

## **IZBOLJŠEVANJE PROSTORSKE LOČLJIVOSTI LANDSAT 8 TERMOGRAMA V LUČI MESTNEGA TOPLOTNEGA OTOKA**

### **Veno Jaša Grujić**

Mag., biologije in ekologije z naravovarstvom, ast.  
Oddelek za razredni pouk in Oddelek za biologijo  
Pedagoška fakulteta in Fakulteta za naravoslovje in matematiko  
Koroška cesta 160, SI - 2000 Maribor  
e-mail: veno.grujic@um.si

### **Mitja Kaligarič**

Dr., uni. dipl. biolog, red. prof.  
Oddelek za biologijo  
Fakulteta za naravoslovje in matematiko  
Univerza v Mariboru  
Koroška cesta 160, SI-2000 Maribor, Slovenija  
e-mail: mitja.kaligari@um.si

### **Sonja Škornik**

Dr., prof. biologije in kemije, izr. prof.  
Oddelek za biologijo  
Fakulteta za naravoslovje in matematiko  
Univerza v Mariboru  
Koroška cesta 160, SI-2000 Maribor, Slovenija  
e-mail: sonja.skornik@um.si

### **Nataša Pipenbaher**

Dr., uni. dipl. inž. kmetijstva, doc.  
Oddelek za biologijo  
Fakulteta za naravoslovje in matematiko  
Univerza v Mariboru  
Koroška cesta 160, SI-2000 Maribor, Slovenija  
e-mail: natasa.pipenbaher@um.si

### **Igor Žiberna**

Dr., prof. geografije in zgodovine, izr. prof.  
Oddelek za geografijo  
Filozofska fakulteta  
Koroška cesta 160, SI - 2000 Maribor, Slovenija  
e-mail: igor.ziberna@um.si

### **Lučka Kajfež-Bogataj**

Dr., uni. dipl. inž. meteorologije, red. prof.  
Oddelek za agronomijo  
Biotehniška fakulteta  
Jamnikarjeva ulica 101, SI - 1000 Ljubljana, Slovenija  
e-mail: lucka.kajfez.bogataj@bf.uni-lj.si

### **Zalika Črepinšek**

Dr., uni. dipl. inž. kmetijstva, asisten  
Oddelek za agronomijo  
Biotehniška fakulteta  
Jamnikarjeva ulica 101, SI - 1000 Ljubljana, Slovenija  
e-mail: zalika.crepinsek@bf.uni-lj.si

### **David Pintarič**

Bratov Pihlar 9a  
9240 Ljutomer, Slovenija  
e-mail: david.pintaric@gmail.com

### **Danijel Ivajnsič**

Dr., prof. geografije in biologije, doc.  
Oddelek za geografijo in Oddelek za biologijo  
Filozofska fakulteta in Fakulteta za naravoslovje in matematiko  
Koroška cesta 160, SI - 2000 Maribor, Slovenija  
e-mail: dani.ivajnsic@um.si

### **Daša Donša**

Mag., biologije in ekologije z naravovarstvom, ast.  
Oddelek za biologijo  
Fakulteta za naravoslovje in matematiko  
Univerza v Mariboru  
Koroška cesta 160, SI-2000 Maribor, Slovenija  
e-mail: dasa.donsa1@um.si

UDK: 551.584:528.88

COBISS: 1.01

### ***Izvleček***

#### **Izboljševanje prostorske ločljivosti Landsat 8 termograma v luči mestnega toplotnega otoka**

Dandanes več kot polovica ljudi živi v ubranih sistemih. Posledično se širijo pozidane površine, ki s svojimi lastnostmi ustvarjajo učinek mestnega toplotnega otoka, ki velja za enega izmed najbolj značilnih pojavov urbane gradnje in antropogenih aktivnosti. Pojav se zaradi globalnih podnebnih sprememb značilno krepi, kar dodatno vpliva na psihološko in fiziološko stanje ranljivih skupin ljudi. Njegovi vplivi segajo tudi na področje gospodarstva, še zlasti na porabo energije v mestih. Za uspešno načrtovanje omilitvenih in prilagoditvenih ukrepov, planiranje urbane zasnove ter trajnostni razvoj mest, so ključnega pomena analitične študije pojava mestnega toplotnega otoka, pri katerih se uporablja kombinacija podatkov *in-situ* meritev in podob daljinskega zaznavanja. Pri uporabi slednjih smo pogosto omejeni s prostorsko ločljivostjo termičnih kanalov.

#### ***Ključne besede***

Daljinsko zaznavanje, mobilne meritve, NDVI, satelitske podobe, termični kanal

### ***Abstract***

#### **Landsat 8-based land surface temperature downscaling: the urban heat island perspective**

More than half of today's global human population lives in urban areas. As a result, built-up areas are expanding and thus creating the urban heat island (UHI) effect. This effect is known as one of the most widely recognized local meteoroidal phenomenon caused by anthropogenic activity. Owing to global climate change, the UHI phenomenon is intensifying, which poses even bigger threat to vulnerable social groups of citizens. It is also affecting the urban economy, especially energy consumption. For successful planning of mitigation and adaptation measures,

urban design and sustainable development, analytical studies of the UHI phenomenon, using a combination of in-situ measurement data and remote sensing data, are crucial. When using the latter, we are often limited by the spatial resolution of the corresponding thermal bands.

**Keywords**

Remote sensing, mobile measurements, NDVI, satellite imagery, thermal band

## 1. Uvod

Ob širjenju urbanih površin izgubljam naravno vegetacijo, le-to pa zamenjajo umetni materiali, kot sta cement in asfalt (Wang, Liu, Tang in Wang 2019). Urbana gradnja na ta način povzroči spremembo v površinskem albedu, emisivnosti in toplotni kapaciteti (Rizwan, Dennis in Liu 2008). Posledično zaznavamo značilno kopičenje toplote v urbanih predelih, ki se še dodatno jača ob antropogenih aktivnostih (Yang, Qian, Song in Zheng 2016) pri katerih se sprošča toplota (industrija, transport) (Tam, Gough in Mohsin 2015). Nastalo razliko v temperaturi zraka med urbano površino in njeno ruralno okolico imenujemo mestni toplotni otok (MTO) (ang. Urban Heat Island [UHI]) (Sobrino in Irakulis 2020). Pri tem je lahko temperatura v središču mesta do 10°C višja v primerjavi z nepozidano okolico. Intenzivnost pojava MTO je povezana z obsegom pozidanih površin, gostoto prebivalstva, človekovimi aktivnostmi, socio-ekonomskimi vplivi (Tam, Gough in Mohsin 2015), pokrovnostjo vegetacije ter vremenskimi razmerami (Chen, Zhao, Li in Yin 2006). MTO velja za eno izmed najbolj problematičnih posledic hitre urbanizacije (Sobrino in Irakulis 2020). Tako oblikovana posebna mestna klima ima lahko negativen vpliv na zdravje prebivalcev (Yang, Qian, Song in Zheng 2016), kar je še posebej izrazito med vse pogostejšimi vročinskimi valovi (Manoli in sod. 2019).

Pri pojavu MTO opazujemo temperaturno anomalijo ozračja, ki se običajno beleži z in-situ meritvami. Lahko pa taisti meteorološki fenomen opišemo tudi z anomalijo temperature površja (ang. Land Surface Temperature [LST]), pri čemer gre za tako imenovani površinski mestni toplotni otok (pMTO) (ang. Surface Urban Heat Island [SUHI]) (Miles in Esau 2020). Za raziskovanje slednjega se lahko naslonimo na podatke daljinskega zaznavanja (Sobrino in Irakulis 2020), ki so produkt različnih senzorjev nameščenih na satelitskih ali sorodnih platformah. Pogosto so za te namene v uporabi podobe satelita Landsat TIRS (ang. Thermal Infrared Sensor) (Kaplan, Avdan in Avdan 2018). Podatki daljinskega zaznavanja imajo kljub številnim prednostim, kot je na primer zajemanje podatkov večjega območja (regije), tudi slabosti (Zawadzka, Corstanje, Harris in Truckell 2019). Ena izmed največjih težav omenjenih podatkov je prostorska resolucija termičnih kanalov, ki je običajno nezadostna za izdelavo kvalitetnih ocen na lokalni ravni (Cho, Kim in Kim 2018). To omejitev lahko zaobidemo z uporabo statistične metode izboljševanja prostorske ločljivosti (ang. downscaling) (Zawadzka, Corstanje, Harris in Truckell 2019), pri kateri ustvarimo zvezo med spremenljivko LST in podatki boljše prostorske ločljivosti, kot so na primer vegetacijski indeksi (Kyalo 2017). Spremenljivka LST je običajno močno korelirana z rabo tal in abundanco vegetacije, ki jo lahko merimo z omenjenimi indeksi. Za namene študij MTO s podatki daljinskega zaznavanja, se za oceno vegetacijskega pokrova pogosto uporablja vegetacijski indeks NDVI (ang. The Normalized Difference Vegetation Index) (Kaplan, Avdan in Avdan 2018).

V prispevku se tako naslanjamo na omenjeno funkcijsko zvezo med spremenljivkama LST in NDVI s čimer skušamo: (1) izboljšati prostorsko ločljivost Landsat 8 termograma na območju dveh urbanih sistemov (Murska Sobota in Ljutomer), (2) v obeh analizirati oblikovani površinski MTO (pMTO) ter (3) primerjati razlike v temperaturnem polju pMTO in MTO na dan zajema satelitske podobe.

## 2. Metode

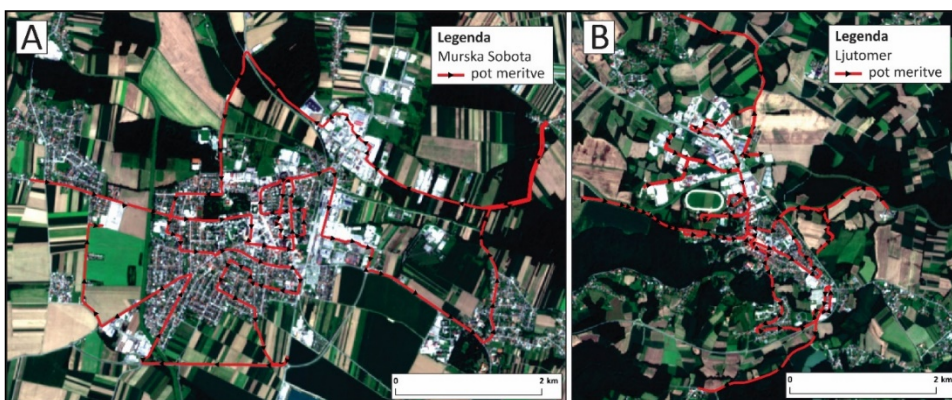
### 2.1. Raziskovalno območje

V študiji obravnavamo mesti Murska Sobota in Ljutomer, ki se razlikujeta v urbani strukturi in deležu pozidanih površin. Murska Sobota šteje nekaj čez 11000 prebivalcev, Ljutomer pa ima 3500 prebivalcev. Največji zeleni površini v Murski Soboti sta park v središču mesta (11 ha) in mestni gozd Fazanerija (30 ha), v Ljutomeru pa je to mestni park (10 ha).

Povezavo med velikostjo mesta v številu prebivalcev in intenziteto pojava MTO je Oke, na podlagi nočnih mobilnih meritev temperature zraka, opisal že leta 1973 (Oke 1973). Dodaten kriterij za izbor obeh mest je bila razpoložljivost tako daljinsko zaznanih kot terenskih podatkov, na podlagi katerih smo lahko poiskali odgovore na zadana raziskovalna vprašanja.

### 2.2. Baze podatkov

Naša študija je temeljila na satelitskih podobah satelitov Landsat 8 in Sentinel-2 ter podatkih terenskih mobilnih meritev temperature zraka. Iz prosto dostopne spletne baze USGS EarthExplorer (Medmrežje 1) smo pridobili brez-oblačno satelitsko podobo Landsat 8 OLI/TIRS C1 Level-1 na dan 8. 8. 2020. Iz prosto dostopne spletne baze Copernicus Open Access Hub (Medmrežje 2) smo v nadaljevanju prenesli Sentinel 2 MSI - Level 2A produkt za dan 8. 8. 2020. Pasovna širina obeh satelitskih podob je zaobjela obe raziskovani območji (Mursko Soboto in Ljutomer). V obeh mestih smo na dan 8. 8. 2020 izvedli tudi terenske mobilne meritve temperature zraka (Slika 1) s pomočjo GPS senzorja (točnost  $\pm 2\text{m}$ ) in dataloggerja, ki je beležil temperaturo zraka v sekundnem intervalu (točnost  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ; ločljivost  $0.1^\circ\text{C}$ ). Zaradi strukture cestnega omrežja so se meritve temperature zraka na določenih cestnih odsekih ponovile. Z uporabo algoritmov upoštevanja medsebojne razdalje točk meritev in časa njihovega zajetja smo dobljeno podatkovno bazo filtrirali. Odstranili smo tudi morebitne napake v zapisu podatkov.



Slika 1: Pot terenske mobilne meritve v Murski Soboti (A) in Ljutomeru (B).  
Vir podlage: RGB kompozitna podoba satelita Sentinel-2, ESA 2020.

### 2.3. Predobdelava podatkov

V inicialni fazi smo v programu TerrSet (Eastman 2016) za podobo satelita Landsat 8 izračunali atmosfersko korekcijo. Nato smo s pomočjo termičnih kanalov (10 in 11) izdelali termogram (LST) v  $^\circ\text{C}$  (prostorske ločljivosti  $30\text{ m}^2$  [ $\text{LST}_{30}$ ]). Iz rdečega (4.)

in bližje-infrardečega (5.) kanala smo izračunali vegetacijski indeks NDVI v prostorski ločljivosti 30 m<sup>2</sup> (NDVI<sub>30</sub>). Z regresijsko analizo vseh slikovnih enot spremenljivk LST<sub>30</sub> (odvisna) in NDVI<sub>30</sub> (neodvisna) smo pridobili enačbo premice, ki je v nadaljevanju omogočila izboljševanje prostorske ločljivosti Landsat 8 termograma. Za ta namen smo potrebovali še kazalec NDVI v 10-metrski prostorski ločljivosti (NDVI<sub>10</sub>), ki smo ga v programu ArcMap (ESRI 2020) izračunali s pomočjo 4. (rdeči) in 8. (bližje-infrardeči) kanala satelita Sentinel-2.

Ker nas je zanimala razlika v prostorskem temperaturnem režimu tal in zraka, v obeh obravnavanih urbanih sistemih, smo pripravili tudi interpolirano temperaturno polje mobilnih meritev za Mursko Soboto in Ljutomer. Uporabili smo okolje ArcMap (ESRI 2020) in interpolacijski algoritmom IDW (ang. Inverse Distance Weighting) ter 100-metrsko pufersko cono.

#### 2.4. Izboljševanje prostorske ločljivosti termograma

Postopek izboljševanja prostorske ločljivosti Landsat 8 termograma smo izvedli v več korakih, povzetih po študijah Kustas, Norman, Anderson in French (2003) ter Kyalo (2017). V prvem koraku (Enačba 1) smo z regresijsko enačbo in kazalcem NDVI<sub>30</sub> izračunali pričakovano vrednost LST (LST(NDVI)<sub>30</sub>), pri čemer je a smerni koeficient, b pa začetna vrednost oziroma konstanta regresijske premice.

$$LST(NDVI)_{30} = aNDVI_{30} + b \quad (\text{Enačba 1})$$

V naslednjem koraku (Enačba 2) smo izračunali razliko ( $\Delta LST$ ) med dejansko (LST<sub>30</sub>) in napovedano (LST(NDVI)<sub>30</sub>) vrednostjo LST v prostorski ločljivosti 30 m<sup>2</sup>, kar predstavlja napako (ostanke) napovedi.

$$\Delta LST = LST_{30} - LST(NDVI)_{30} \quad (\text{Enačba 2})$$

V zadnjem koraku smo izračunali LST v prostorski ločljivosti 10 m<sup>2</sup> (LST<sub>10</sub>) na podlagi Enačbe 3, v katero smo vstavili NDVI produkt satelita Sentinel 2 (NDVI<sub>10</sub>).

$$LST_{10} = (aNDVI_{10} + b) + \Delta LST \quad (\text{Enačba 3})$$

Končni produkt je za faktor 3 izboljšana prostorska ločljivosti Landsat 8 termograma z velikostjo slikovne enote 10 m<sup>2</sup>.

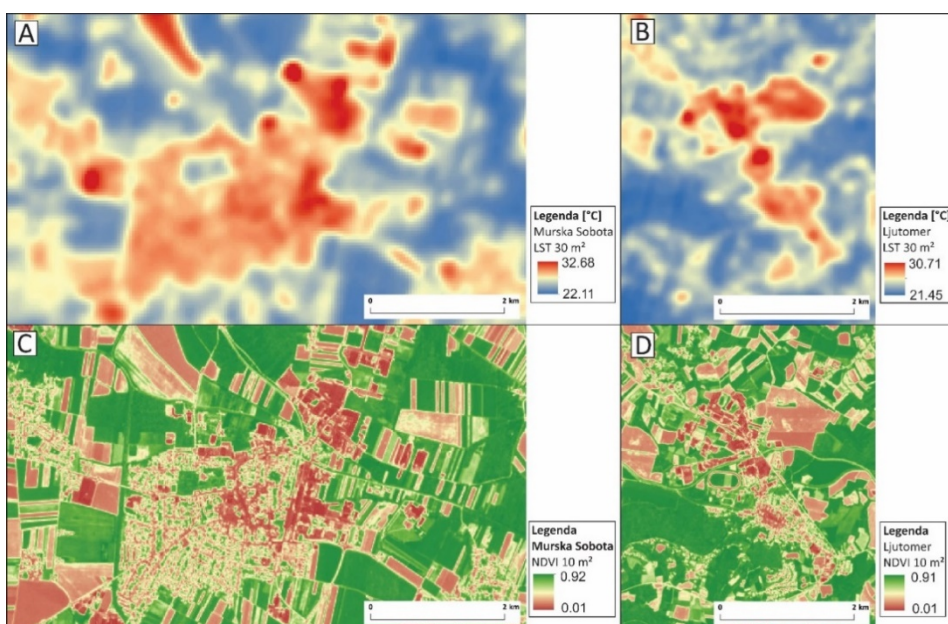
#### 2.5. Povezava med temperaturo površja in temperaturo zraka

V končni fazi študije smo primerjali termogram izboljšane prostorske ločljivosti (LST<sub>10</sub>) z interpoliranim temperaturnim poljem zraka mobilnih meritev (T<sub>IDW</sub>). Generirali smo podobo razlik med spremenljivko LST<sub>10</sub> in spremenljivko T<sub>IDW</sub> ob upoštevanju 100-metrške puferske cone s katero smo obdali lokalitete mobilnih meritev. Velja poudariti, da gre sicer za posredno primerjavo zaradi časovnega zamika podatkov. Satelitska podoba je nastala 8. 8. 2020 ob 9:45 po UTC, mobilne meritve pa ob 14:45-15:30. Ne glede na to, je primerjava obeh spremenljivk zanimiva predvsem z vidika razvoja pojava MTO v obeh urbanih sistemih. Anticiklonalni vremenski tip se v obravnavanem časovnem intervalu ni menjal. Prevladovalo je jasno vreme z šibkim JZ vetrom (1.8 m/s) (ARSO 2020).

### 3. Rezultati in diskusija

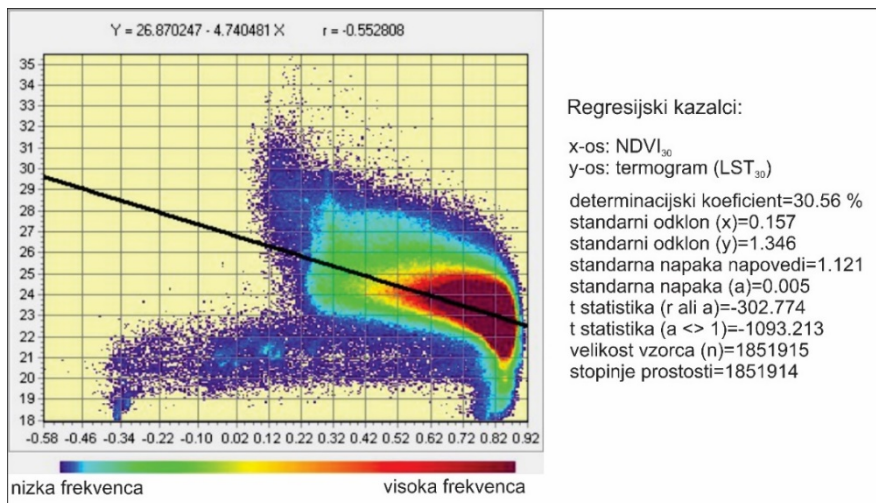
#### 3.1. LST in NDVI

Temperatura površja (LST) se v urbanih sistemih zvišuje zaradi antropogenega sproščanja toplote, vnašanja umetnih materialov z visoko toplotno kapaciteto in konduktivnostjo, odstranjevanja vegetacijskega pokrova na račun širjenja infrastrukture, itd. Prav prisotnost vegetacije in vodnih teles temperaturo površja in zraka znižuje s procesoma evaporacije in evapotranspiracije (Sundara Kumar, Udaya Bhaskar in Padmakumari 2012). Ob primerjavi termograma satelitske podobe Landsat 8 (prostorska ločljivost 30 m<sup>2</sup>) in vegetacijskega indeksa NDVI, ki je produkt satelita Sentinel-2 (prostorska ločljivost 10 m<sup>2</sup>), za območji Murska Sobota in Ljutomer (Slika 2) lahko razberemo, da je na predelih z nižjim NDVI zaznavna višja temperatura površja. Največje vrednosti LST pripadajo pozidani mestni strukturi. V obeh primerih še posebej izstopata industrijska ter trgovinska cona.



Slika 2: Termogram Landsat 8 satelitske podobe za Mursko Soboto (A) in Ljutomer (B) ter vegetacijski indeks NDVI Sentinel 2 satelitske podobe za Mursko Soboto (C) in Ljutomer (D).

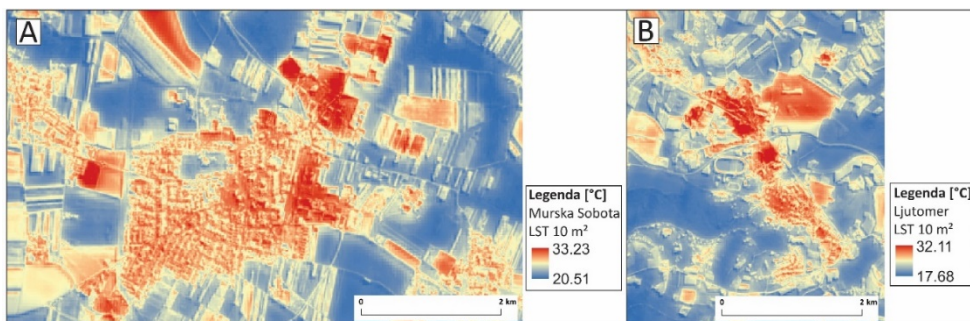
Nasprotno velja za ruralno okolico z izjemo preoranih njivskih površin (manjši albedo). Kazalca NDVI in LST sta namreč v obratnem sorazmerju (Yuan in Bauer 2006), posledično so nižje vrednosti LST na območjih, ki imajo visoko vrednost NDVI oziroma večjo nadzemno biomaso (Slika 3). Izboljševanje prostorske ločljivosti termograma po metodi Kustasa, Normana, Andersona in Frencha (2003) ter Kyaloa (2017) temelji na preprosti linearni regresiji, ki sicer poenostavi razumevanje vmesnih in končnega produkta, ne poda pa idelanih rezultatov pri vseh vrednostih neodvisne spremenljivke NDVI. Na tem mestu lahko izpostavimo tiste slikovne enote, ki predstavljajo vodne in sorodne površine z nizkimi ali celo negativnimi vrednostmi NDVI (Slika 3). Posledično je determinacijski koeficient regresijske analize na območju celotne satelitske podobe dokaj nizek (30.56 %).



Slika 3: Rezultat prostorske regresijske analize neodvisne spremenljivke NDVI in odvisne spremenljivke LST, kot produkta satelitske podobe Landsat 8, s pripadajočo enačbo premice in ostalimi regresijskimi kazalci.

### 3.2. Izboljšana prostorska ločljivost spremenljivke LST

Če primerjamo Sliko 2 (A in B) ter Sliko 4 (A in B) lahko opazujemo napredek v prostorskem odtisu spremenljivke LST (iz 30- na 10-metrsko velikost slikovne enote). V obeh mestih je površinsko temperaturno polje bolj strukturirano. Zaznavne so večje razlike v temperaturi tal med posameznimi mestnimi predeli oziroma lokalnimi podnebnimi conami (Stewart in Oke 2012). Izrazitejši je kontrast med mestnimi zelenimi površinami in pozidano okolico. Prepoznavne so celo razlike v temperaturi tal znotraj pozidane strukture obeh mest. Lep primer je območje endružinskih hiš z vrtovi. Mozaik vrtov povzroči nekoliko počasnejšo segrevanje te lokalne podnebne cone tako v Murski Soboti kot v Ljutomeru.

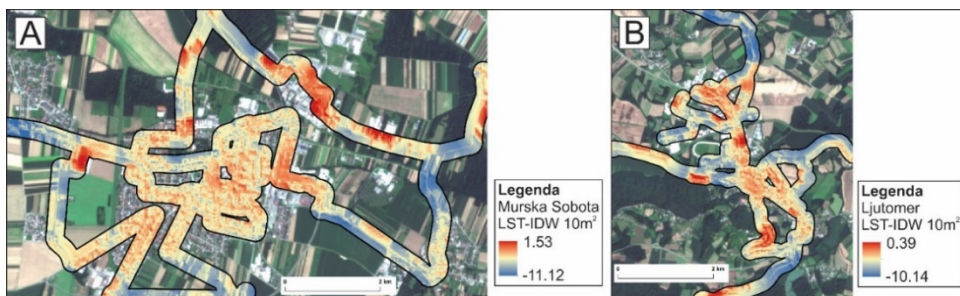


Slika 4: Termogram prostorske ločljivosti 10 m<sup>2</sup> za Mursko Sobotu (A) in Ljutomer (B).



### 3.3. Razlike med temperaturo površja (LST) in temperaturo zraka ( $T_{IDW}$ )

Na Sliki 5 so prikazane razlike med izboljšanim termogramom ( $LST_{10}$ ) obeh mest in temperaturnim poljem zraka, ki je rezultat interpolacije terenski mobilnih meritev ( $T_{IDW}$ ). Kljub temu, da je med obema spremenljivkama 5 ur razlike, lahko iz tovrstnih rezultatov vseeno razberemo dinamiko segrevanja antropogenih in drugih površin v poletnih mesecih z kratkimi nočmi. Majhna razlike v temperaturi so zaznavne predvsem pri pozidanih površinah, njivah brez vegetacijskega pokrova ter južnih legah v mestu Ljutomer (Slika 5B). Gre za lep dokaz večje toplotne kapacitete in konduktivnosti gradbenih materialov (počasnejše segrevanje in počasnejše ohlajanje), manjšega albeda (večje absorpcije kratkovalovnega sevanja) ali vpliva reliefne izoblikovanosti (večji vpadni kot sončnih žarkov) na oblikovanje temperaturnega polja v urbani strukturi. Po drugi strani je temperatura tal z vegetacijo pokritih površin v okolici obeh mest po lokalnem času 11:45 bistveno nižja (v Murski Soboti do  $11^{\circ}\text{C}$ , v Ljutomeru do  $10^{\circ}\text{C}$ ) od izoblikovanega temperaturnega polja zraka ob 16:45. Vlaga v tleh in v vegetacijskem pokrovu ključno doprinese k nastalim razlikam pri tem pa na energijsko bilanco teh površin vplivata še evapotranspiracija in advekcija (bodisi zaradi intenzitete MTO ali kot posledica prevladujočega vremenskega tipa).



Slika 5: Primerjava termograma temperature površja in interpoliranega temperaturnega polja zraka, na prostorski ločljivosti  $10\text{ m}^2$ , za Mursko Soboto (A) in Ljutomer (B).

Vir podlage: RGB kompozitna podoba satelita Sentinel-2, ESA 2020.

## 4. Zaključek

Zagotavljanje kvalitete bivalnega okolja v urbanih sistemih postaja vse težje. V zadnji polovici stoletja se je delež urbane populacije v globalnem merilu zvišal iz 34 % na 54 %. Pričakuje se, da se bo le-ta do leta 2050 povzpela na 66 % (Xu in sod. 2017). K temu lahko dodamo še posledice podnebnih sprememb, ki se odražajo predvsem v dvigu povprečne temperature zraka, spremenjenem vzorcu padavin in v večji frekvenci ekstremnih vremenskih pojavov (Mirza 2003). Posledično se mesta širom sveta soočajo z vse večjim toplotnim stresom (večjo jakostjo pojava MTO), še zlasti ob nastopu vse pogostejših vročinskih valov. Zaradi negativnih učinkov omenjenega pojava na urbano življenje narašča število študij na to tematiko (Xu in sod. 2017). V ospredju tovrstnih raziskav je uporaba podatkov daljinskega zaznavanja in njihov derivat temperatura površja (LST). Kljub vse splošni uporabnosti satelitskih podob, pa smo nemalokrat omejeni z njihovo prostorsko ločljivostjo. Posledično se vzporedno razvijajo vse boljši metodološki pristopi za izboljšanje inicialne prostorske ločljivosti satelitskih podob, ki pa po večini temeljijo na posrednih ali tako imenovanih »proxy« kazalcih (Zawadzka, Corstanje, Harris in Truckell 2019). V prispevku se tako naslanjamo na zvezo LST-NDVI, ki po ugotovitvah Kustasa, Normana, Andersona in

Frencha (2003) ter Kyaloa (2017) omogoča izboljševanje bodisi MODIS ali Landsat termogramov. Rezultati kažejo podrobnejšo strukturo temperaturnih razmer tal v mestih Murska Sobota in Ljutomer. Zaznavni so večji temperaturni kontrasti med obstoječimi lokalnimi podnebnimi conami v obeh mestih. V luči eksternih vrednosti spremenljivke LST lahko po eni strani izpostavimo industrijski coni obeh mest, po drugi pa zelene površine znotraj urbane strukture. Primerjava temperature tal in zraka je nakazala pregetost pozidanih površin ter vpliv vlage v vegetacijskem pokrovu ruralne okolice obeh mest. Tovrstne študije so uporabne predvsem za prostorske planerje, ki se bodo v bližnji prihodnosti morali soočiti z omilitvenimi in prilagoditvenimi ukrepi usmerjenimi v zmanjšanje toplotnega stresa v urbanih sistemih.

## Zahvala

Študijo je omogočila Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije v sklopu projekta »Preprečevanje toplotnega stresa v urbanih sistemi v luči podnebnih sprememb« (J7-1822).

## Literatura

- Chen, X.-L., Zhao, H.-M., Li, P.-X., Yin, Z.-Y. 2006: Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sensing of Environment*, 133-146.
- Cho, K., Kim, Y., Kim, Y. 2018: Disaggregation of Landsat-8 Thermal Data Using Guided SWIR Imagery on the Scene of a Wildfire. *Remote Sensing* 10(1), 105. <https://doi.org/10.3390/rs10010105>
- Eastman, J. 2016: TerrSet. Clark Labs-Clark University.
- ESA 2020: Copernicus Sentinel data.
- ESRI 2020: ArcGIS Desktop, verzija 10.8. Redlands, Kalifornija: Environmental Systems Research Institute.
- Gorgani, S. A., Panahi, M., Rezaie, F. 2013: The Relationship between NDVI and LST in the urban area of Mashhad, Iran. *International Conference on Civil Engineering Architecture & Urban Sustainable Development*, (str. 1-7). Tabriz, Iran.
- Kaplan, G., Avdan, U., Avdan, Z. Y. 2018: Urban Heat Island Analysis Using the Landsat 8 Satellite Data: A Case Study in Skopje, Macedonia. *Proceedings*, 1-5.
- Kustas, W. P., Norman, J. M., Anderson, M. C., French, A. N. 2003: Estimating subpixel surface temperatures and energy fluxes from the vegetation index-radiometric temperature relationship. *Remote Sensing of Environment*, 429-440.
- Kyalo, D. K. 2017: Sentinel-2 and MODIS land surface temperature based evapotranspiration for irrigation efficiency calculations. *Zaključno delo*. Enschede, Nizozemska: Fakulteta za geoinformatiko, znanost in opazovanje zemlje.
- Manoli, G., Fatichi, S., Schläpfer, M., Kailiang, Y., Crowther, T. W., Meili, N., Bou-Zeid, E. 2019: Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population. *Nature*, 55-62.
- Medmrežje 1. USGS. Pridobljeno iz EarthExplorer: <https://earthexplorer.usgs.gov/>; (9. 12 2020).
- Medmrežje 2. ESA. Pridobljeno iz Copernicus Open Access Hub: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>; (9. 12 2020).
- Miles, V., Esau, I. 2020: Surface urban heat islands in 57 cities across different climate in northern Fennoscandia. *Urban Climate*, 1-11.
- Mirza, M. Q. 2003: Climate change and extreme weather events: can developing countries adapt? *Climate Policy*, 233-248.

- Oke, T. R. 1973: City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment*, 769-779.
- Rizwan, A. M., Dennis, L. Y., Liu, C. 2008: A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 120-128.
- Schwarz, N., Schlink, U., Franck, U., Großmann, K. 2012: Relationship of land surface and air temperatures and its implications for quantifying urban heat island indicators—An application for the city of Leipzig (Germany). *Ecological Indicators*, 693-704.
- Sobrino, J. A., Irakulis, I. 2020: A Methodology for Comparing the Surface Urban Heat Island in Selected Urban Agglomerations Around the World from Sentinel-3 SLSTR Data. *Remote Sensing*, 1-29.
- Stewart, I. D., Oke, T. R. 2012: Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1879-1900.
- Sundara Kumar, K., Udaya Bhaskar, P., Padmakumari, K. 2012: Estimation of land surface temperature to study urban heat island effect using Landsat ETM+ image. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 771-778.
- Tam, B. Y., Gough, W. A., Mohsin, T. 2015: The impact of urbanization and the urban heat island effect on day to day temperature variation. *Urban Climate*, 1-15.
- Wang, W., Liu, K., Tang, R., & Wang, S. 2019: Remote sensing image-based analysis of the urban heat island effect in Shenzhen, China. *Physics and Chemistry of the Earth*, 168-175.
- Xu, X., Cai, H., Qiao, Z., Wang, L., Jin, C., Ge, Y., Wu, F. 2017: Impacts of Park Landscape Structure on Thermal Environment Using QuickBird and Landsat Images. *Chinese Geographical Science*, 818-826.
- Yang, L., Qian, F., Song, D.-X., Zheng, K.-J. 2016: Research on Urban Heat-island Effect. *Procedia Engineering*, 11-18.
- Yuan, F., Bauer, M. E. 2006: Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 1-12.
- Zawadzka, J., Corstanje, R., Harris, J., Truckell, I. 2019: Downscaling Landsat-8 land surface temperature maps in diverse urban landscapes using multivariate adaptive regression splines and very high resolution auxiliary data. *International Journal of Digital Earth*, 1-16.
- Zhou, B., Rybski, D., Kropp, J. P. 2017: The role of city size and urban form in the surface urban heat island. *Scientific reports*, 1-9.

## **LANDSAT 8-BASED LAND SURFACE TEMPERATURE DOWNSCALING: THE URBAN HEAT ISLAND PERSPECTIVE**

### **Summary**

Ensuring the quality of the living environment in urban systems is becoming increasingly difficult. In the last half of the century, the share of urban population on a global scale has risen from 34% to 54%, and it is expected to rise to 66% by 2050 (Xu et al. 2017). In addition to that, we are facing the consequences of climate change, which are mainly manifested in higher mean air temperatures, changed precipitation patterns and a higher frequency of extreme weather events (Mirza 2003). Consequently, cities all over the globe are facing intensive heat stress (increased UHI intensity), especially during more frequent heat waves. Owing to the negative effects on urban life caused by the UHI phenomenon, the number of studies on this topic are increasing (Xu et al. 2017). At the forefront of such research are remote sensing data and their common derivative, the land surface temperature (LST). Despite the general usefulness of satellite imagery, one is often limited by their spatial resolution. As a result, better methodological approaches are being developed simultaneously to improve the initial spatial resolution of satellite images, which are mostly based on indirect or so-called "proxy" indicators (Zawadzka, Corstanje, Harris, & Truckell 2019). In this research, we rely on the LST-NDVI association, which, according to Kustas, Norman, Anderson, and French (2003) and Kyalo (2017), allows the improvement of either MODIS or Landsat thermograms. Our results show more detailed structure of surface temperature conditions in the settlements Murska Sobota and Ljutomer. In both towns, higher temperature contrasts in their local climate zones were detected. By considering the highest and lowest values of the LST variable, we can highlight the industrial zones of both towns, and on the other hand, the green areas within the urban structure. The comparison of surface and air temperature layers has shown the overheating of the built-up areas and the influence of humidity in the vegetation cover of the rural surroundings of both towns. Such studies are especially useful for spatial planners, who will have to deal in the near future with mitigation and adaptation measures orientated towards heat stress reduction in almost all urban systems.