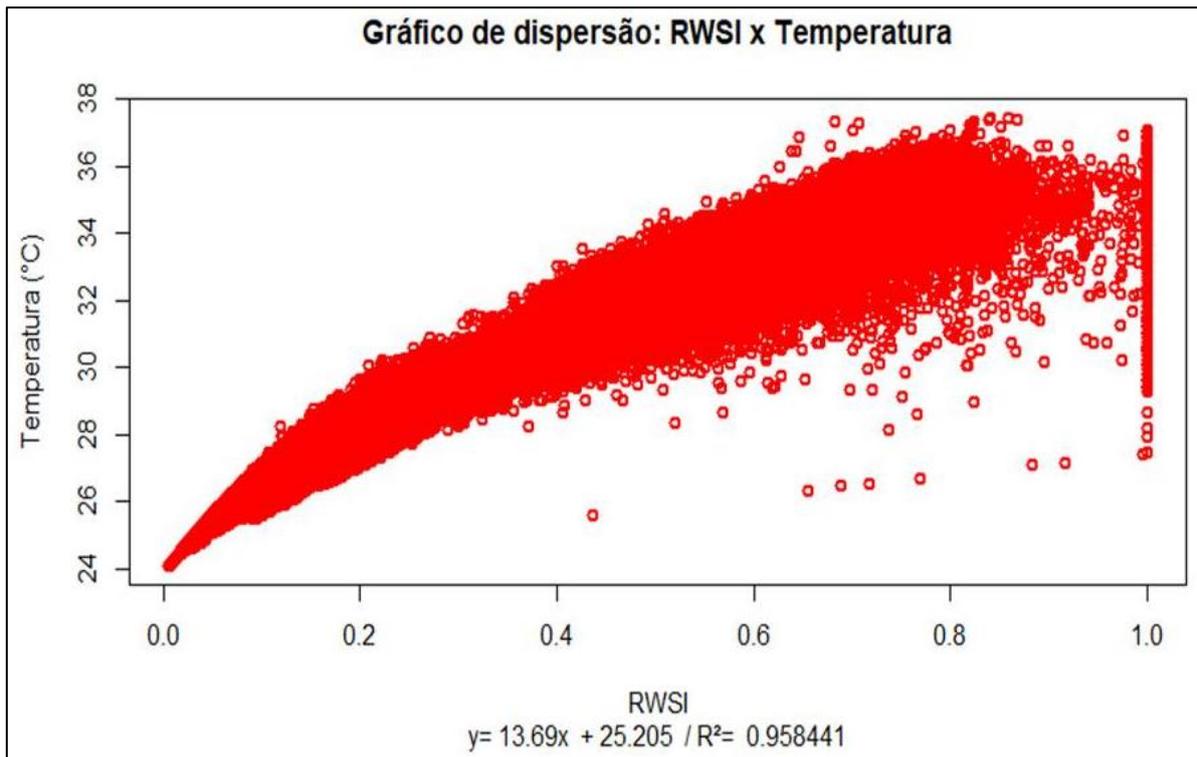


Figura 4: Gráfico da correlação entre o Índice de Estresse Hídrico Regional (RWSI - *Regional Water Stress Index*) e a Temperatura da Superfície ( $T_s$ ), na área de estudo.

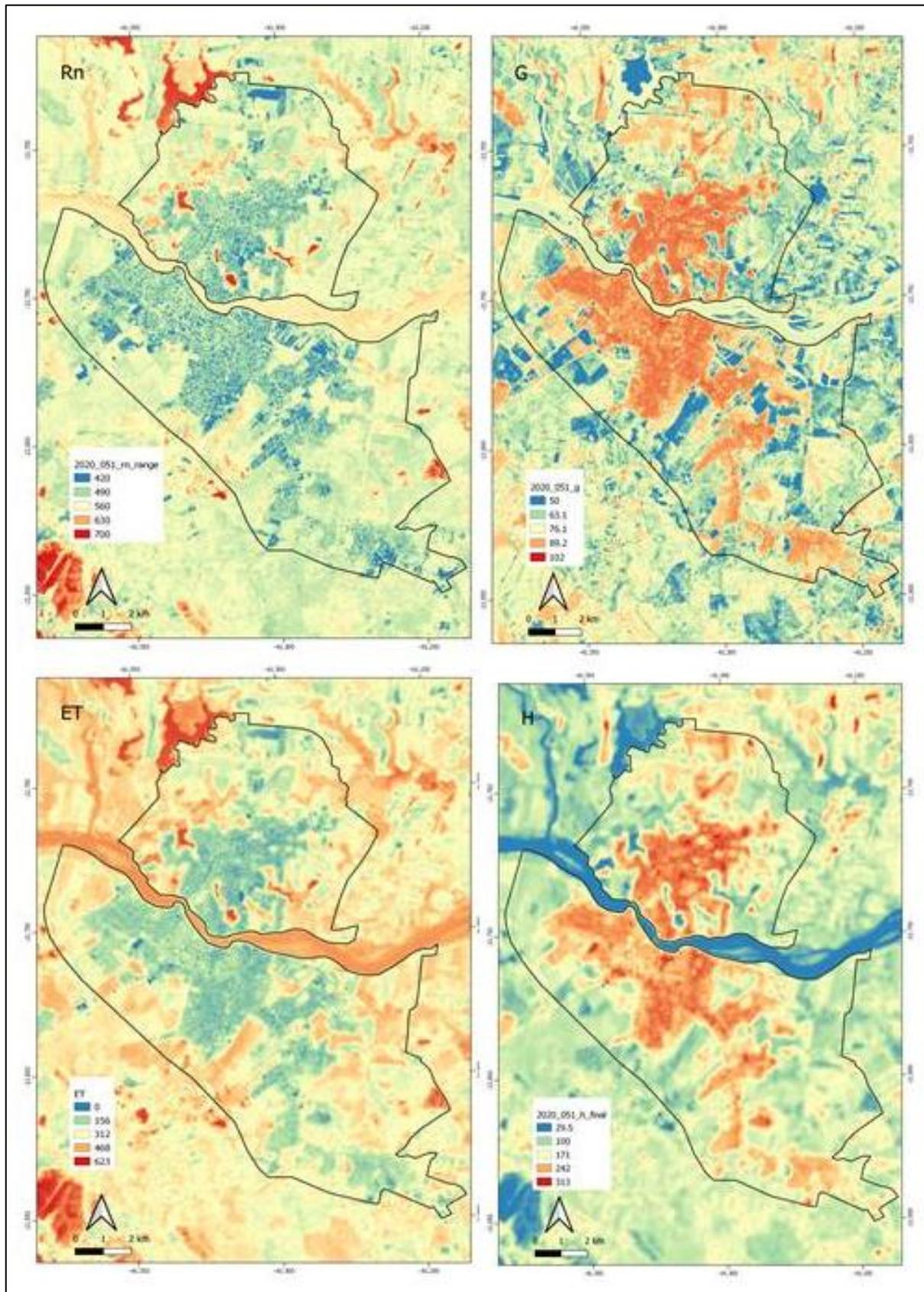


Figura 5: Cartas do saldo de radiação (Rn) e dos fluxos de calor do solo (G), latente (LE) e sensível (H) obtidas na área de estudo.

O valor médio de fluxo de calor latente da imagem foi igual a  $319,91 \text{ W/m}^2$ , encontrando-se os valores dentro do intervalo de  $[0 \text{ a } 592,67] \text{ W/m}^2$ , sendo a mediana igual  $327,97 \text{ W/m}^2$ , respectivamente. Na carta de fluxo de calor sensível (Figura 5 (H)) a mancha urbana apresenta um fluxo de energia mais intenso do que a região periférica, apresentando os valores dentro do intervalo de  $[8,51 \text{ a } 295,06 \text{ W/m}^2]$ , a média de  $145,78 \text{ W/m}^2$  e a mediana de  $141,59 \text{ W/m}^2$ .

Daramola e Balogun (2019) encontraram na cidade de Akure, na Nigéria uma amplitude de 0 a  $490,89 \text{ W/m}^2$  do fluxo de calor latente e  $69,14$  a  $418,5$  para o fluxo de calor sensível, sendo o fluxo de calor latente menor e o de calor sensível maior do que o encontrado neste trabalho, possivelmente isto se deve ao excesso de precipitação ocorrido nos dias anteriores na área analisada nesse estudo.

O fluxo de calor do solo pode ser observado na Figura 5 (G), sendo os valores médio e mediano para a cena  $72,41 \text{ W/m}^2$  e  $72,50 \text{ W/m}^2$ , respectivamente. Estando a cena dentro o intervalo de  $[42,41 \text{ a } 96,50] \text{ W/m}^2$ , que apresentam valores menores do que foi encontrado por Daramola e Balogun (2019) para o fluxo de calor do solo ( $54.85$  a  $103.33 \text{ W/m}^2$ ).

Neste trabalho, assim como Mendonça et al. (2009), foi encontrado um fluxo de calor do solo mais intenso na área urbana da cidade, fato que foi por eles atribuído ao fenômeno da ilha de calor da cidade. Já a amplitude do saldo de radiação foi de  $[403,11 \text{ a } 700,00] \text{ W/m}^2$ , sendo a média e a mediana da carta  $538,02$  e  $537,74 \text{ W/m}^2$ , respectivamente.

Veloso et al. (2020) analisando o balanço de radiação e energia em áreas de veredas no norte de Minas Gerais, bioma cerrado, observaram no verão, a concentração dos valores de  $R_n$  24h se deu entre  $294,41$  e  $242,54 \text{ Wm}^{-2}$ , enquanto no inverno a concentração esteve entre  $95,57$  e  $103,81 \text{ Wm}^{-2}$ . Observaram ainda que no verão os valores de radiação líquida estimada são mais elevados em relação ao inverno, associado à radiação solar global, sendo que, de acordo com os dados analisados na estação meteorológica de Januária - MG, no dia sequencial 194/2018 foi observado  $2002 \text{ KJ/m}^2$ , e no verão na ordem de  $2941 \text{ KJ/m}^2$ , restando assim mais energia disponível para os processos biofísicos.

Na Figura 6 são apresentados os gráficos boxplot das imagens das 8 zonas de acordo com a classificação LCZ.

Foram destacadas das imagens 8 zonas de acordo com a classificação LCZ. Os gráficos

boxplot (Figura 6) da temperatura acompanham o comportamento dos gráficos boxplot do RWSI, sendo observado o mesmo comportamento em todas das 8 zonas analisada. Resultado que corrobora a hipótese que a temperatura é fortemente influenciada pelo estresse hídrico. Esta influência é também levantada por Sales (2020) por meio da correlação entre a temperatura e o NDVI, visto que as temperaturas são mais amenas em NDVI menor do que 0 e maior do que 0,55; sendo indicado pela autora que a superfície desta faixa é atribuída aos corpos hídricos e vegetação, respectivamente. A precipitação em um ambiente vegetado apresenta melhores taxas de infiltração de água no solo proporcionando o armazenamento de água, o que corrobora para um ambiente úmido por mais tempo, portanto, a disponibilidade hídrica é um fator presente nessas duas faixas de NDVI.

Porongaba & Amorim (2019) em seu utilizando geotecnologias aplicadas à análise de ilhas de calor de superfície em cidades do interior do estado de São Paulo observaram claramente a importância da vegetação nas temperaturas dos alvos e concluíram que o NDVI alto é representativo de uma vegetação mais exuberante o que diminui as temperaturas superficiais. Já o NDVI baixo, encontrado nas áreas predominantemente construídas urbanas ou característico dos períodos de estiagens mais evidentes no ambiente rural, favorece o aquecimento superficial.

O comportamento das zonas para o RWSI e a temperatura se repete para o gráfico de fluxo de calor sensível, porém é oposto ao gráfico do fluxo de calor latente. Visto que nas áreas onde há menor estresse hídrico a energia é preferencialmente convertida em fluxo de calor latente, em detrimento do fluxo de calor sensível, implicando em temperaturas mais amenas.

A LCZ\_8 é a zona que apresenta seus dados mais dispersos, isso pode ter ocorrido, pois nesta área encontra-se estruturas com grandes extensões de telhados, que são projetados para não armazenar água, e asfalto, que devido à pouca declividade pode “armazenar” uma pequena quantidade de água por um pouco tempo após as chuvas. Esta zona é a que apresenta o mais baixo fluxo de calor latente e o mais alto fluxo de calor sensível. Os dados desta zona no estudo realizado por Daramola e Balogun (2019) obteve uma distância interquartil semelhante à obtida neste trabalho.

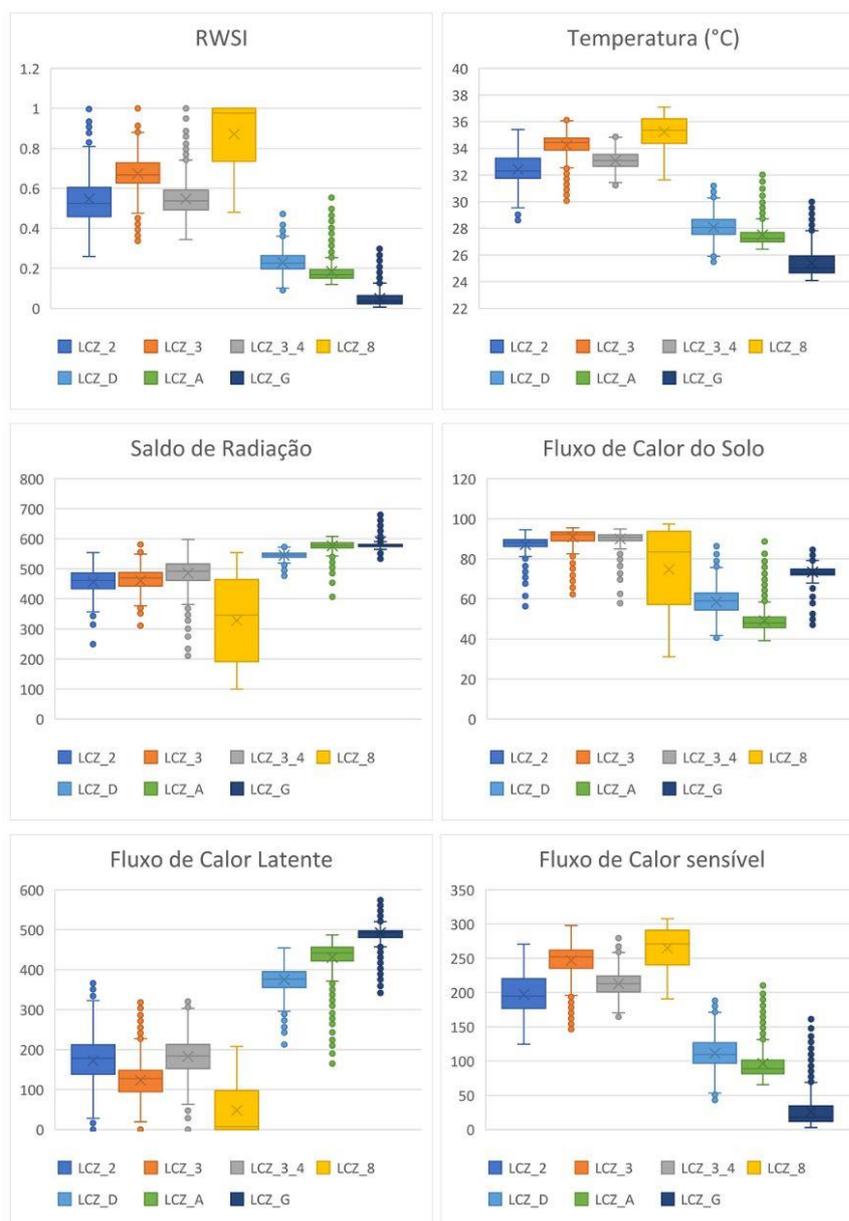


Figura 6: Gráficos boxplot do RWSI (*Regional Water Stress Index*), Temperatura da Superfície, Saldo de Radiação e dos Fluxos de Calor do Solo, latente e Sensível, das 8 zonas de acordo com a classificação LCZ.

O saldo de radiação e o fluxo de calor do solo das zonas LCZ\_2, LCZ\_3 e LCZ\_3\_4 apresentaram valores muito próximos e com dados pouco dispersos, contudo quando analisado o ET e H observa-se que LCZ\_3 apresenta menor ET e maior H, do que as duas outras zonas. A LCZ\_3 tem os solos bastante impermeabilizados assim como as zonas LCZ\_2 e LCZ\_3\_4, contudo estas duas últimas apresentam edifícios de médio e alto porte, sendo este efeito, possivelmente ocasionado pela sombra que esse possa estar gerando na hora da passagem do satélite (9:45 horário local), devendo ser realizados outros estudos para uma investigação mais precisa.

As zonas LCZ\_D, LCZ\_A e LCZ\_G (pastagem, árvores densas e água) apresentam

valores médios de saldo de radiação iguais à 544,85 W/m<sup>2</sup>, 576,35 W/m<sup>2</sup> e 591,91 W/m<sup>2</sup>, respectivamente, sendo a distância interquartil das zonas LCZ\_A e LCZ\_G semelhantes (LCZ\_A [569,20 a 587,21] W/m<sup>2</sup> e LCZ\_G [574,31 a 580,89] W/m<sup>2</sup>). Quando analisado o fluxo de calor do solo, nota-se que a LCZ\_G é significativamente maior do que as zonas LCZ\_D e LCZ\_A, cuja média da primeira é 73,40 W/m<sup>2</sup> e os valores médios das LCZ\_D e LCZ\_A são 58,41 W/m<sup>2</sup> e 49,08 W/m<sup>2</sup>, respectivamente.

As zonas que não apresentam áreas construídas (LCZ\_D, LCZ\_A e LCZ\_G) têm os menores valores de fluxos de calor sensível, em contrapartida elas apresentam os maiores valores de fluxo de calor latente. Isso deve-se ao fato que

essas áreas apresentam baixo estresse hídrico, ou seja, 0,230 para LCZ\_D; 0,185 para LCZ\_A e 0,049 para LCZ\_G. Demonstrado que as áreas com menor RWSI apresentam maior fluxo de calor latente e menor fluxo de calor sensível. Este direcionamento da energia solar na presença de um solo irrigado reflete em temperaturas mais amenas na região.

Brasileiro & Zanella (2021) analisando a ocorrência de ilhas de calor no espaço urbano na cidade de Sobral, Ceará notaram o predomínio de temperaturas superficiais superiores a 29°C, sendo que estas se concentram, sobretudo, nas áreas densamente ocupadas e centrais, o que denota afirmar que as áreas mais ocupadas e com maiores alterações do solo, são as regiões de maior probabilidade para ocorrência de ilhas de calor superficiais. Por outro lado, as regiões com cobertura vegetal, menor ocupação e com ocorrência de corpos d'água apresentaram temperaturas mais baixas, que variaram entre 24,5°C e 27,6°C. Estes pontos onde as temperaturas se apresentaram com menor intensidade consistem em áreas com ocorrência de ilhas de frescor, ou seja, ambientes dentro da cidade que geram arrefecimento no clima urbano.

Cavalcante et al. (2020) analisando ilhas de calor e frescor utilizando-se de processamento digital de imagens - estudo de caso do município de São Paulo/SP e da metodologia do algoritmo SEBAL para cálculo de temperatura da superfície evidenciaram que a variação de temperatura da superfície vem sofrendo aumento com o passar dos anos, em função da presença de grandes zonas industriais, do crescimento urbano desordenado, da presença de impermeabilização do solo através de revestimento asfáltico, sendo esses alguns dos fatores que contribuem para o surgimento de ilhas de calor. Os mesmos autores também evidenciaram a presença de zonas de frescor, boa parte delas em áreas arborizadas, o que colabora para a redução da temperatura e melhoramento da condição de vida da população.

Souto e Coheb (2021) estudando a variabilidade espaço-temporal das ilhas de calor urbano (ICU) e a influência da urbanização no padrão sazonal da temperatura da superfície terrestre na Região Metropolitana de Belém, PA, destacam a importante contribuição do sensoriamento remoto para a melhoria dos mapas de ICU em áreas tropicais, sendo particularmente úteis em áreas com poucos dados e para os formuladores de políticas públicas formularem contramedidas para mitigar os efeitos do ICU e criar cidades mais sustentáveis e amigas do meio ambiente. Além disso, sugerem que mais estudos

comparativos entre diferentes cidades poderiam ser conduzidos a fim de obter resultados mais confiáveis em diferentes condições climáticas e em diferentes cidades em pesquisas futuras.

## Conclusões

Sob condições de precipitação acima da esperada observou-se que o solo urbanizado em comparação com a área não construída apresentou os maiores fluxos de calor sensível e calor do solo. Nas áreas urbanas foram encontrados os menores valores de saldo de radiação e do fluxo de calor latente. Esta combinação de fluxo de energia acarretou temperaturas mais elevadas no solo urbano.

Já na análise por zona climática local foi observado que a LCZ\_8 apresentou os maiores valores de fluxos de calor sensível e calor do solo, sendo os menores valores de fluxo de calor latente e saldo de radiação. Sendo a zona LCZ\_G a que apresenta os maiores valores de fluxo de calor latente e de saldo de radiação, o que ocasionou em menor fluxo de calor do solo e de calor latente.

As áreas vegetadas apresentam um maior fluxo de calor latente e menor fluxo de calor do solo, mas a vegetação de densas árvores tem esse comportamento mais acentuado do que a pastagem. A LCZ\_2 apesar de apresentar o saldo de radiação semelhante a LCZ\_3 teve um fluxo de calor do solo e de calor sensível mais baixo, além de um fluxo de calor latente mais alto, indicando que a análise por zona pode apresentar informações complementares e mais detalhadas a análise da área rural e urbana.

Nesta análise foi observado que o estresse hídrico apresenta uma determinação muito alta com a temperatura e que o fator influencia fortemente o fluxo da energia. Sendo a água um importante fator para que o balanço energético do ambiente devendo ser realizado uma análise em outras condições hídricas para confrontar com o dado obtidos com o trabalho atual.

## Referências

- Amorim, A.C., Luchi, B.F., Costa, G.F., Assis, G.Z.A., Thomaz, J.N.L. 2020, Canni, M.S. Fenômeno das Ilhas de Calor na Cidade de Colatina-ES e Santa Teresa-ES. ISSN 2359-4799 6 / 52-64. Disponível: DOI: <https://doi.org/10.36524/ric.v6i2.801>
- Barsi, J. A., Barker, J. L., Schott, J. R 2003. An Atmospheric Correction Parameter Calculator for a Single Thermal Band Earth-Sensing Instrument In: IGARSS 2003. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No.

- 03CH37477). IEEE,. p. 3014-3016. Disponível:<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1293657>
- Barsi, J. A.; Schott, J. R.; Palluconi, F. D.; Hook, S. J.. 2005 Validation of a Web-Based Atmospheric Correction Tool for Single Thermal Band Instruments. In: Earth Observing Systems X. International Society for Optics and Photonics,. p. 58820 doi: 10.1117/12.619990 Disponível:[https://atmcorr.gsfc.nasa.gov/Barsi\\_AtmosCorr\\_SPIE05.pdf](https://atmcorr.gsfc.nasa.gov/Barsi_AtmosCorr_SPIE05.pdf)
- Bastiaanssen, W. G. M.; Pelgrum, H.; Wang, J.; Ma, Y.; Moreno, J.F.; Roerink, G.J., 1998a. A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 2.Validation. In: Journal of Hydrology. 212–213, 213–229. Disponível: [https://doi.org/10.1016/S0022-694\(98\)00254-6](https://doi.org/10.1016/S0022-694(98)00254-6)
- Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M., Feddes, R.A., Holtslag, A.A.M., 1998b. A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 1. Formulation. In: Journal of Hydrology. 212–213, 198–212. Disponível: [https://doi.org/10.1016/S0022-694\(98\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S0022-694(98)00253-4)
- Bastiaanssen, W. G. M. 2000. SEBAL - Based Sensible and Latent Heat Fluxes in the Irrigated Gediz Basin, Turkey. In: Journal of Hydrology, 229, 87-100, Disponível: [https://doi.org/10.1016/S0022-694\(99\)00202-4](https://doi.org/10.1016/S0022-694(99)00202-4)
- Cavalcante, L. B., Gomes, H. B., Cavalcante, A.S.I., Costa, B.C.A.C., Costa, M.C.A., Silva, C.M., Costa, R.L. Rocha Júnior, R.L., 3, Santos, F.S., Silva, F.D.S., Silva Júnior, T.L. 2020, Análise de Ilhas de Calor e Frescor Utilizando-Se de Processamento Digital de Imagens - Estudo de Caso Município de São Paulo/SP Revista Brasileira de Meteorologia, 35, 835-846, Disponível: <https://doi.org/10.1590/0102-7786355000010>
- Costa, L. C. S. 2022, Maneschy, R. Q., Canto, L.O. O Processo de Expansão Urbana e Seu Impacto na Cobertura Vegetal de Macapá. Revista Brasileira de Geografia Física 15, 694-709. Disponível: DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.2.p694-709>
- Brasileiro, F.M.G., Zanella, M.E., Ocorrência de Ilhas de Calor no Espaço Urbano: Reflexões no Contexto da Cidade de Sobral, Ceará. GEOPAUTA, 5, núm. 4, e9499, 202. Disponível: DOI: <https://doi.org/10.22481/rg.v5i4.e2021.e9499>
- Daramola, M. T., 2019. Balogun I. A. Local Climate Zone Classification of Surface Energy Flux Distribution Within an Urban Area of a Hot-Humid Tropical City. In: Urban Climate, 29, 100504, Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100504>
- Dubreuil, V., Foissard, X., Nabucet, J., Thomas, A., Quénot, H., 2020, Fréquence et Intensité des Ilots de Chaleur à Rennes: Bilan de 16 Années d’Observations (2004-2019). Climatologie, 17, 2020. Disponível: <https://doi.org/10.1051/climat/202017006>
- Fellah, S., Hamimed, A., Miloudi, K., Khaldi, A., Benslimane, M., Teixeira, A. H. C. 2021.. Application of SEBAL and Ts/VI Trapezoid Models for Estimating Actual Evapotranspiration in the Algerian Semi-Arid Environment to Improve. Revista Brasileira de Meteorologia, 36, 219-236, Disponível: DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863610020>
- Filho, A. S., Biudes, M. S., Machado, N.G, Querino, C. A. S., Almeida Junior, E.S. 2019-. Estimativa do Balanço de Energia pelo Método da Razão de Bowen a Partir de Medidas de Protótipo de Estação Micrometeorológica. Revista Brasileira de Climatologia, Ano 15 - 24 .134-150, ISSN: 2237-8642 Disponível:<http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v24i0.59271>
- Foissard, X.; Dubreuil, V.; Quenol, H. 2019. Defining Scales of the Land Use Effect to Map the Urban Heat Island in a Mid-Size European City: Rennes (France). Urban Climate., 29, 1-13,. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100490>
- Zhiquiang, G. Wei, C. Ni-Bin 2011. Integrating Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) and Regional Water Stress Index (RWSI) for Drought Assessment With the Aid of LANDSAT TM/ETM+ Images. In: International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 13, 495-503, Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2010.10.005>
- Jackson R. D., Idso S. B., Reginato R. J., Pinter Jr P. J, 1981. Canopy Temperature as a Crop Water Stress Indicator. In: Water Resources Research, 17, 1133-1138, Disponível: <https://doi.org/10.1029/WR017i004p01133>
- Medeiros, J.I., Campos, C.G.C. 2020, Jesus, R.M. Aplicação de Sensoriamento Remoto para a Identificação das Ilhas de Calor Urbana de Superfície e do Índice de Desconforto de Kawamura nas Capitais dos Estados do Sul do Brasil. Revista Brasileira de Geografia Física 13, 3518-3553. Disponível:

- DOI:<https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.07.p3518-3553>
- Mendonça, J. C.; André, R. G. B.; Sousa, E. F.; Silva, B. B. 2009. Aplicação do Algoritmo SEBAL e Imagens MODIS Para Estimativa do Fluxo de Calor do Solo (G) na Região Norte Fluminense, RJ, Brasil. In: SBSR, SIMPÓSIO BASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, 2009, Natal/RN. In: Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Natal: INPE, P.293-300. Disponível: <http://mart.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.21.24.45/doc/293-300.pdf>
- NAÇÕES UNIDAS – ONU News: Perspectivas Globais Reportagens Humanas. Disponível: <https://news.un.org/pt/story/2019/02/1660701>. Acesso em 05 jun. 2021.
- Oke, T.R. City Size and the Urban Heat Island. In: Atmospheric Environment. Oxford, 7, 769-779, 1973. Disponível: [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6)
- Parker, J. The Leeds Urban Heat Island and its Implications for Energy Use and Thermal Comfort. In: Energy and Buildings, 2020, 110636, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110636>.
- Pereira, P. B., Nunes, H. K. de B., Araújo, F. de A. da S., 2021. Análise Multitemporal de Uso, Ocupação e Cobertura da Terra na Zona Leste da Cidade de Caxias/Maranhão/Brasil. Revista Brasileira de Geografia Física 14 (3) 1415-1428. Disponível: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/244598/38834>
- Porangaba, G. F. O., Amorim, M.C.C.T. 2019, Geotecnologias Aplicadas à Análise de Ilhas de Calor de Superfície em Cidades do Interior do Estado de São Paulo, Revista Brasileira de Geografia Física 12, 2041-2050. Disponível:<https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.6.p2041-2050>
- Pyrgou, A., Hadjinicolaou, P., Santamouris, M. 2020, Urban-Rural Moisture Contrast: Regulator of the Urban Heat Island and Heatwaves' Synergy Over a Mediterranean City. In: Environmental Research, 182, 109102, Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.109102>
- Romero, C.W.S., Silva, H.R., Marques, A.P., Macedo, F. L., Farias, G. A., Alves, M.C. 2020. Relação entre as Ilhas de Calor e Uso e Ocupação do Solo em Centros Urbanos de Pequeno Porte Utilizando Sensoriamento Remoto. São Paulo, UNESP, Geociências, 39, 253 - 268,. Disponível: <https://ppegeo.igc.usp.br/index.php/GEOSP/article/view/13650>
- Sales, R. S. B., 2020. Caracterização e Modelagem Microclimática da Ilha de Calor Urbana Utilizando Parâmetros Biofísicos em Campos dos Goytacazes – RJ. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Instituto Federal Fluminense. Macaé, 54. Disponível: <https://portal1.iff.edu.br/pesquisa-e-inovacao/pos-graduacao-stricto-sensu/mestrado-em-engenharia-ambiental/dissertacoes-de-mestrado/2020/>
- Souto, J.I.O., Cohen, J.C. P. 2021, Variabilidade Espaço-Temporal das Ilhas de Calor Urbano: Influência da Urbanização no Padrão Sazonal da Temperatura da Superfície Terrestre na Região Metropolitana de Belém, Brasil. ISSN 2175-3369. Revista Brasileira de Gestão Urbana, 13-. Disponível:<https://doi.org/10.1590/2175-3369.013.e20200260>
- Stewart, I.D., Oke, T.R., 2009. Classifying Urban Climate Field Sites by “Local Climate Zones”: The case of Nagano, Japan. In: Preprints, Seventh International Conference on Urban Climate, June 29–July 3, Yokohama. Disponível: [http://www.ide.titech.ac.jp/~icuc7/extended\\_abstracts/pdf/385055-1-090515165722-002.pdf](http://www.ide.titech.ac.jp/~icuc7/extended_abstracts/pdf/385055-1-090515165722-002.pdf)
- Theophilou, M. K.; Serghides, D., 2015. Estimating the Characteristics of the Urban Heat Island Effect in Nicosia, Cyprus, Using Multiyear Urban and Rural Climatic Data and Analysis. In: Energy and Buildings, 108, 137-144,. Disponível:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.08.034>
- Veloso, G. A., Silva, L. A. P., Ferreira, M. E. 2020. Análise do Balanço de Radiação e Energia em Áreas de Veredas no Norte de Minas Gerais, Bioma Cerrado. Revista Cerrados, Montes Claros/MG, 18, -247, jan./jun.- Disponível: DOI:<https://doi.org/10.22238/rc244826922201801220247>