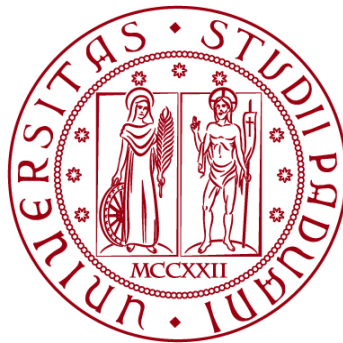


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE

Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio



TESI DI LAUREA

Mappatura delle isole di calore urbano durante eventi estremi a supporto dei piani di adattamento: il caso studio del Comune di Venezia

Relatore: Prof. Salvatore Pappalardo

Correlatore: Dr. Carlo Zanetti

Laureanda: Maria Teodoro

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

Abstract

Da oltre un secolo la Terra è interessata da un aumento globale delle temperature, causato dalle attività antropiche. Tra gli impatti locali e regionali del cambiamento climatico, gli eventi meteorologici estremi, come le ondate di calore, risultano essere in aumento, sia in termini di frequenza che di durata ed intensità. Le aree più colpite risultano essere quelle più antropizzate, ove la dinamica delle cosiddette isole di calore urbano tende ad amplificare il fenomeno meteorologico estremo e, di conseguenza, il rischio climatico associato. Il fenomeno delle isole di calore urbano è causato da diversi fattori, tra cui la copertura ed uso del suolo, l'albedo e la morfologia urbana. Gli impatti di tali estremi climatici sul territorio possono essere importanti, soprattutto in termini di salute pubblica per le fasce di popolazione più vulnerabili.

L'obiettivo principale della tesi si propone di indagare la dinamica spaziale delle isole di calore urbano all'interno del Comune di Venezia. Gli obiettivi specifici della ricerca intendono: i) cartografare le temperature superficiali a scala urbana e sub-urbana; ii) approfondire la relazione tra isole di calore e consumo di suolo; iii) identificare *hotspot* termici all'interno del territorio comunale; iv) indagare la variabilità spaziale delle temperature dalla linea di costa. Tramite analisi meteorologiche dei dati di tre stazioni ARPAV (Venezia-Istituto Cavani, Favaro Veneto e Cavallino-Treporti) sono state identificate due giornate per l'analisi spaziale delle isole di calore, ossia il 3 luglio ed il 4 agosto 2022. Tramite l'acquisizione di immagini termiche del satellite Landsat 8-9 (OLI/TIRS) e l'utilizzo di metodologie e geoprocessi propri dei *Geographic Information Systems* - utilizzati in ambiente *open-source* (QGIS) - è stato possibile derivare, modellizzare e valutare la distribuzione spaziale delle temperature superficiali e di geovisualizzare le isole di calore urbano. L'analisi in ambiente GIS ha inoltre consentito di quantificare le isole di calore a livello di ambiti amministrativi (5 e 6), rivelando che le zone con valori termici più elevati sono, in generale, localizzati sulla terra ferma, mentre la parte insulare registra temperature medie fino a 4,6 °C inferiori. In entrambi i giorni il polo industriale di Marghera risulta essere il settore più caldo a livello comunale (temperatura media pari a 27,3 °C in data 04/08). Le analisi spaziali del rapporto tra temperature superficiali e copertura del suolo indicano che, in media, le superfici acquatiche presentano valori fino a 5 °C inferiori alla terraferma. Applicando, infine, il modello di regressione *Ordinary Least Squares* è stata osservata una correlazione positiva tra consumo di suolo e temperature superficiali, pari a 0,303 per il 03/07 e 0,074 per il 04/08. Il presente lavoro, mettendo in luce la variabilità spaziale dei valori estremi di temperatura superficiale, costituisce una prima base conoscitiva per l'implementazione di piani di adattamento climatico e di mitigazione alle isole di calore urbano.

INDICE

1. Introduzione	1
1.1 Cambiamento climatico e aumento della temperatura terrestre.....	1
1.2 Eventi meteo estremi: ondate di calore.....	3
1.3 Il fenomeno dell'isola di calore urbano.....	5
1.3.1 Impatti	7
1.4 Cause	9
1.4.1 Consumo di suolo e proprietà dei materiali.....	9
1.4.2 Calore antropogenico	11
1.4.3 Morfologia urbana.....	12
2. Materiali e Metodi	15
2.1 Inquadramento geografico dell'area di studio	15
2.1.1 Demografia	16
2.1.2 Consumo di suolo.....	18
2.2 Materiali.....	20
2.2.1 Dataset meteorologico.....	21
2.2.2 Immagini satellitari Landsat 8 e 9.....	22
2.2.3 Ambiti amministrativi	22
2.2.4 Copertura del suolo	23
2.3 Metodologia	24
3. Risultati e discussione.....	31
3.1 Mappatura delle isole di calore urbano.....	31
3.2 Isole di calore ed ambiti amministrativi	34
3.3 Relazione tra copertura del suolo e Land Surface Temperature	40
3.4 Analisi su <i>hotspots</i>	44
3.5 Variazione della LST rispetto alla linea di costa.....	47
4. Conclusioni	49

1. Introduzione

1.1 Cambiamento climatico e aumento della temperatura terrestre

L'ultimo rapporto dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2023) dichiara che le attività umane, principalmente per mezzo delle emissioni di gas ad effetto serra, hanno inequivocabilmente causato il riscaldamento globale, provocando un aumento della temperatura superficiale media di 1,2 °C tra il 2011 ed il 2020, rispetto al periodo 1850-1900.

Questa tendenza è ormai ampiamente documentata: nella sezione *Climate Indicators*, il programma Copernicus ha raccolto le variazioni di temperatura della superficie terrestre di sei dataset diversi. Dalla *Figura 1.2.b*, riportata di seguito, si determina che a partire dalla metà degli anni '70 si è registrato un aumento medio di 0,1 °C ogni cinque-sei anni, con un brusco aumento tra il 2015 e il 2022: per tutti e sei i dataset, infatti, questi otto anni sono stati i più caldi mai registrati (anche se la classifica dei singoli anni differisce leggermente). In particolare, per cinque dei sei dataset il 2016 è stato l'anno più caldo in assoluto, seguito poi dal 2020.

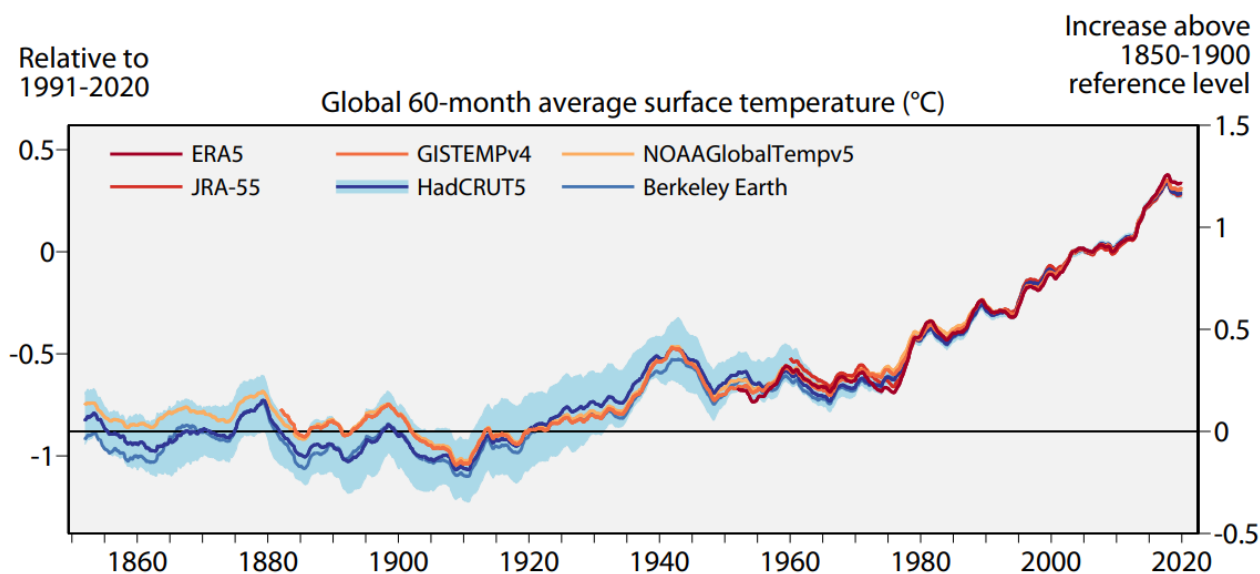


Figura 1.2.b. Temperatura media globale superficiale su periodi di 60 mesi, rispetto alla media del periodo 1991-2020 (asse di sinistra) e come aumento rispetto al livello di riferimento 1850-1900 (asse di destra), secondo sei dataset: ERA5 (C3S/ECMWF), JRA-55 (JMA), GISTEMPv4 (NASA), HadCRUT5 (Met Office Hadley Centre), NOAA GlobalTempv5 (NOAA) e Berkeley Earth. (fonte: Copernicus, C3S/ECMWF)

Il surriscaldamento globale non interessa le diverse aree della Terra in maniera omogenea, ed in alcune zone risulta ulteriormente accentuato. Concentrandosi per esempio sull'area del continente europeo, si osserva che l'aumento della temperatura in Europa è di circa 1 °C maggiore rispetto al corrispondente aumento a livello mondiale: il valore della temperatura media europea degli ultimi cinque anni è infatti di circa 2,2 °C superiore ai valori del periodo di riferimento 1850-1900, mentre, come già visto in precedenza, globalmente si registra un aumento di 1,2 °C.

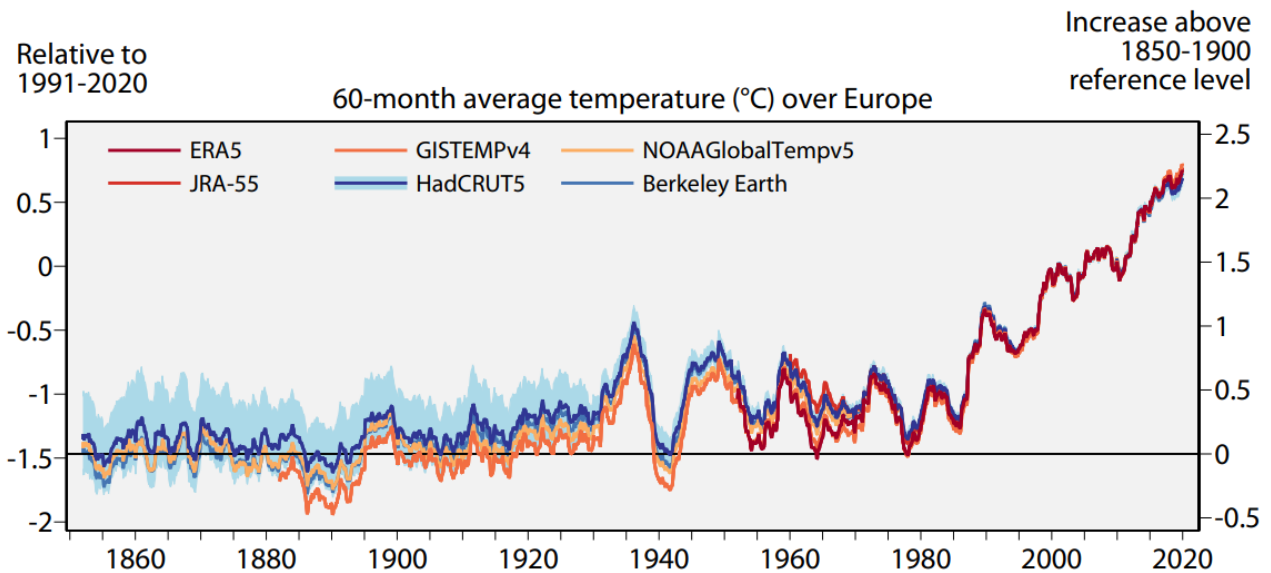


Figura 1.2.b. Temperatura media sul territorio europeo su periodi di 60 mesi, rispetto alla media del periodo 1991-2020 (asse di sinistra) e come aumento rispetto al livello di riferimento 1850-1900 (asse di destra), secondo sei dataset: ERA5 (C3S/ECMWF), JRA-55 (JMA), GISTEMPv4 (NASA), HadCRUT5 (Met Office Hadley Centre), NOAA GlobalTempv5 (NOAA) e Berkeley Earth. (fonte: Copernicus, C3S/ECMWF)

L'Europa è quindi riconosciuta come un *climate hotspot* a livello mondiale, e negli ultimi decenni si è riscaldata più velocemente di qualsiasi altro continente: il tasso medio di aumento della temperatura europea, secondo i dati ERA5, è di $+0,47 \pm 0,10$ °C per decennio dal 1979 al 2022.

Andando invece ad indagare le tendenze dei singoli Stati, e nello specifico quelle relative al territorio italiano, grazie al rapporto ISPRA “Gli indicatori del clima in Italia nel 2021” si determina che, seppur con un valore più basso rispetto a quello del continente europeo, l'Italia ottiene un tasso di crescita della temperatura media pari a $+0,37 \pm 0,04$ °C per decennio dal 1981 al 2021. La temperatura minima cresce invece con un valore di $+0.35 \pm 0.04$ °C, mentre la massima ottiene il tasso di crescita maggiore, pari a $+0.39 \pm 0.05$ °C.

1.2 Eventi meteo estremi: ondate di calore

L'aumento della temperatura globale amplifica il verificarsi di una serie di variazioni del sistema climatico, tra cui l'aumento in frequenza ed intensità di eventi estremi, come forti precipitazioni, alluvioni, siccità, ondate di calore e cicloni tropicali. (IPCC, 2023).

In particolare, per questo lavoro sarà essenziale approfondire il concetto di ondata di calore. L'ondata di calore (*Heat Wave*, HW), si definisce come un periodo, che può durare da pochi giorni a diverse settimane, in cui si registrano temperature superficiali eccezionalmente elevate rispetto a quelle mediamente previste. Non esiste però una definizione standardizzata globalmente riconosciuta: per esempio, il Met Office considera il verificarsi di una HW nel Regno Unito quando una località registra per almeno tre giorni consecutivi temperature massime giornaliere che raggiungono o superano una soglia prefissata, che varia tra i 25 °C e i 28 °C in base alla zona.

Nel corso degli ultimi anni le ondate di calore sono state sempre più intense e frequenti, e questa tendenza non sembra essere destinata a fermarsi. All'interno del rapporto IPCC *Summary for Policymakers* 2021 (Working Group I), si evince che è “virtualmente certo” che, a partire dagli anni '50, le HWs siano diventate più frequenti ed intense nella maggior parte delle regioni terrestri, e che, con un elevato grado di certezza, le attività umane ne siano la principale causa. Inoltre, gli scenari di un aumento della temperatura globale di 1,5 °C hanno evidenziato che il 13,8% della popolazione globale sarà esposta a HWs estreme, mentre in uno scenario di riscaldamento di 2 °C questa stima sale al 36,9% (Dosio et al, 2018).

In effetti, le 10 estati più calde d'Europa si sono verificate tutte dal 2003 a questa parte. Nel 2022 per esempio, intorno alla metà di luglio si sono verificate una serie di ondate di calore su gran parte dell'Europa occidentale, con temperature che sono salite oltre i 40°C per almeno un giorno in Spagna, Francia e, per la prima volta mai registrata, nel Regno Unito (Copernicus, 2022).

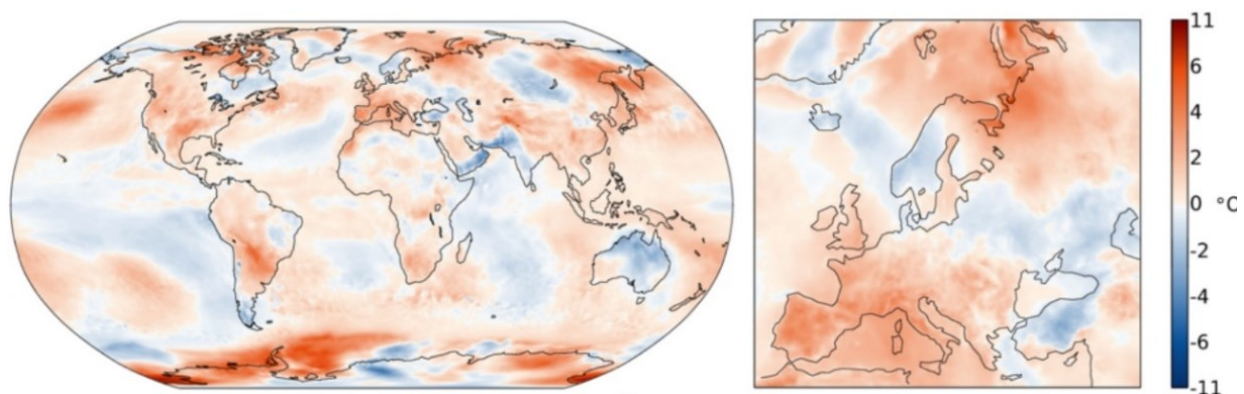


Figura 1.2.a: Anomalia di temperatura per luglio 2022 rispetto alla media di luglio per il periodo 1991-2020 (fonte: Copernicus, ECMWF)

Anche se questi valori estremi si registrano tipicamente nei mesi estivi, nel 2022 fin da maggio il bollettino sul clima C3S ha mostrato anomalie considerevoli per l'Europa sud-occidentale (Portogallo, Spagna, Francia meridionale e parti dell'Italia occidentale). A livello nazionale, le temperature di maggio 2022 hanno stabilito numerosi nuovi primati, a partire dalla Francia, che ha registrato il maggio più caldo a partire dal 1900. È stato il maggio che ha raggiunto le temperature massime in 92 anni anche per il Portogallo, e solo il maggio del 1964, in una raccolta dati iniziata nel 1961, è stato più caldo di quello del 2022 per la Spagna (Copernicus, 2022).

Sebbene il 2023 non sia ancora volto al termine, anche in questo caso nei mesi estivi si sono registrati nuovi record. Globalmente, luglio 2023 è stato di 0,72 °C più caldo rispetto alla corrispondente media mensile relativa al periodo 1991-2020, e di circa 1,5 °C più caldo rispetto alla media del 1850-1900: su scala mondiale, esso risulta quindi come il nuovo mese più caldo mai registrato. Anche in Italia nel 2023 si sono registrate temperature estreme: in Sardegna sono stati raggiunti i 48 °C, mentre l'osservatorio a Palermo, in Sicilia, ha rilevato un picco di 47 °C (Copernicus, 2023).

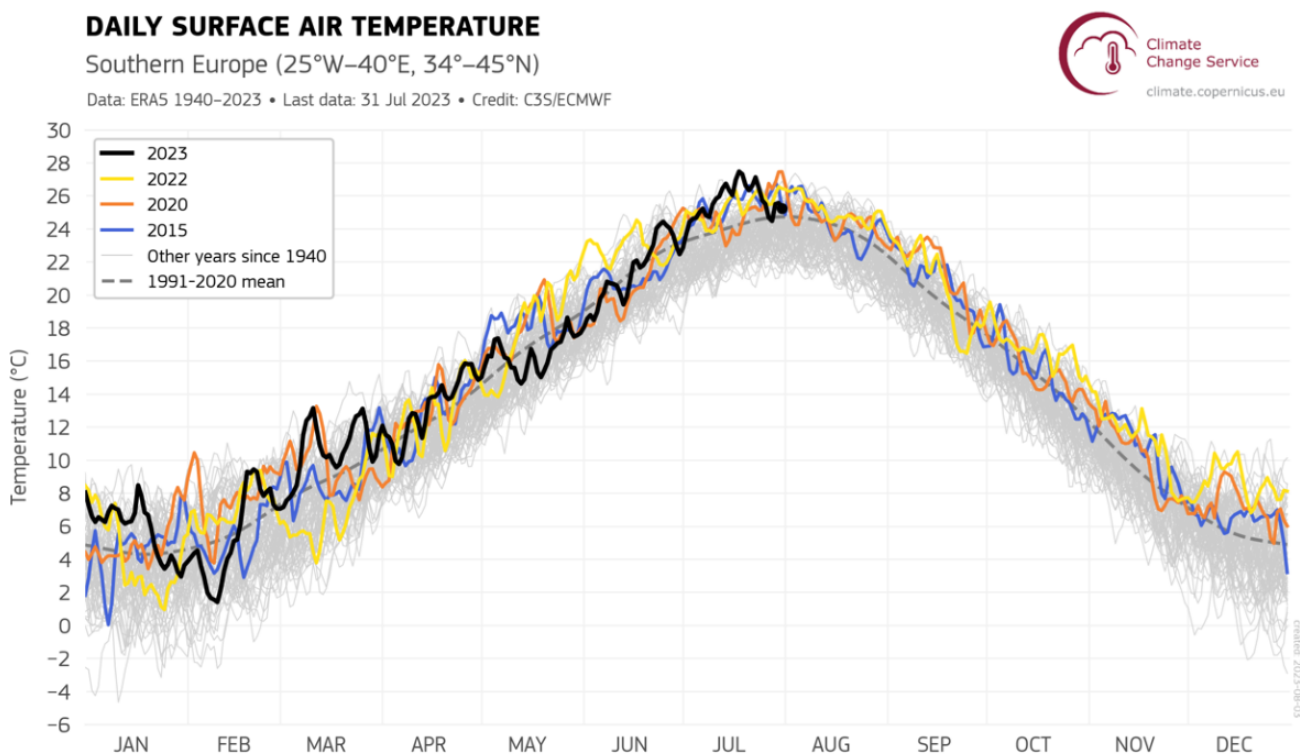


Figura 1.2.b: Temperatura media giornaliera nell'Europa meridionale dal 01/01/1940 al 23/07/2023, tracciata come serie temporale per ciascun anno. Il 2023 (luglio più caldo) è mostrato in nero. Il 2015 e il 2022 (il secondo e il terzo luglio più caldi) sono mostrati in blu e giallo. Il 2020 (anno con la precedente temperatura giornaliera più alta) è mostrato in rosso. Gli altri anni sono mostrati in grigio. La linea grigia tratteggiata rappresenta la media giornaliera per il periodo di riferimento 1991-2020.

(fonte: Copernicus, ECMWF)

1.3 Il fenomeno dell'isola di calore urbano

Nel 2018, secondo il *World Urbanization Prospects 2018* redatto dal *Department of Economic and Social Affairs* delle Nazioni Unite, il 55% della popolazione mondiale viveva in zone urbane. Lo spostamento dalle zone rurali a quelle urbane è un *trend* in crescita: si calcola che nel 1930 solo il 30% della popolazione vivesse in aree urbane mentre nel 2050 si stima che la quota raggiungerà il 68%, con una tendenza trainata principalmente dai paesi in via di sviluppo.

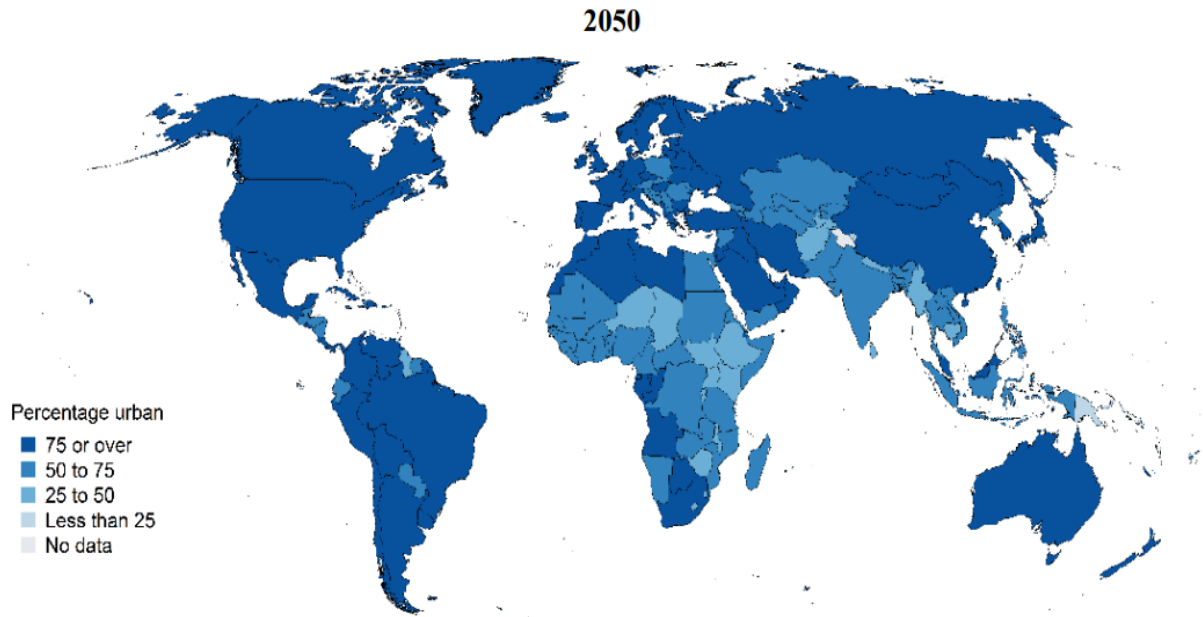


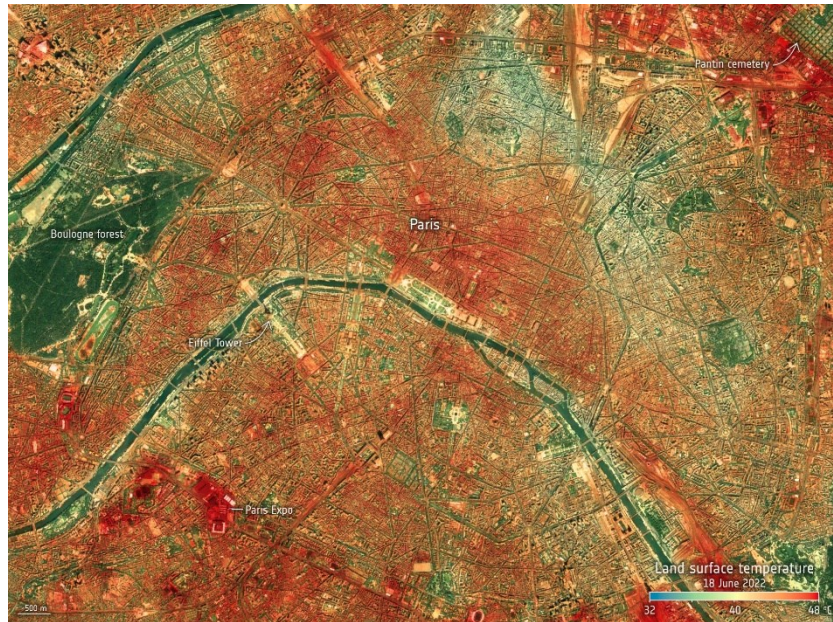
Figura 1.3.a: Stima della percentuale di popolazione residente in aree urbane nel 2050

(fonte: Nazioni Unite)

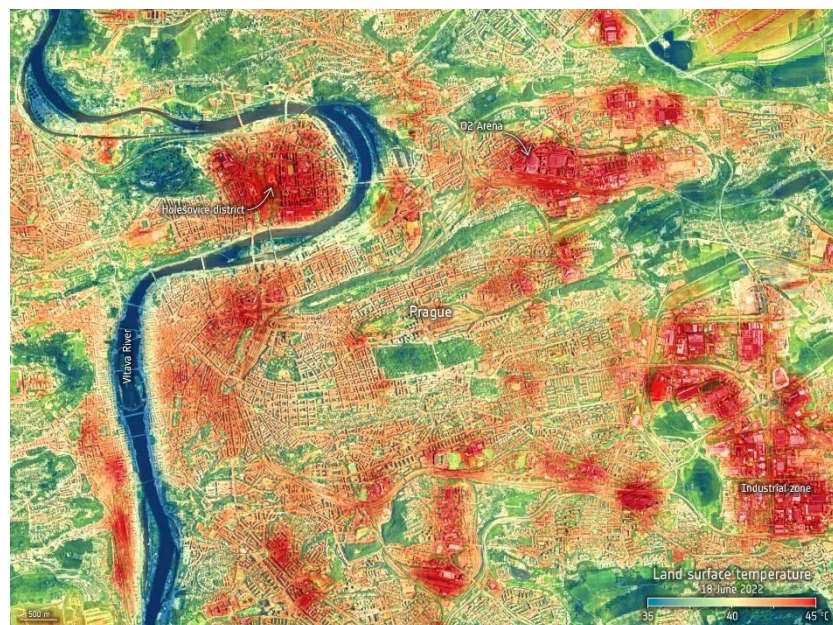
Questo implica che, in un contesto di surriscaldamento globale e ondate di calore più intense, un numero crescente di individui risentirà dell'impatto negativo dell'effetto "isola di calore", che si manifesta proprio nelle aree urbane.

Le isole di calore, note a livello internazionale come *Urban Heat Islands (UHIs)*, sono un fenomeno che comporta un microclima più caldo all'interno delle aree urbane cittadine rispetto alle zone rurali circostanti (Stewart e Oke, 1982). Queste sono causate da una serie di fattori concatenati che, come sarà esplorato in seguito, sono legati al consumo di suolo, alle diverse proprietà dei materiali, all'attività antropica e alla morfologia urbana.

Il fenomeno è stato ben documentato dall'European Space Agency, che nel giugno del 2022 ha infatti catturato, grazie allo strumento ECOSTRESS della Stazione Spaziale Internazionale, i recenti estremi di temperatura della superficie terrestre per alcune città europee, riportati qui di seguito.



*Figura 1.3.b: Temperatura della superficie terrestre a Parigi il 18 giugno 2022
(fonte: European Space Agency)*



*Figura 1.3.c: Temperatura della superficie terrestre a Praga il 18 giugno 2022
(fonte: European Space Agency)*

Come si approfondirà successivamente, il fenomeno delle isole di calore urbano viene ampiamente intensificato quando la naturale copertura del suolo, come la vegetazione, viene sostituita con dense concentrazioni di pavimentazione, edifici e altre superfici che assorbono e trattengono il calore. Già in *Figura 1.3.b* e *Figura 1.3.c* si evince chiaramente quanto più calda sia la superficie nelle parti edificate delle città rispetto a quella dei parchi, della vegetazione e dell'acqua.

1.3.1 Impatti

Gli eventi di calore estremo che si verificano in città hanno conseguenze dirette e indirette sulla salute degli individui e sulle comunità locali, intrecciandosi quindi anche con tematiche legate alla giustizia climatica e ai diritti umani.

Per prima cosa, il calore in città è il fattore scatenante di eventi di mortalità associati al caldo e del cosiddetto *heat stress*, sempre più frequenti a causa del surriscaldamento globale generato dall'attività umana (Vicedo-Cabrera et al, 2021). In un articolo pubblicato su *Nature Medicine*, si stima che, tra il 30 maggio e il 4 settembre 2022, in Europa ci siano stati 61.672 decessi legati al caldo. In particolare, Italia (con 295 decessi per milione), Grecia (con 280 decessi per milione), Spagna (237 decessi per milione) e Portogallo (211 decessi per milione) hanno registrato i tassi di mortalità correlata al caldo più alti (Ballester et al, 2022). Sebbene non sempre risulti fatale, l'inasprimento delle temperature in città ha comunque un grande impatto sul corpo umano: l'*heat stress* può infatti provocare crampi, eruzioni cutanee, svenimenti e colpi di calore. Dai dati raccolti nell'estate 2023 fino al 15 luglio, si evince che gran parte dell'Europa meridionale ha già vissuto fino a 10 giorni di "heat stress molto forte", ed è probabile che questa tendenza si intensifichi nel corso dell'estate: nel 2022 per esempio, il sud della Spagna ha registrato 50-60 giorni di forte *heat stress*, con aree che hanno raggiunto picchi di 70 giorni (Copernicus, 2022).

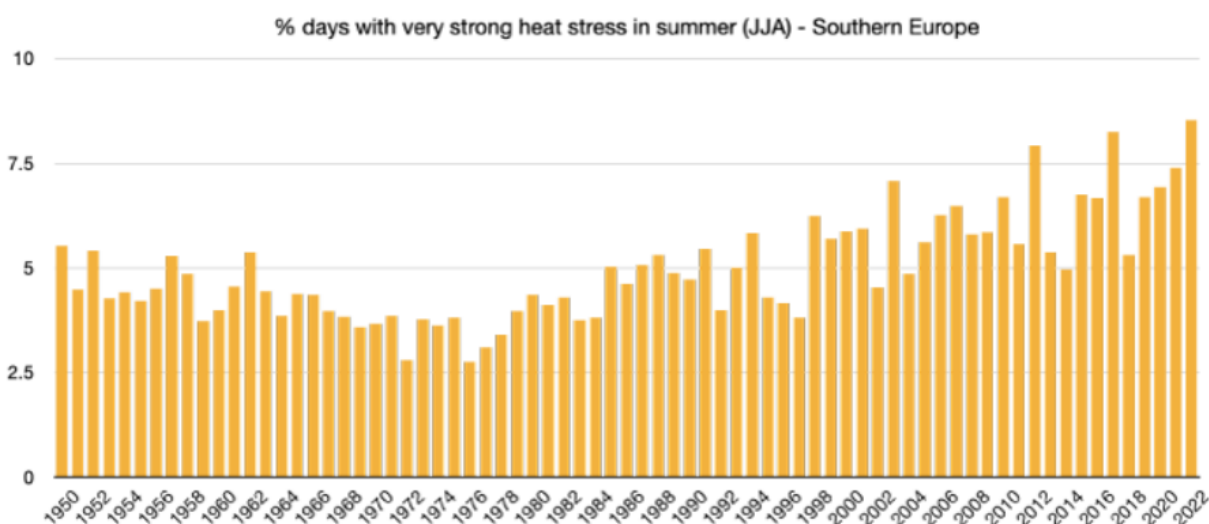


Figura 1.3.1.a: Percentuale di giorni estivi con "heat stress molto forte" (UTCI tra 38 e 46°C) nell'Europa meridionale, dal 1950 al 2022 (fonte Copernicus, ECMWF)

In questo contesto le tematiche più prettamente ambientali entrano in contatto con quelle relative ai diritti umani, in quanto l'aumento della temperatura a livello globale, ed in maniera ancora più marcata in città, non colpisce allo stesso modo gli individui e le comunità nelle diverse aree geografiche.

Come ampiamente documentato, i rischi per la salute crescono notevolmente per quelle fasce di popolazione più vulnerabili dal punto di vista fisiologico o socioeconomico, come anziani (età > 65 anni), bambini (età < 5 anni), donne, migranti e residenti nelle zone a basso reddito (Kovats et al, 2004, Morabito et al, 2015, Otto et al, 2017, Nayak et al, 2018). Per esempio, in Europa si è stimato il 56% in più di decessi legati al caldo nelle donne rispetto agli uomini, con tassi più elevati negli uomini di età compresa tra 0 e 64 anni (+41%) e tra 65 e 79 anni (+14%) e nelle donne di età superiore a 80 anni (+27%) (Ballester et al, 2022). L'intensità delle isole di calore, inoltre, non è equamente distribuita all'interno dell'ecosistema urbano, con conseguenti impatti altamente differenziati sul territorio. Questo fenomeno è quindi in grado di esacerbare e polarizzare le disuguaglianze sociali già presenti all'interno del territorio urbano, acuendo la disparità nell'accesso alle cure sanitarie e nelle possibili aree abitative (Sanchez-Guevara et al., 2019, Mitchell et al., 2021, Amado, 2022).

Inoltre, le isole di calore nei mesi più caldi portano ad utilizzare più assiduamente i condizionatori, con un conseguente aumento della temperatura a livello locale e un ulteriore consumo di energia elettrica per alimentarli. Si innesca quindi un circolo vizioso per il quale si accende il condizionatore a causa del caldo, ma è il condizionatore stesso che contribuisce a sua volta all'inasprimento delle condizioni ambientali preesistenti (Colelli et al, 2022). Anche in questo caso però gli aspetti più tecnici si intersecano con il concetto di giustizia climatica: come si legge nel *Chilling Prospect* del programma *Cooling for All* nel 2022 più di un miliardo di persone, perlopiù in Asia e Africa, hanno dovuto affrontare temperature estreme senza avere accesso ad adeguati impianti di raffrescamento, rimanendo così più esposti ai rischi legati al caldo.

1.4 Cause

1.4.1 Consumo di suolo e proprietà dei materiali

Un suolo in condizioni naturali fornisce al genere umano i servizi ecosistemici, culturali, di approvvigionamento, di regolazione e di supporto necessari al proprio sostentamento. Esso rappresenta una risorsa essenziale e fragile, che deve essere tutelata: le dinamiche insediative e le diverse variazioni d'uso possono infatti originare gravi processi degradativi che ne limitano o ne inibiscono le funzionalità.

Il rapporto “Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici”, redatto nel 2022 da SNPA riporta che la velocità di crescita di consumo di suolo in Italia tra il 2020 e il 2021 è pari a $2,2 \text{ m}^2/\text{s}$, con picchi soprattutto in Lombardia e Veneto. Il cemento occupa ormai 21.500 km^2 di suolo nazionale, e i soli edifici rappresentano il 25% dell'intero suolo consumato, ricoprendo un territorio grande quanto la Liguria.

Il consumo di suolo è inoltre più intenso nelle aree già molto compromesse. Nelle città a più alta densità, dove gli spazi aperti residui sono spesso molto limitati, nel 2022 si sono persi 27 m^2 per ogni ettaro di aree verdi. Tale incremento contribuisce a far diventare sempre più calde le città, concorrendo al fenomeno delle isole di calore.

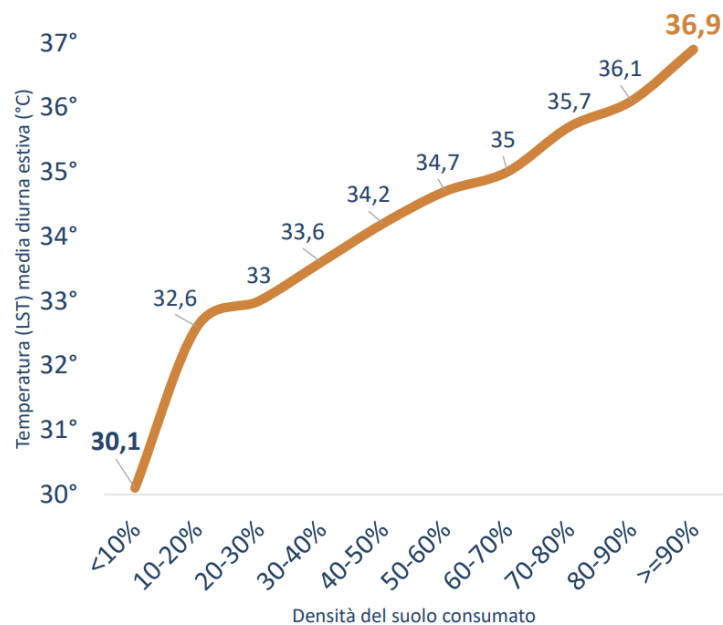


Figura 1.4.1.a: Relazione tra densità del suolo consumato e innalzamento delle temperature medie diurne estive (fonte: SNPA)

Proprio la crescita del consumo di suolo a discapito di aree verdi, ed il conseguente aumento delle temperature in città, sono strettamente collegati alle proprietà specifiche dei materiali: in particolare qui di seguito sarà approfondito il concetto di albedo, che indica il potere riflettente di una superficie.

L'albedo si esprime come il rapporto tra flusso luminoso riflesso da una superficie e quello ricevuto da essa; è quindi massimo quando tutta la luce incidente viene riflessa, ed assume valori compresi tra 0, caratteristico di una superficie ideale nera, e 1, quando è invece perfettamente bianca.

Di seguito si riportano alcuni valori di albedo caratteristici:

Asfalto fresco	0,05	Ghiaccio marino	0,5 - 0,7	Oceano	0,06
Tetto scuro	0,1	Neve fresca	0,8 - 0,9	Sabbia	0,3
Foresta	0,1 - 0,2	Neve sciolta	0,4 - 0,6	Cumulonembo	0,9
Prato verde	0,25	Prato secco	0,2	Albedo medio terrestre	0,03

Figura 1.4.1.b Valori di albedo relativi ad alcune superfici (fonte: CNR)

Come si può osservare dalla *Figura 1.4.1.b*, a superfici più scure è associato un valore di albedo minore: in questi casi la radiazione solare viene maggiormente assorbita e convertita in energia termica, facendo riscaldare la superficie. Si osserva dunque che il cambio di uso di suolo, per esempio da prato verde, caratterizzata da albedo pari a 0,25, ad asfalto fresco, di albedo pari a 0,05, sia uno dei fattori che contribuiscono all'innalzamento delle temperature nelle aree urbanizzate.

Inoltre, la vegetazione risulta estremamente efficace per ridurre l'effetto dell'UHI: con un 10% di copertura vegetale la temperatura diminuisce di 0,6 °C (Theeuwes et al, 2012). Questo processo viene reso possibile grazie all'ombreggiamento e all'evapotraspirazione (ovvero la combinazione dell'evaporazione diretta e della traspirazione da parte delle piante, convertendo l'energia disponibile in calore latente).

1.4.2 Calore antropogenico

Il calore antropogenico è il calore che deriva dalle attività umane e dai consumi energetici che esse comportano. Esso può essere scomposto in tre componenti: il calore generato dai mezzi di trasporto, il calore proveniente da fonti stazionarie (come abitazioni o industrie) e quello generato dal metabolismo umano e animale.

Per determinare il contributo del calore antropogenico sul fenomeno delle isole di calore si fa riferimento ad un articolo pubblicato su *Advances in Space Research* intitolato *Exploring the effect of COVID-19 pandemic lockdowns on urban cooling: a tale of three cities* (Mijani et al, 2022).

Lo studio ha preso in considerazione un periodo del tutto eccezionale, ovvero quello del *lockdown* causato dalla pandemia di COVID-19, per determinare l'effetto dell'attività antropica sul riscaldamento urbano. Per fare ciò sono state utilizzate le immagini satellitari di Landsat 8, confrontando le temperature di Milano, Roma e Wuhan tra il 2018 e il 2020.

I risultati mostrano che l'effetto isola di calore durante il *lockdown* si è ridotto del 23% a Milano, del 34% a Roma e del 54% a Wuhan. Concentrandosi su Milano si determina che, nell'aprile 2020, la temperatura media al suolo è stata di quasi 4,8°C più bassa rispetto allo stesso periodo del 2018, mentre se si considera la sola superficie edificata la differenza raggiunge i 5,4°C.

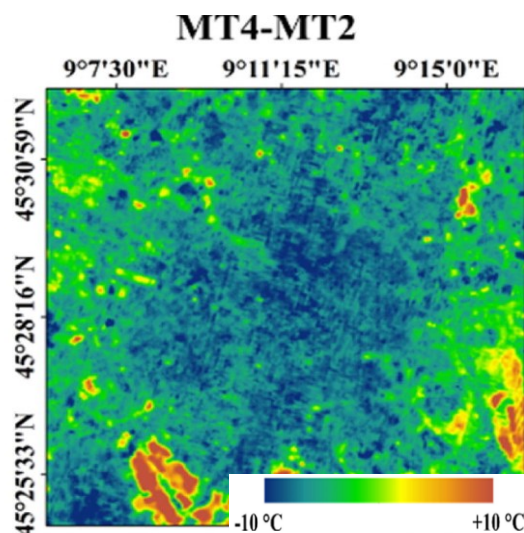


Figura 1.4.2.a: Differenza nella temperatura superficiale della città di Milano tra aprile 2020 (MT4) e aprile 2018 (MT2) (fonte: Mijani et al, 2022)

Grazie a questo studio si evince che il calore generato dalle attività antropiche contribuisce in maniera significativa alla variazione di temperatura in città, e risulta dunque uno dei fattori da prendere in considerazione nella mitigazione del fenomeno delle isole di calore.

1.4.3 Morfologia urbana

La morfologia urbana, ovvero la disposizione degli edifici e di altre opere edificate all'interno di un'area urbanizzata, è uno degli elementi che determinano un aumento della temperatura nelle città. Una delle geometrie più caratteristiche associate al fenomeno delle isole di calore è quella del "canyon urbano". Un canyon urbano viene definito come il luogo in cui una strada è fiancheggiata su entrambi i lati da alti edifici: questa particolare conformazione urbana contribuisce fortemente all'effetto isola di calore, poiché in questo contesto viene catturata una maggiore quantità di radiazione solare, intrappolata dalle numerose riflessioni che i raggi solari subiscono da parte degli edifici e della strada.

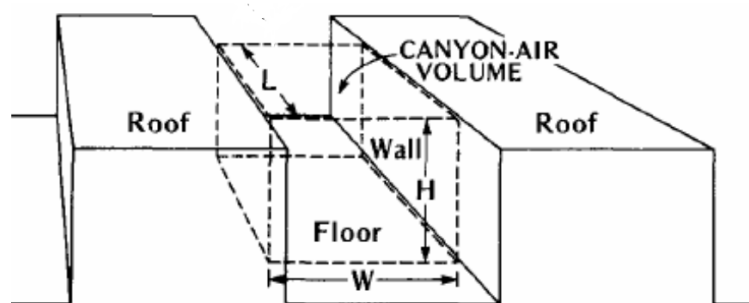


Figura 1.4.3.a: Rappresentazione schematica di un canyon urbano (fonte: Nunez, Oke, 1977)

I parametri che in questo caso influenzano di più il fenomeno sono:

- la geometria descritta dall'*Aspect Ratio*;
- lo *Sky View Factor*;
- l'orientamento rispetto ai punti cardinali.

L'*Aspect Ratio* (AR) delinea la geometria del canyon urbano attraverso un rapporto: $AR = \frac{H}{W}$ dove W rappresenta la distanza che intercorre tra gli edifici e H l'altezza degli edifici stessi. A seconda dei valori di AR l'effetto canyon sarà più o meno accentuato.

A questo si aggiunge anche lo *Sky View Factor*, ovvero la porzione di cielo visibile (SVF), ovvero la porzione di cielo visibile, che assume valori compresi tra zero e uno: con $SVF \approx 1$ il cielo risulta completamente visibile e la radiazione solare riflessa in atmosfera è maggiore, mentre con $SVF \approx 0$ la porzione di cielo visibile è estremamente ridotta, e sono le superfici circostanti, gli edifici, a trattenere più calore.

Anche l'orientamento rispetto ai punti cardinali è cruciale: in *The energy balance of an urban canyon* (1977) Nunez e Oke hanno dimostrato per esempio che nei canyon con orientamento nord-sud il pavimento è il sito più energeticamente attivo, ed il 30% del surplus radiante di mezzogiorno è immagazzinato nei materiali del canyon, mentre di notte la mancanza di radiazione solare è bilanciata dal rilascio di calore immagazzinato. I canyon urbani permettono quindi di trattenere calore soprattutto durante il giorno, lasciandolo poi durante il corso di tutta la notte.

Oltre all'effetto dei canyon urbani bisogna considerare una serie di altri fattori, quali vento e nuvolosità, che modificano rispettivamente la turbolenza atmosferica e l'irraggiamento solare.

In particolare, il vento è strettamente influenzato dalla morfologia del canyon urbano. Se il vento viaggia parallelamente al canyon viene incanalato e la sua velocità aumenta, mentre se soffia in direzione perpendicolare si formeranno dei vortici con regimi diversi in base all'Aspect Ratio:

- *Isolated roughness flow*: è il flusso che tipicamente investe un edificio isolato, con formazione di due vortici (uno davanti ed uno dietro all'edificio);
- *Wake interference flow*: è il flusso per il quale all'interno del canyon si formano due vortici interagenti tra loro e c'è un debole scambio d'aria con l'esterno;
- *Skimming flow*: è il flusso che prevede la formazione di un singolo vortice all'interno del canyon che impedisce al flusso medio di entrare nel canyon stesso.

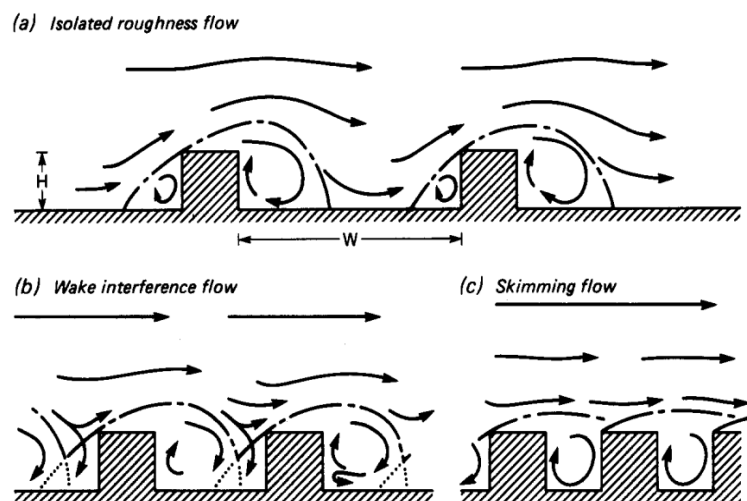


Figura 1.4.3.b: Regimi di flusso al variare dell'Aspect Ratio (fonte: Oke, 1988)

Oke, nel suo *Street Design and Urban Canopy Layer Climate* (1988), determina che l'Aspect Ratio necessario a garantire un buon riparo, massimizzare la dispersione di inquinanti, e avere un buon equilibrio tra calore e radiazione solare deve aggirarsi in un range compreso tra 0,4 e 0,6.

2. Materiali e Metodi

2.1 Inquadramento geografico dell'area di studio

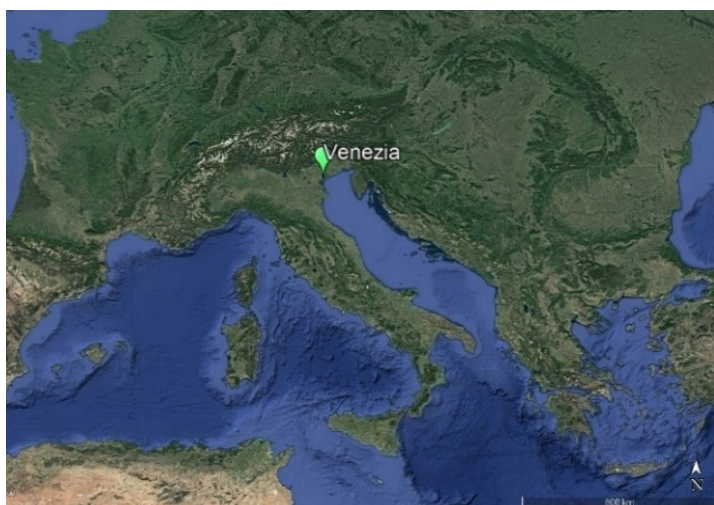


Immagine 2.1.a: Inquadramento geografico del Comune di Venezia (fonte: Google Earth Pro)

Lo studio si propone di mappare il fenomeno delle isole di calore all'interno del Comune di Venezia, in quanto caratterizzato da una notevole complessità territoriale. Venezia, situata nel nord-est d'Italia, è il capoluogo della regione Veneto. Il territorio comunale, che si sviluppa tra la terraferma e il cuore della laguna veneta, si estende per 415,9 km² ed è direttamente collegato al Mar Adriatico tramite tre bocche di porto.

L'insediamento storico della città è tradizionalmente diviso in sei "sestieri" e si articola su un complesso di 118 isole collegate tra loro da più di 400 ponti. Agli inizi del Novecento il territorio comunale viene poi ampliato, annettendo sia comuni lagunari che di terraferma, tra cui anche Mestre e la zona industriale di Porto Marghera. Dopo l'entrata in vigore della legge Delrio n.56 del 2014, Venezia diviene una "città metropolitana", sostituendo l'omonima provincia. Questa nuova area urbana, che comprende 44 comuni, si distingue per la sua singolare fusione tra aree produttive ed industriali, patrimonio artistico culturale e habitat naturale.

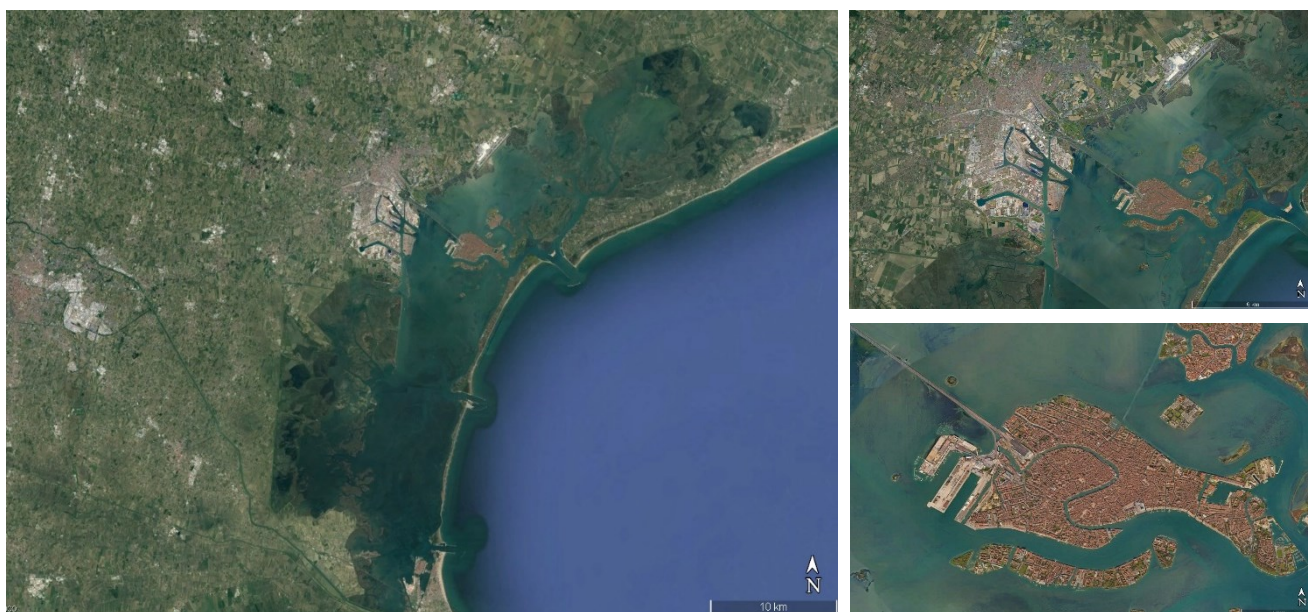


Figura 2.1.b: Inquadramento satellitare dell'area di studio (fonte: Google Earth Pro)

2.1.1 Demografia

Il Comune di Venezia, secondo i dati ISTAT 2022, conta circa 250.000 abitanti. A partire dal 1871 la popolazione si è ampliata notevolmente raggiungendo, nel 1968, la quota di 368.000 abitanti. Negli ultimi 50 anni però il numero di residenti è in declino, con una tendenza che non coinvolge l'intero Comune in maniera omogenea: il calo demografico ha infatti interessato in maniera accentuata il centro storico, mentre la popolazione della terraferma si mantiene relativamente stabile da 30 anni, con 177.000 abitanti.

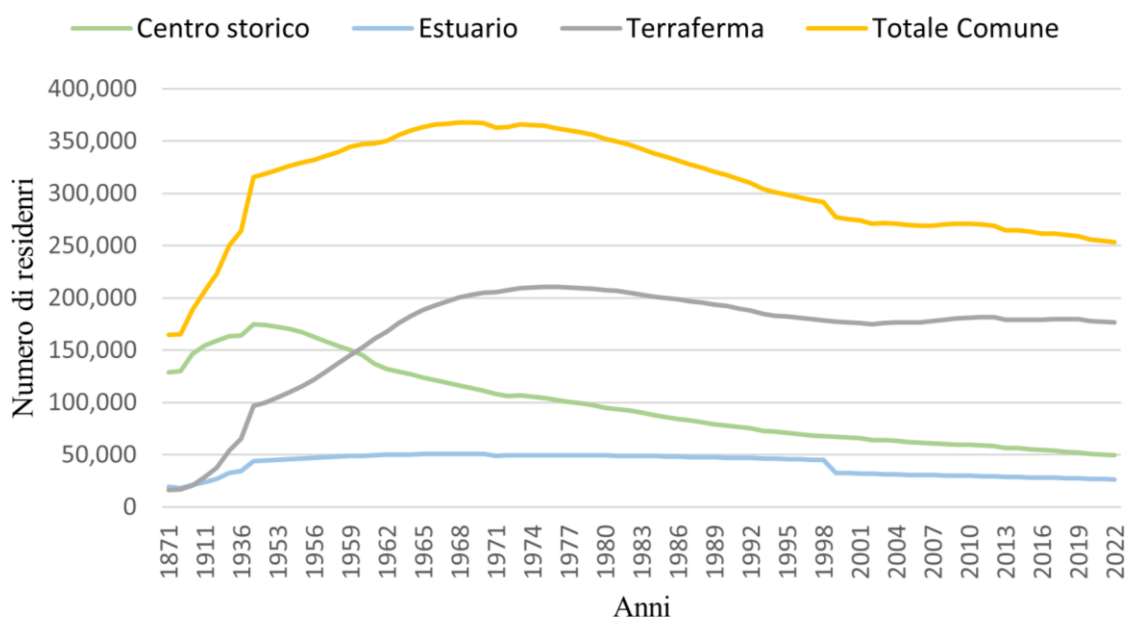


Figura 2.1.1.a: Popolazione residente nel Comune di Venezia dal 1871 al 2022 (fonte: Comune di Venezia)

Queste differenze nelle tendenze demografiche sono dovute alle particolari sfide che il centro storico si trova ad affrontare: in particolare, il fenomeno del turismo di massa comporta una serie di disagi dovuti al sovraffollamento e alla riduzione di alloggi e servizi per i cittadini.

Secondo i dati forniti dall'Annuario del Turismo della città di Venezia, nel 2021 i turisti registrati annualmente nelle strutture ricettive del centro storico sono passati da 3,4 milioni nel 2009 a 5,5 milioni nel 2019. L'ingente flusso turistico ha portato all'accrescimento smisurato della capacità delle strutture ricettive: contando sia le strutture alberghiere che quelle complementari, nel 2020 i posti letto hanno raggiunto la quota di 60.389, mentre nel 2017 si era appena superata la soglia dei 40.000. Il numero di posti letto totali, con una tendenza che negli ultimi anni si è mantenuta sempre positiva, ha registrato un calo solo nel 2021 (-11,3%), presumibilmente a causa del periodo di *lockdown* e restrizioni durante la pandemia di Covid-19.

Quasi la metà dei posti letto presenti in città sono quindi attualmente dedicati ai turisti: nel 2021, sebbene con una tendenza in calo, si osserva infatti che i posti letto turistici rimangono comunque 53.578, sorpassando così il numero di residenti, che nello stesso anno risulta essere pari a 50.434. A questo, come spesso accade nelle città soggette a turisticizzazione, è collegato un processo di espulsione della popolazione locale, che avviene tramite la trasformazione delle funzioni urbane di edifici, appartamenti e attività commerciali: due esempi emblematici sono rappresentati dal Teatro Italia, luogo culturale che ora ospita invece un supermercato, e il palazzo Fontego dei Tedeschi, ex sede dei servizi postali trasformato in un centro commerciale di lusso. (Cristiano e Gonella, 2020).

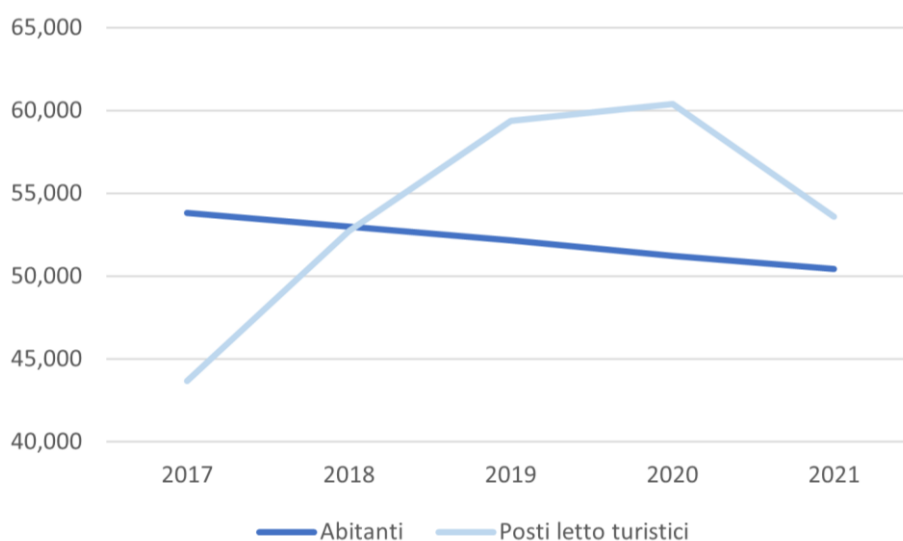


Figura 2.1.1.b: Numero di residenti e di posti letto turistici nel centro storico di Venezia tra il 2017 e il 2021 (fonte: Comune di Venezia)

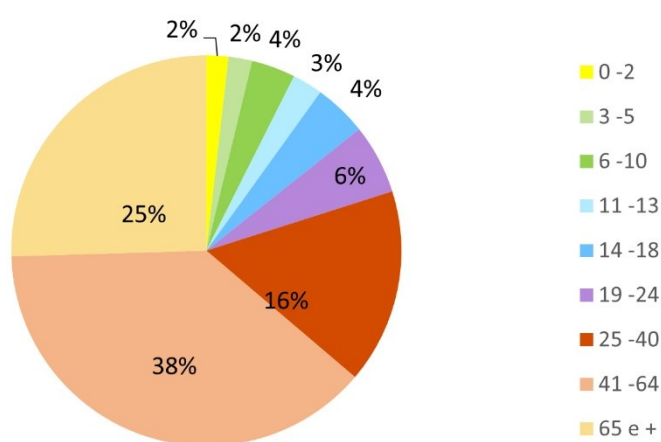


Figura 2.1.1.c: Percentuali per fasce d'età del Comune di Venezia (fonte: Comune di Venezia)

Al contempo la popolazione è soggetta ad un crescente invecchiamento, con un saldo naturale negativo pari al -0,87% nel 2022, molto più rilevante rispetto ai dati regionali (-0,66%) e nazionali (-0,54%). Questo è segno di un marcato aumento dell'età media della popolazione: più del 60% degli abitanti ha superato i 40 anni, ed una percentuale considerevole, pari al 25 %, ha raggiunto o superato i 65 anni di età.

2.1.2 Consumo di suolo

Venezia si colloca all'interno di un contesto che, come già visto in precedenza, in termini di consumo di suolo risulta notevolmente compromesso.

Nel 2021, secondo i dati forniti dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), il Veneto ha raggiunto una percentuale di suolo edificato pari a 11,9%, mentre la media nazionale si aggira intorno al 7,1% e quella dell'Unione Europea è pari a 4,2%.

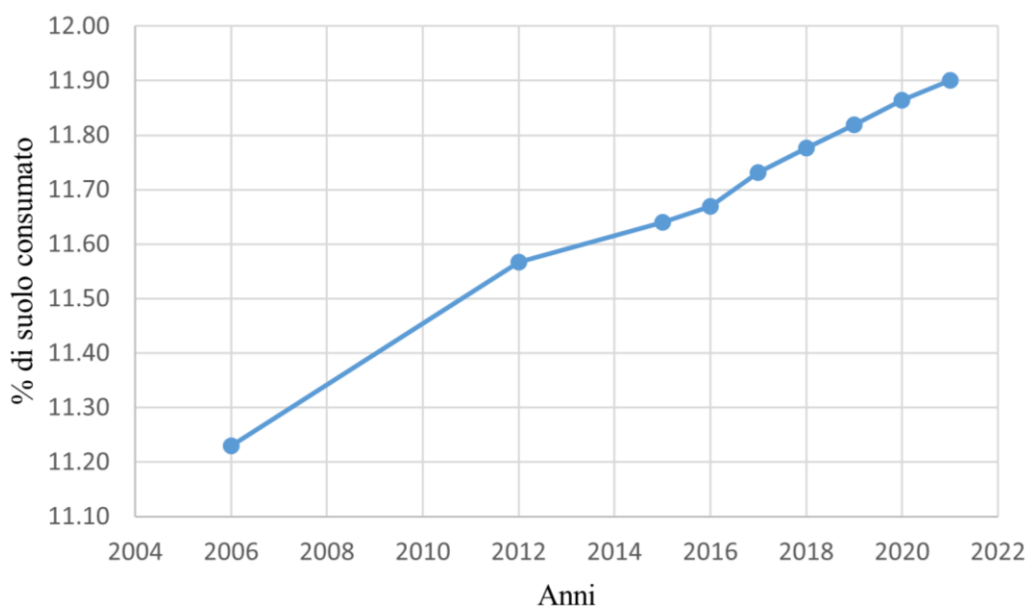


Figura 2.1.2.a: Andamento del consumo di suolo in Veneto dal 2006 al 2021 (fonte: ISPRA)

All'interno della classifica nazionale sul livello di consumo di suolo, come indicato all'interno del rapporto ARPAV 2022 “Consumo di Suolo nella Regione Veneto”, il Veneto si colloca infatti al secondo posto, superato solo dalla Lombardia; queste due regioni sono le uniche ad avere oltrepassato la soglia del 10% (11,9% in Veneto, 12,1% in Lombardia). Inoltre, se non si considerano le superfici coperte dalle acque (laghi, fiumi, lagune e barene) la percentuale di suolo urbanizzato in Veneto raggiunge il 12,5%.

Il Veneto è secondo in Italia anche per quanto riguarda il proprio bilancio netto, ovvero il rapporto tra consumo e ripristino del suolo: nel 2021 sono stati registrati 815 ha di nuovo terreno edificato e 131 ha di terreno ripristinato, ottenendo pertanto un bilancio netto pari 684 ha (Lombardia (883 ha)).

Allo stesso tempo si osserva uno scollamento nella relazione tra percentuale di urbanizzato e crescita demografica: mentre per il consumo di suolo si registra una tendenza positiva (+2% negli ultimi cinque anni) la popolazione è invece in calo (-0,4% nello stesso arco temporale), ed il suolo totale consumato pro-capite continua ad aumentare (448,13 m²/ab al 2021).

Scendendo più nel dettaglio all'interno del territorio regionale, si evince che la provincia di Verona è quella in cui si registra il maggior consumo di suolo totale (41.199 ha), mentre Venezia si mantiene più bassa attorno ai 34.371 ha. A livello percentuale invece solo le tre province di Padova, Treviso e Venezia, con rispettivamente il 18,7%, il 16,8% e 14,4%, a registrare i valori maggiori. Se si considera però la percentuale di suolo consumato al netto delle acque, Venezia sale al secondo posto, raggiungendo il 17,3%.

	Consumo totale (ha)	Consumo netto 20-21 (ha)	% suolo consumato	% suolo consumato al netto delle acque
Verona	41.199	184,7	13,3	14,2
Vicenza	34.400	108,3	12,6	12,7
Belluno	10.163	15,4	2,8	2,8
Treviso	41.503	119,3	16,8	16,9
Venezia	35.571	109,8	14,4	17,3
Padova	40.058	123,4	18,7	19,0
Rovigo	15.334	22,6	8,4	9,5
Veneto	218.230	683,6	11,9	12,5

Figura 2.1.2.b: Consumo di suolo a livello provinciale (ARPAV, 2022)

Per quasi tutte le province, dopo un picco raggiunto nel 2017, il consumo di suolo netto si assesta comunque su valori ancora molto elevati rispetto alle classifiche nazionali: nel 2021 Verona si conferma al primo posto nel Veneto e al quarto posto a livello nazionale (+184,7 ha), mentre Venezia (+109,8 ha), insieme a Padova (+123,4 ha), Treviso (+119,3 ha) e Vicenza (+108,3 ha), rientra a far parte della classifica delle prime 20 in Italia.



Figura 2.1.2.c: A sinistra: consumo di suolo nelle città di Venezia, Padova, Treviso e Vicenza: in bianco il consumo al 2006, in rosso il consumo di suolo 2006-2020, in viola quello 2020-2021.

A destra: classifica delle prime venti città d'Italia per ettari consumati (fonte: ARPAV, 2022)

2.2 Materiali

Per la mappatura e l'analisi delle isole di calore nel Comune di Venezia si sono utilizzati dati e *software* completamente *open access* e *open source*.

In particolare, sono stati utilizzati dati provenienti da tre stazioni meteorologiche di ARPAV, immagini satellitari Landsat e file vettoriali scaricati sia dal Geoportale della regione Veneto e sia da quello del Comune di Venezia. La parte sperimentale è stata eseguita tramite QGIS 3.28.8, mentre Excel è stato usato come supporto durante la fase di analisi e di creazione di grafici.

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva contenente tutti i dati di input utilizzati.

DATI	Fonte	Periodo	Frequenza di rilevazione	Variabili
METEREologici	ARPAV	01/06/2022	Oraria	Temperatura dell'aria a 2m da terra (°C)
		31/08/2022		
IMMAGINI SATELLITARI	Fonte	Landsat 9 data e ora	Landsat ID	Qualità dell'immagine
	USGS Earth Explorer	03/07/2022	LC09_L2SP_192028_20220703_20230408_02_T1	9/9
		04/08/2022	LC09_L2SP_192028_20220804_20230404_02_T1	9/9
		9:58		
AMBITI AMMINISTRATIVI	Fonte	Tipo di layer		
	Geoportale della Regione Veneto	Vettoriale		
	Geoportale del Comune di Venezia	Vettoriale		
LAND COVER	Fonte	Tipo di layer		
	Geoportale della Regione Veneto	Vettoriale		

Tabella 2.2.a: Riassunto dei dati in input utilizzati per le analisi

2.2.1 Dataset meteorologico

Per iniziare l'elaborazione sono stati scaricati i valori orari di temperatura disponibili sul portale dell'Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto (ARPAV).

Lo studio, cercando di coprire l'intera area d'interesse, si è servito dei dati provenienti da tre stazioni meteorologiche diverse:

- a) Venezia–Istituto Cavanis (45.42997, 12.3281);
- b) Cavallino Treporti (45.45872, 12.48626);
- c) Favaro Veneto (45.51731, 12.27848).

Per ogni stazione sono stati estratti i dati relativi al periodo estivo 1/06/2022 - 31/08/2022, che su base oraria hanno fornito la temperatura dell'aria a 2m da terra (°C).

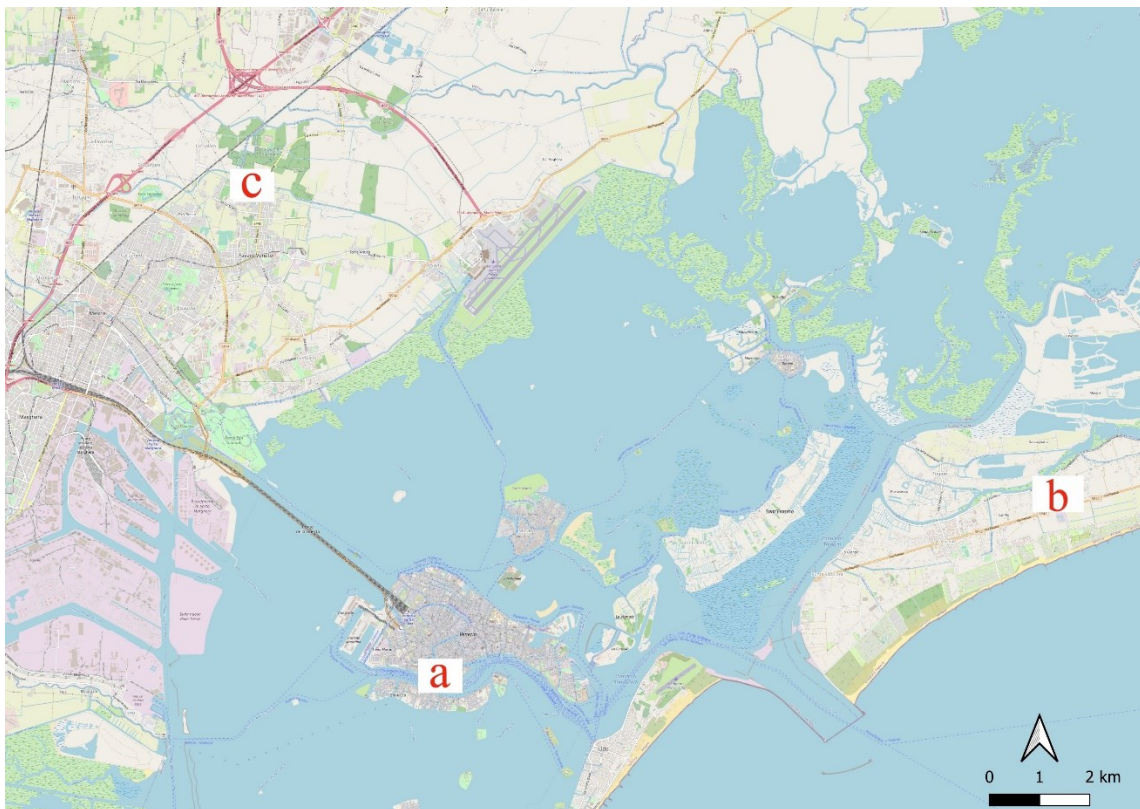


Figura 2.2.1.a: Inquadramento delle stazioni metereologiche di Venezia-Istituto Cavanis (a), Cavallino Treporti (b) e Favaro Veneto (c). (fonte: elaborazione con QGIS su Open Street Map)

L'acquisizione di dati relativi a tre diverse stazioni, collocate in zone territoriali molto eterogenee fra loro, ha permesso di ottenere un quadro completo dell'area d'interesse: la stazione di Venezia-Istituto Cavanis ha fornito i dati relativi alla zona lagunare, quella di Cavallino Treporti ha coperto un'area più vicina al mare, mentre quella di Favaro Veneto ha raccolto dati relativi alla zona di terraferma.

2.2.2 Immagini satellitari Landsat 8 e 9

Per calcolare la Land Surface Temperature (LST) si sono utilizzati i dati raster forniti dal *United States Geological Survey* (USGS Earth Explorer). In particolare, sono state usate le immagini satellitari individuate tra quelle scattate dai satelliti Landsat 8 e 9.

Il Landsat 8, lanciato nel 2013, rileva immagini in una determinata area del pianeta con una frequenza di 16 giorni. Dal 2021, combinando le immagini del Landsat 8 con quelle acquisite dal nuovo Landsat 9, si è riusciti a ridurre il tempo di rivisitazione ad 8 giorni. Entrambi i satelliti sono dotati di un *Operational Land Imager* (OLI) e un *Thermal Infrared Sensor* (TIRS), che sono rispettivamente un sensore ottico e termico. Grazie a questi due strumenti è possibile procedere con l'analisi LST utilizzando la banda 4 (Rosso) e 5 (*Near-Infrared*), che presentano una risoluzione di 30 m, e la banda 10 (*Thermal Infrared 1*), con una dimensione dei pixel pari a 100 m.

I giorni selezionati per l'analisi, dopo aver portato a termine l'elaborazione statistica relativa ai giorni estivi (JJA 2022) e aver valutato la percentuale di copertura nuvolosa dell'immagine, sono stati il 03/07/2022 e il 04/08/2022. L'ora esatta dell'acquisizione dell'immagine, l'identificatore USGS Landsat e la qualità dell'immagine sono mostrati nella *Tabella 2.2.a*.

2.2.3 Ambiti amministrativi

Per delimitare l'area di studio all'interno di QGIS è stato scaricato il file vettoriale dei Comuni del Veneto dal Geoportale della Regione Veneto, da cui si è poi selezionato il solo Comune di Venezia in modo da poter lavorare su una zona più ristretta.

Successivamente, si è passati ad analizzare come varia la LST all'interno del Comune. Per farlo, si è proceduto scaricando il file degli ambiti amministrativi dal Geoportale del Comune di Venezia, che ha permesso la visualizzazione di dieci diverse suddivisioni del territorio comunale. In particolare, le prime quattro si concentrano su specifiche zone dell'area di studio, mentre le ultime sei propongono una suddivisione sempre più particolareggiata dell'intero territorio. Cercando quindi gli ambiti amministrativi che fossero più funzionali all'analisi, sono stati selezionati gli ambiti 5, che prevedono un frazionamento del Comune in sei zone, e gli ambiti 6, che sono invece articolati in dodici zone (come rappresentato in *Figura 3.2.a* e *Figura 3.2.b*).

2.2.4 Copertura del suolo

Passando invece ad analizzare la relazione tra LST e copertura del suolo, si è fatto riferimento al layer “Banca dati della copertura del suolo della regione Veneto: aggiornamento 2020” disponibile sul Geoportale della Regione Veneto. La determinazione delle diverse classi di copertura del suolo è effettuata attraverso la classificazione Corine Land Cover (CLC), un progetto nato a livello europeo per il rilevamento e il monitoraggio delle caratteristiche di copertura e uso del territorio, con particolare attenzione alla protezione e tutela ambientale. L'inventario CLC, avviato nel 1985 con successivi aggiornamenti nel 2000, 2006, 2012 e 2018, cataloga il territorio in 44 classi di copertura del suolo, con unità minima di mappatura (MMU) pari a 25 ha per i fenomeni areali e una larghezza minima di 100 m per i fenomeni lineari. Di seguito si riporta la classificazione completa:

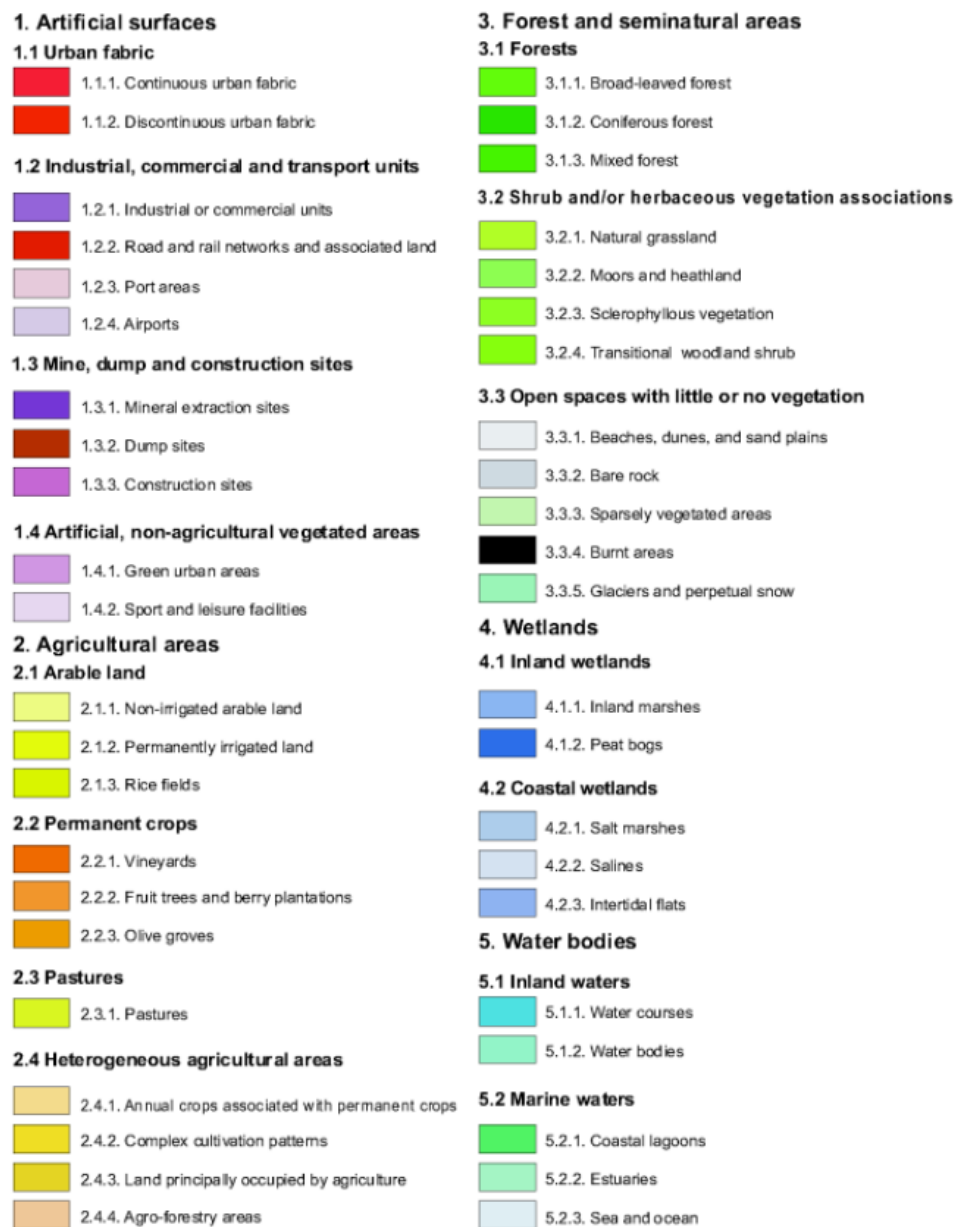


Figura 2.2.4.a: Classificazione Corine Land Cover (fonte: Copernicus)

2.3 Metodologia

Per iniziare l'analisi sul Comune di Venezia si è partiti determinando quali fossero gli eventi estremi, qui definiti come quei giorni caratterizzati da una temperatura massima giornaliera superiore ad una determinata soglia (il novantesimo percentile), in modo da utilizzarli come finestra di indagine per le successive elaborazioni. Per farlo si è condotta un'analisi statistica sui dati relativi al periodo estivo 1/06/2022 - 31/08/2022, estraendoli da tre stazioni meteorologiche collocate in diverse zone del territorio comunale: Venezia-Istituto Cavanis, Cavallino Treporti e Favaro Veneto.

Dopo aver importato su Excel i dati che su base oraria hanno fornito la temperatura dell'aria a 2 m da terra (°C), è stato possibile determinare le temperature massime giornaliere e calcolare quali fra queste superassero il novantesimo percentile della serie.

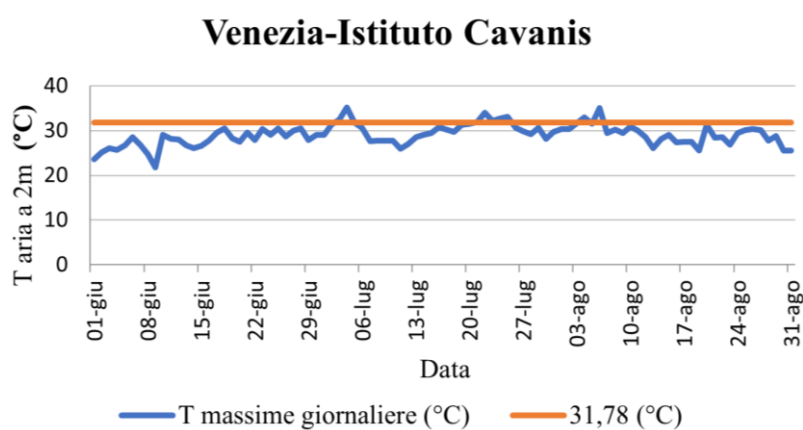


Figura 2.3.a: Temperature massime giornaliere per la stazione di Venezia-Istituto Cavanis nel periodo 01/06/2022-31/08/2022; in arancione la retta del novantesimo percentile (fonte: ARPAV)

Giorni con temperatura massima giornaliera

che supera il novantesimo percentile

(31,38 °C; Venezia-Istituto Cavanis)

03/07	04/08
04/07	06/08
05/07	
21/07	
22/07	
23/07	
24/07	
25/07	

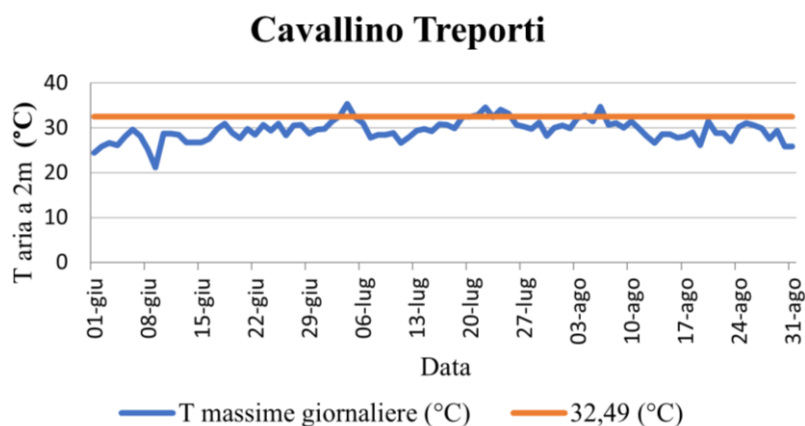


Figura 2.3.b: Temperature massime giornaliere per la stazione di Cavallino Treporti nel periodo 01/06/2022-31/08/2022; in arancione la retta del novantesimo percentile (fonte: ARPAV)

**Giorni con temperatura massima giornaliera che
supera il novantesimo percentile
(32,49 °C; Cavallino Treporti)**

03/07	04/08
04/07	06/08
19/07	
20/07	
21/07	
22/07	
24/07	
25/07	

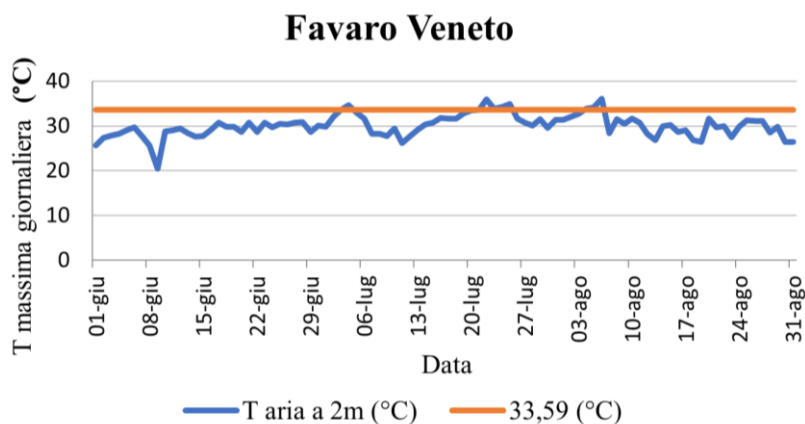


Figura 2.3.c: Temperature massime giornaliere per la stazione di Favaro Veneto nel periodo 01/06/2022-31/08/2022; in arancione la retta del novantesimo percentile (fonte: ARPAV)

**Giorni con temperatura massima giornaliera che
supera il novantesimo percentile**

(33,59 °C; Favaro Veneto)

03/07	04/08
04/07	05/08
21/07	06/08
22/07	
23/07	
24/07	
25/07	

Si procede dunque individuando i giorni nei quali la temperatura massima ha superato il novantesimo percentile in tutte e tre le stazioni metereologiche e ricercando se per queste date fossero disponibili le immagini scattate da Landsat 8 e 9 all'interno del database di USGS Earth Explorer. Da questo incrocio di dati si determina che i giorni disponibili per le analisi sono:

Giorni disponibili per l'analisi

03/07	04/08
04/07	

Le immagini del 04/07 sono però interessate da una sostenuta copertura nuvolosa, che ha inficiato il processo di determinazione della LST soprattutto nella parte di centro storico. Per questo motivo si è quindi preferito escluderle e concentrarsi sulle giornate di 03/07 e 04/08.

Una volta individuati i due giorni d'interesse si è passati all'elaborazione su QGIS. Per ciascuna delle due giornate sono state caricate le immagini satellitari relative alle bande 4, 5 e 10 e sono state ritagliate sull'area di studio: dopo aver caricato i file dei confini amministrativi dei comuni del Veneto, è stato creato un buffer circolare di 15km a partire dal centroide del Comune di Venezia, che è servito come base per il ritaglio con maschera.

Successivamente si è passati a calcolare la Land Surface Temperature (LST), alla base di tutte le successive analisi. Per farlo si è fatto riferimento alle linee guida di USGS contenute in *Landsat Surface Temperature Product Guide* (Zanter, 2018).

Per prima cosa si è ricavata la *Top of Atmosphere Reflectance* (ρ_λ) per le bande 4 e 5 secondo la formula:

$$\rho_\lambda = \frac{M_{q,i} Q_{cal,i} + A_{q,i}}{\sin(\theta_{SE})} \quad (1)$$

$M_{q,i}$ = Fattore moltiplicativo della banda (i=4,5)

$Q_{cal,i}$ = Digital Numbers della banda (i=4,5)

$A_{q,i}$ = Fattore additivo della banda (i=4,5)

θ_{SE} = Angolo di elevazione del sole al centro della scena espresso in gradi

Concentrandosi poi sulla banda 10, si è ricavata la *Top of Atmosphere Brightness Temperature* (BT):

$$BT = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (2)$$

K_1 = Costante di conversione termica 1 fornita dai metadati Landsat 8

K_2 = Costante di conversione termica 2 fornita dai metadati Landsat 8

$$L_\lambda = M_L Q_{cal} + A_L$$

M_L = Fattore moltiplicativo della banda 10

A_L = Fattore additivo della banda 10

Q_{cal} = Digital Numbers della banda 10

Successivamente si è calcolato il *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), un indice che varia tra -1 e 1 e, all'aumentare dei valori, fornisce diversi livelli di vigore vegetativo per ogni pixel del raster (Yuan e Bauer, 2007). Inoltre, è possibile calcolare una stima della percentuale di vegetazione P_v , grazie all'equazione (4):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (3)$$

NIR = Riflettanza della banda 5; RED= Riflettanza della banda 4

$$P_v = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (4)$$

$$NDVI_{max} = 0,8; NDVI_{min} = 0,2$$

A partire dall'analisi sulla percentuale di vegetazione si è poi derivata anche l'emissività specifica dei diversi tipi di copertura del suolo, ovvero l'emissività media dei singoli elementi presenti all'interno di un pixel (AnandaBabu et al, 2018):

$$e = 0,004 P_v + 0,986$$

Infine, si è ottenuta la LST secondo la formula:

$$LST = \frac{BT}{1 + \left[\left(\frac{W}{\rho} \right) \ln(e) \right]}$$

W = Lunghezza d'onda media della banda 10 fornita dai metadati Landsat

$$\rho = \frac{hc}{\sigma}$$

h = Costante di Plank

c = Velocità della luce

σ = costante di Boltzmann

Dopo aver ricavato la LST, questa è stata utilizzata in una serie di elaborazioni relative ad ambiti amministrativi, copertura del suolo (soprattutto per quanto riguarda la superficie edificata), *hotspots* e variazioni rispetto alla linea di costa.

Si è partiti andando ad indagare come varia la LST all'interno degli ambiti amministrativi comunali. Dopo aver selezionato quelli più funzionali all'analisi, ovvero gli ambiti 5, che dividono il territorio comunale in 6 zone, e gli ambiti 6, articolati in 12 zone, si è calcolata la relativa LST rimuovendo tutte le parti acquatiche, in modo da avere una mappatura delle aree più calde all'interno dell'area di studio. Successivamente è stata applicata una procedura di estrazione del valore dei pixel raster a punti, e su Excel si è quindi potuti generare quattro boxplot, che descrivono la distribuzione del valore di LST per ogni area, riportati in *Figura 3.2.c*, *Figura 3.2.d*, *Figura 3.2.e* e *Figura 3.2.f*.

Sono state indagate inoltre le relazioni tra LST e copertura del suolo. Gli ambiti amministrativi 6, più dettagliati, sono stati intersecati con il layer di copertura del suolo, e a questo nuovo layer è stato applicato lo strumento di "statistiche zonali" in modo da ricavarne LST media per ogni area. Si è poi passati ad utilizzare il plugin *data plotly* disponibile in QGIS per generare due grafici a violino, visualizzando quindi la relazione tra le cinque diverse classi di CLC e le relative LST (*Figura 3.3.a* e *Figura 3.3.b*).

Per quantificare la variazione dell'LST media di ogni area in funzione dell'uso del suolo, è stato creato un modello di regressione con il metodo dei minimi quadrati (*Ordinary Least Square*, OLS) per determinare la correlazione tra percentuale di superficie edificata e LST. Per farlo è stata fatta un'intersezione tra gli ambiti amministrativi 6 e il layer di copertura del suolo, in cui però sono state selezionate le sole classi 1, 2 e 3 (superfici edificate, aree agricole e foreste e aree seminaturali) in modo da eliminare le superfici acquatiche. Si è quindi determinata l'LST media applicando "statistiche zonali" e si è passati a calcolare le singole aree, per ciascuna delle 12 zone, delle tre classi di CLC. Su Excel è stato poi possibile calcolare la percentuale di superficie edificata per ogni ambito, ovvero il rapporto tra l'area della classe 1 e la somma delle aree delle tre diverse classi, e associarla ad un valore di LST. Ecco che dunque sono stati generati i due scatterplot riportati in *Figura 3.3.c* e *Figura 3.3.d*, che hanno permesso di individuare una correlazione positiva tra la percentuale di superficie urbanizzata e LST.

La successiva elaborazione si concentra invece su una serie di *hotspots*, osservati già dalle prime mappe di LST (*Figura 3.1.a* e *Figura 3.1.b*). In particolare, sono state selezionate manualmente cinque aree di interesse, poi fuse in un unico vettore, che includono: Venezia centro storico, Mestre-Marghera, l'aeroporto Marco Polo, l'aeroporto Nicelli e parco S. Giuliano. A queste è stato applicato "statistiche zonali" per creare una mappa con la temperatura media di ogni area e, sempre grazie ad una procedura di estrazione da pixel raster a punti, su Excel è stato possibile visualizzare i risultati in due boxplot disponibili in *Figura 3.4.b* e *Figura 3.4.c*.

Infine, l'ultima analisi si focalizza sulla variazione della LST rispetto alla linea di costa. Si è partiti creando in ambiente GIS, per entrambi i giorni di indagine, sei *buffer* che prendono come punto di riferimento la linea di costa ma si posizionano su distanze diverse:

1. Da 0 a 250 m
2. Da 250m a 500m
3. Da 500m a 750m
4. Da 750m a 1000m
5. Da 1000m a 1250m
6. Da 1250m a 1500m

Applicando a ciascuno di questi lo strumento "statistiche zonali", si è potuto determinare una LST media per ogni fascia. Importando questi dati su Excel, sono stati generati due scatterplot visualizzabili in *Figura 3.5.b* e *Figura 3.5.c*, ed è stato creato un modello di regressione OLS per testare l'ipotesi di correlazione positiva tra distanza dalla costa e LST.

3. Risultati e discussione

3.1 Mappatura delle isole di calore urbano

Per entrambi i giorni si è ricavato la LST su tutta l'area di studio (*Figura 3.1.a* e *Figura 3.1.b*), avendo cura di rimuovere i pixel d'acqua in modo da avere una rappresentazione più chiara delle temperature all'interno del Comune.

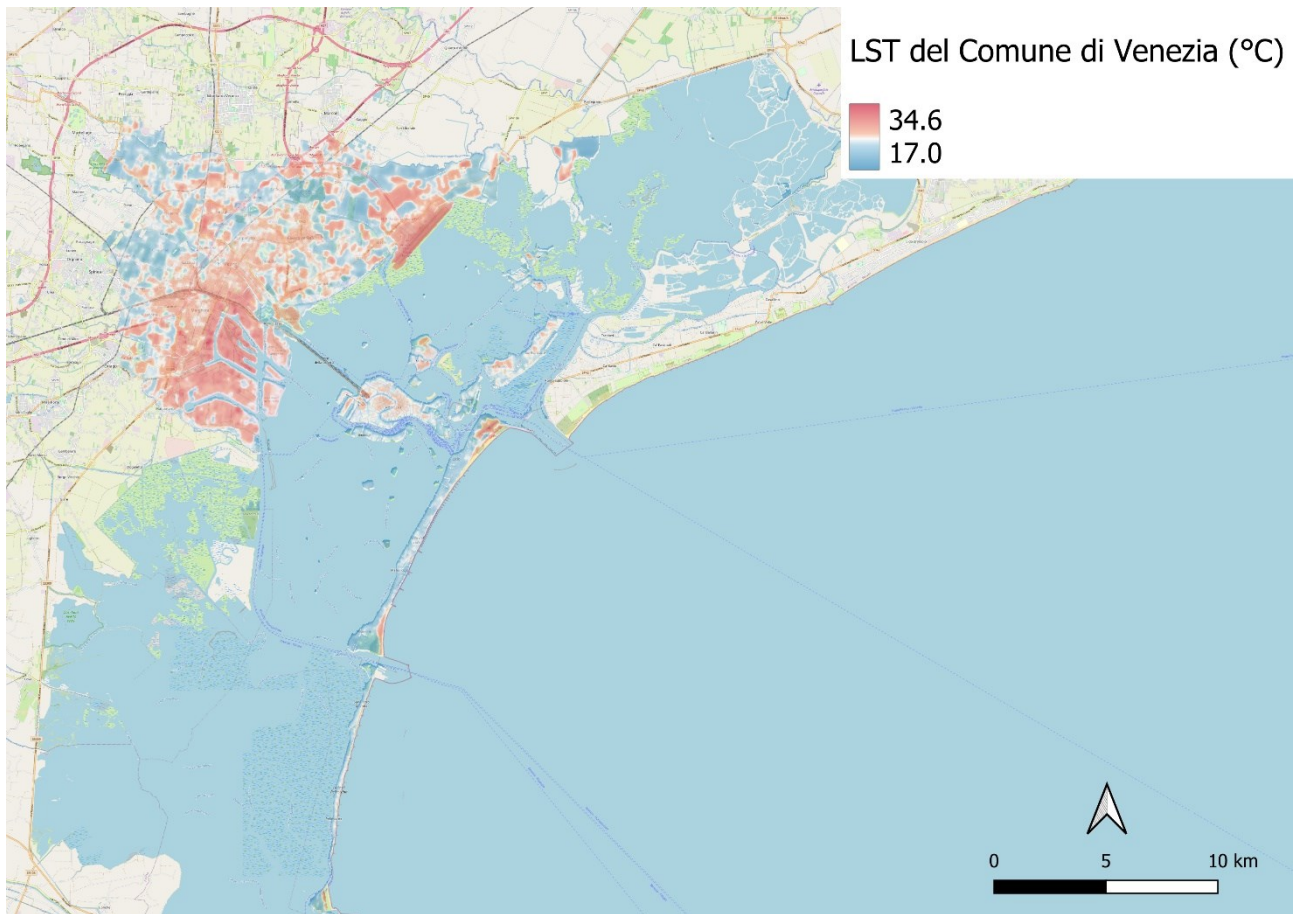


Figura 3.1.a: LST del Comune di Venezia - 03/07/2022 (fonte: elaborazione con QGIS su immagini Landsat)

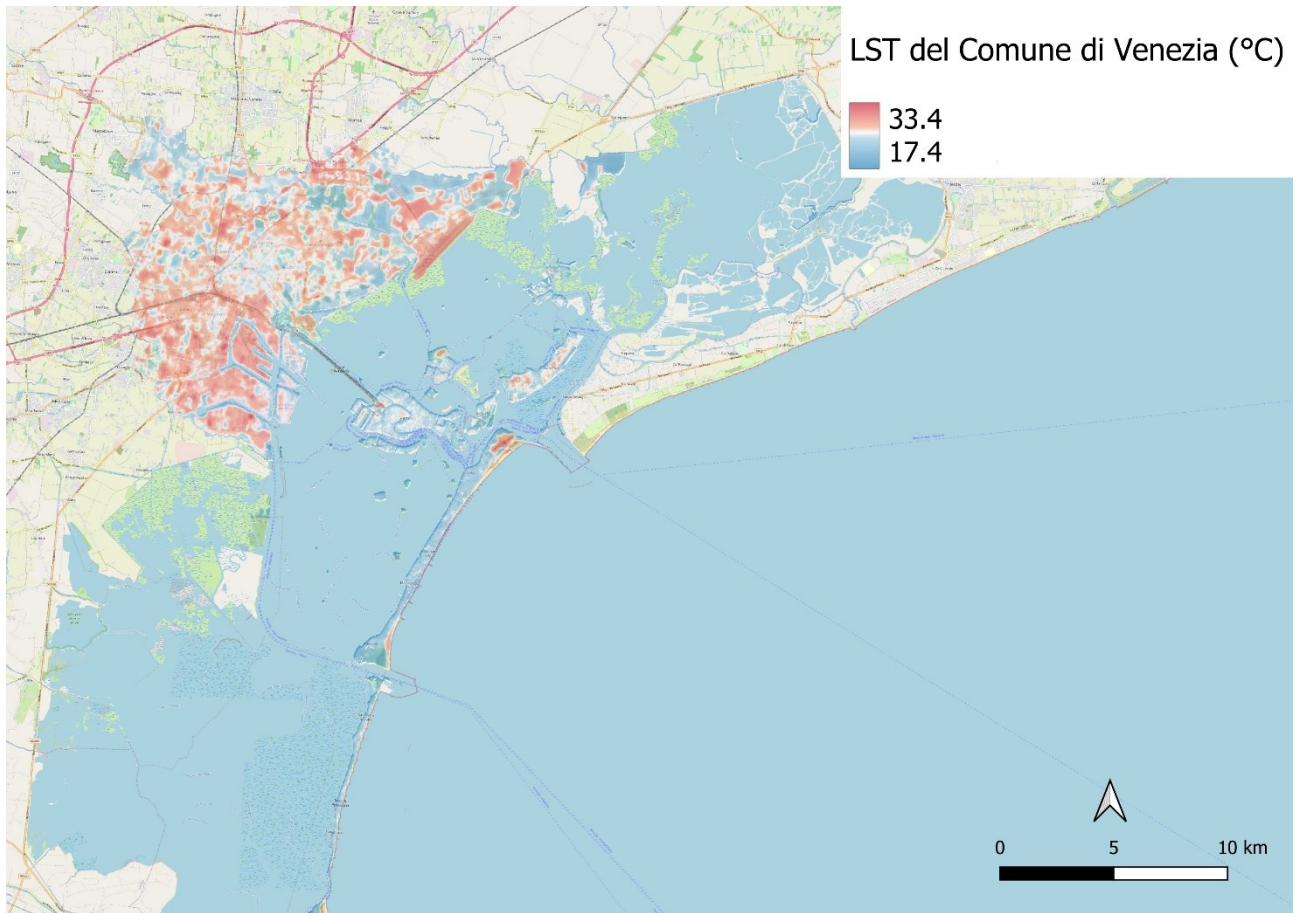


Figura 3.1.b: LST del Comune di Venezia - 04/08/2022 (fonte: elaborazione con QGIS su immagini Landsat)

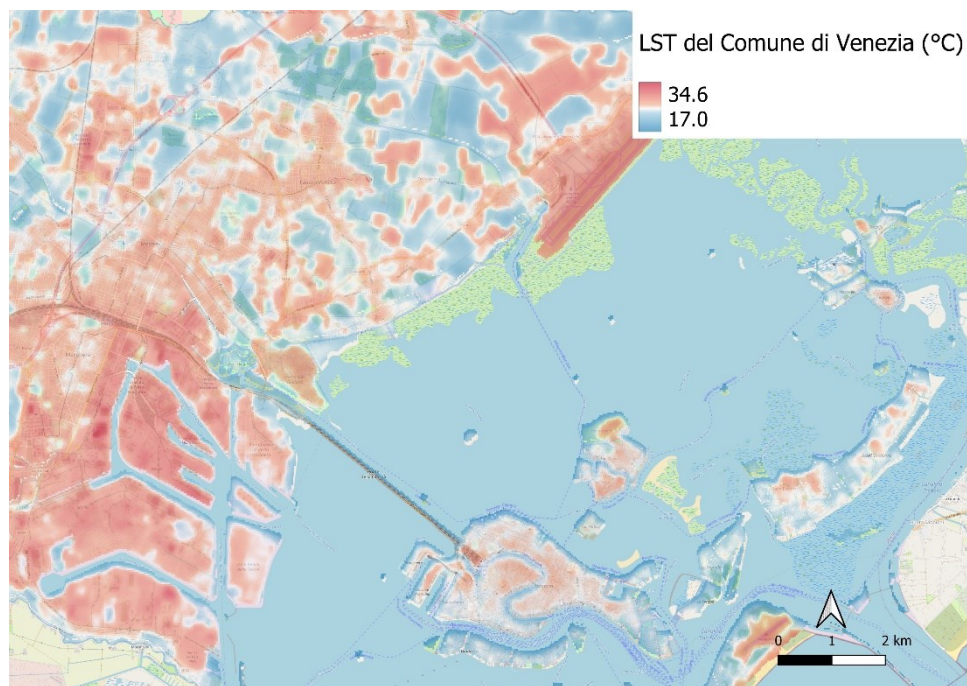


Figura 3.1.c: Dettaglio LST - 03/07/2022 (fonte: elaborazione con QGIS su immagini Landsat)

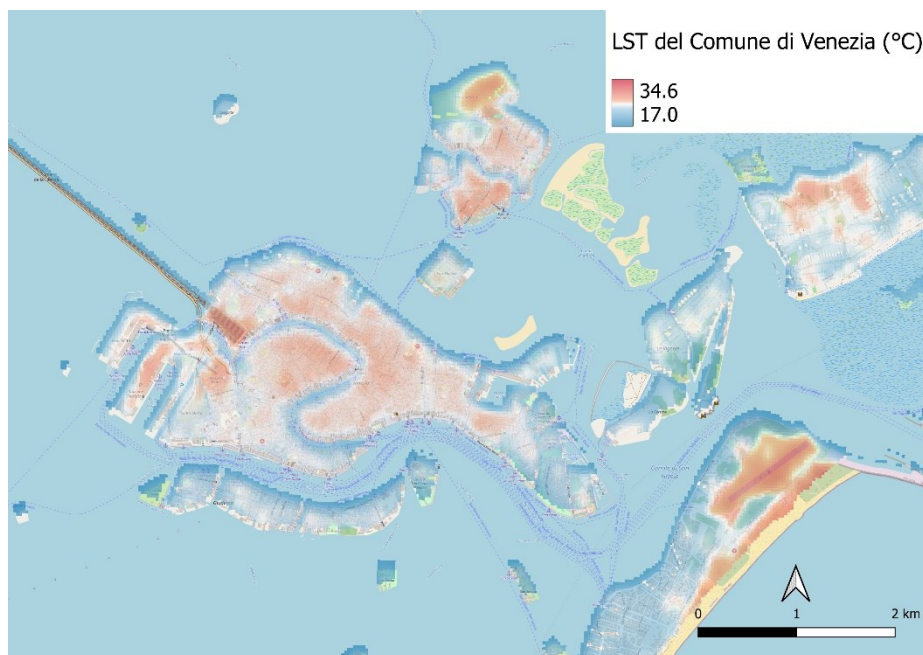


Figura 3.1.d: Dettaglio LST - 03/07/2022 (fonte: elaborazione con QGIS su immagini Landsat)

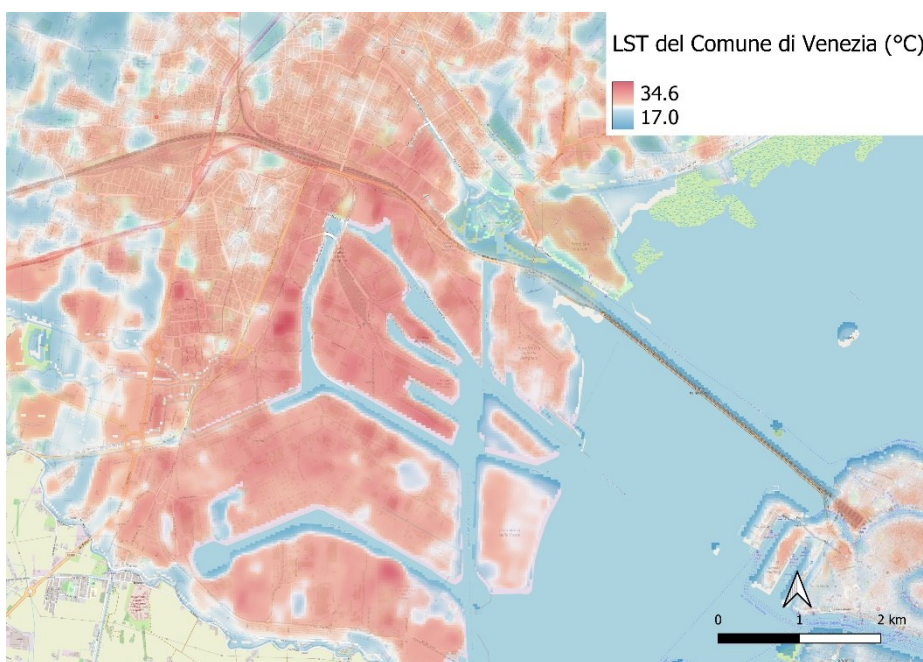


Figura 3.1.e: Dettaglio LST - 03/07/2022 (fonte: elaborazione con QGIS su immagini Landsat)

Già da questa prima mappatura si evince che la LST non risulta omogenea all'interno del territorio comunale. Per quanto riguarda il giorno 03/07, si registra una differenza tra la temperatura minima e massima di oltre 17 °C, mentre in data 04/08 si raggiunge un delta di 16 °C. In entrambe le figure risulta che i punti più caldi si collocano più nella parte di terraferma, mentre nella zona lagunare si osserva una prevalenza di pixel più freschi. In ogni caso, all'interno del territorio comunale saltano all'occhio una serie di aree caratterizzate da un rosso particolarmente intenso, qui definiti *hotspots*, su cui si concentrerà una delle successive analisi.

3.2 Isole di calore ed ambiti amministrativi

Per determinare più nel dettaglio quali siano le distribuzioni della LST all'interno dell'area di studio si è scelto di prendere in considerazione due diversi tipi di zonizzazione: la prima divide il territorio comunale in 6 zone, mentre la seconda, più articolata, è composta da 12 zone.

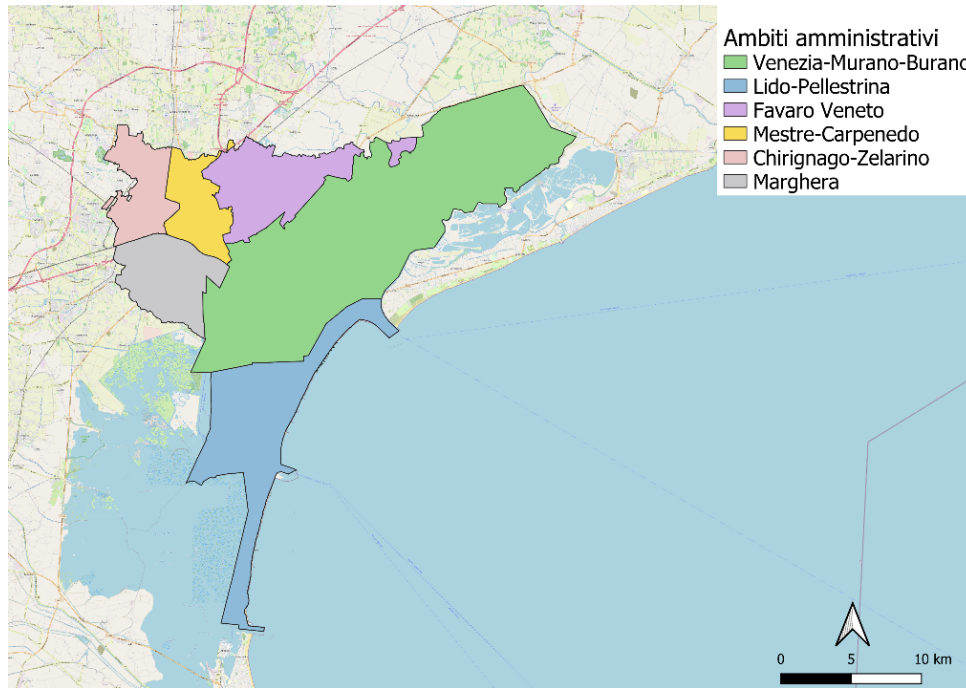


Figura 3.2.a: Comune di Venezia suddiviso in 6 zone (fonte: elaborazione con QGIS sugli ambiti amministrativi)

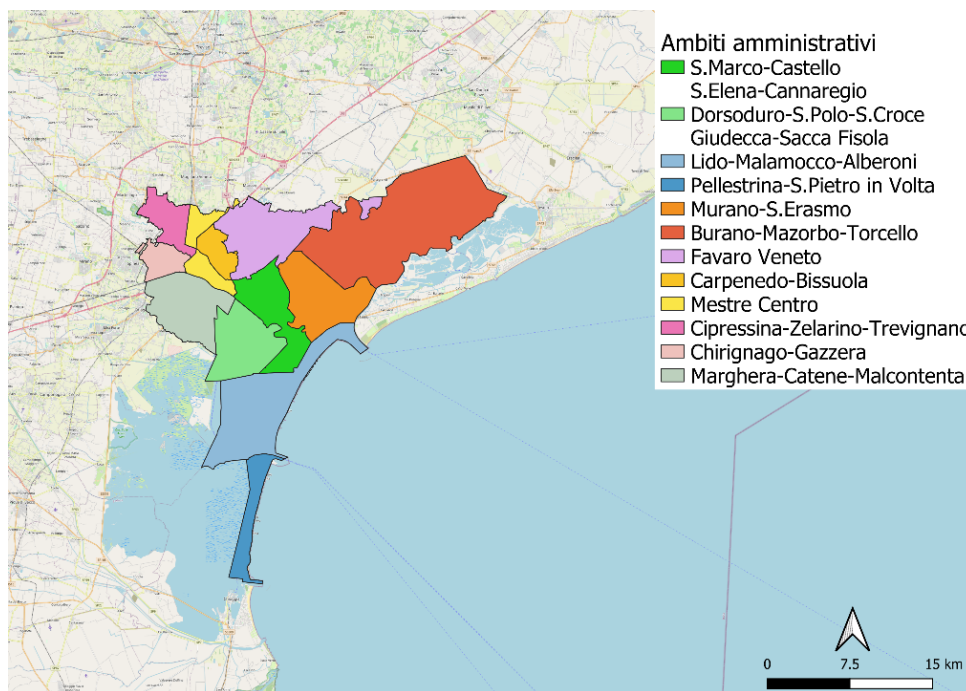


Figura 3.2.b: Comune di Venezia suddiviso in 12 zone (fonte: elaborazione con QGIS sugli ambiti amministrativi)

Partendo dall'elaborazione dei dati relativi al giorno 03/07/2022 si procede determinando come si comporti l'LST all'interno delle diverse zone individuate.

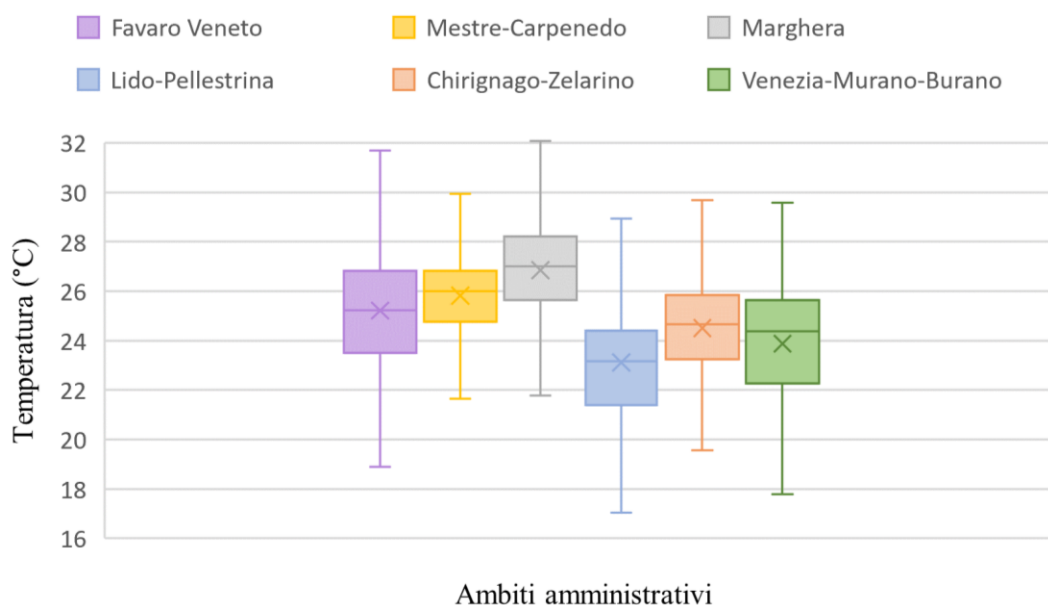


Figura 3.2.c: LST delle 6 zone del Comune di Venezia (03/07/2022)

Già da questa prima divisione in 6 macroaree si osservano delle differenze tra i diversi ambiti amministrativi. La zona che raggiunge le temperature più alte è quella di Marghera, che registra una media pari a 26,9 °C ed è caratterizzata da una bassa variabilità: il 50% dei valori rimane infatti compreso tra i 25,6 °C e 28,2 °C. Anche i due baffi registrano le temperature maggiori: il valore minimo è pari a 21,8 °C mentre il massimo raggiunge i 32,1 °C. La media di Mestre Carpenedo si colloca invece al secondo posto (con 25,8 °C), superando di poco quella di Favaro Veneto (25,2 °C). Tuttavia, la prima distribuzione è caratterizzata da una minore variabilità, con un range interquartile molto ristretto (2,1 °C), mentre i valori dell'area di Favaro Veneto si allontanano di più rispetto al valore centrale (range interquartile pari a 3,3 °C). La zona di Chirignago Zelarino è invece contraddistinta da una temperatura media pari a 24,5 °C, con una tendenza dei dati a distribuirsi in maniera simmetrica: il primo quartile si aggira intorno ai 23,2 °C, mentre il terzo raggiunge una temperatura pari a 25,8 °C. Passando invece all'ambiente lagunare, i due boxplot di Lido-Pellestrina e Venezia-Murano-Burano sono quelli che registrano le temperature minori: i limiti inferiori sono infatti rispettivamente pari a 21,4 °C e 22,3 °C, mentre i due limiti superiori raggiungono i 24,4 °C e i 25,7 °C. La zona di Venezia-Murano-Burano è inoltre caratterizzata da media pari a 23,9 °C, registrando quindi un valore superiore solo rispetto alla media dell'area di Lido-Pellestrina (23,1°C).

Passando invece ad una suddivisione del Comune di Venezia più dettagliata, si procede con un'analisi sulle 12 diverse zone. In questo caso si è ritenuto necessario abbinare i boxplot ad una rappresentazione più intuitiva della LST media per ogni zona.

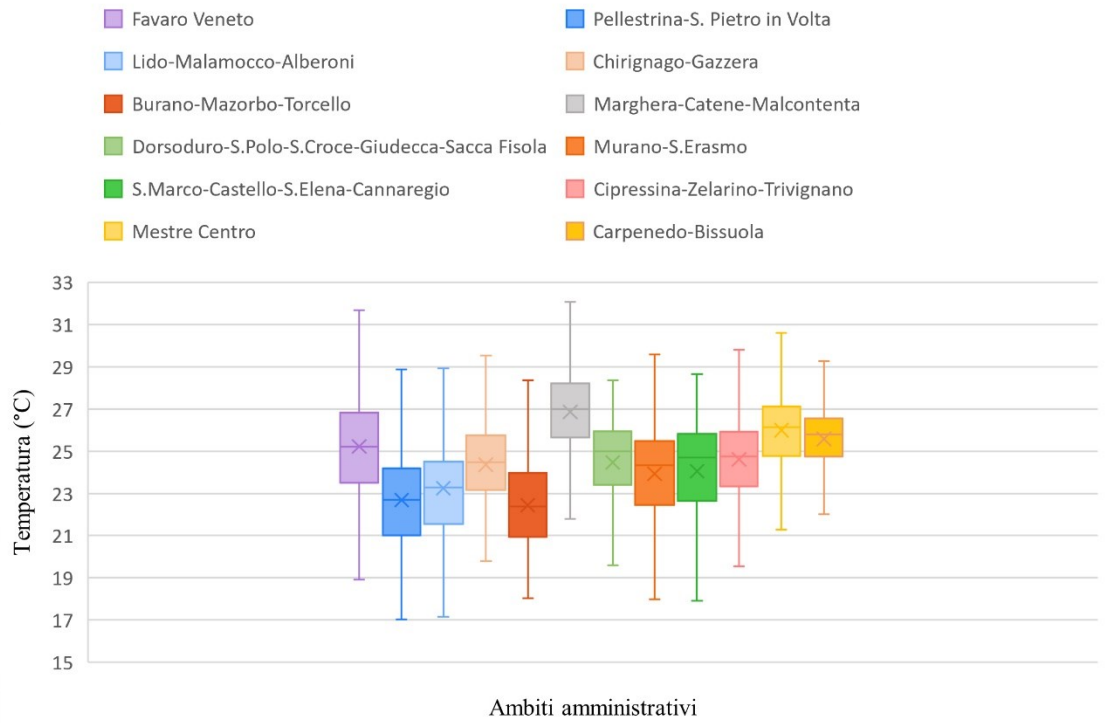


Figura 3.2.d: LST delle 12 zone del Comune di Venezia (03/07/2022)

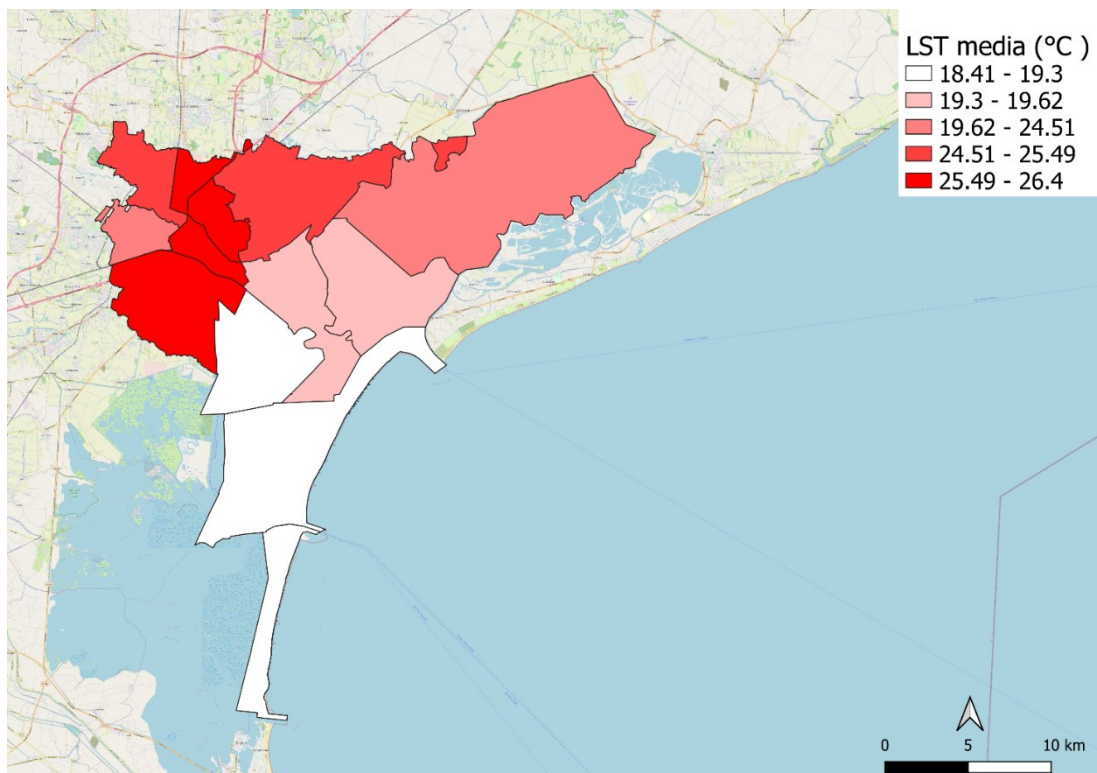


Figura 3.2.e: LST media delle 12 zone del Comune di Venezia (03/07/2022)

Uguualmente a quanto già visto in precedenza, Marghera si colloca al primo posto sia nei valori estremi (massimo di 32,1 °C e minimo di 21,8 °C) sia per quanto riguarda la media, pari a 26,9 °C.

Per le altre aree di terraferma, dopo Marghera la temperatura media più alta si è registrata a Mestre centro, raggiungendo i 26 °C. Poco più in basso si colloca anche Carpenedo-Bissuola, con una media pari a 25,6 °C ma una dispersione dei valori della distribuzione molto più ridotta (range interquartile pari a 1,9 °C contro i 2,3 °C di Mestre centro). Cipressina-Zelarino-Trevignano e Chirignago-Gazzera sono invece le zone di terraferma che raggiungono le temperature inferiori: i minimi registrati sono infatti rispettivamente di 19,6 °C e di 19,8 °C. Al contrario, la zona di Favaro Veneto, caratterizzata da un'ampia variabilità nella distribuzione, raggiunge un valore massimo pari a 31,7 °C, posizionandosi poco sotto i 32,1 °C di Marghera.

Concentrandosi invece sulla parte di centro storico e isole, si osserva che la media relativa alla città storica si aggira intorno ai 24 °C, e anche Murano si mantiene più o meno in linea con le stesse temperature. Le isole Burano-Mazzorbo-Torcello raggiungono l'LST media più bassa, pari a 22,4 °C, mentre Pellestrina-S. Pietro in Volta, insieme alla zona del Lido-Malamocco-Alberoni, registra invece valori poco più alti, che si aggirano intorno ai 23 °C.

Lo stesso lavoro è stato svolto sul giorno 04/08/2022.

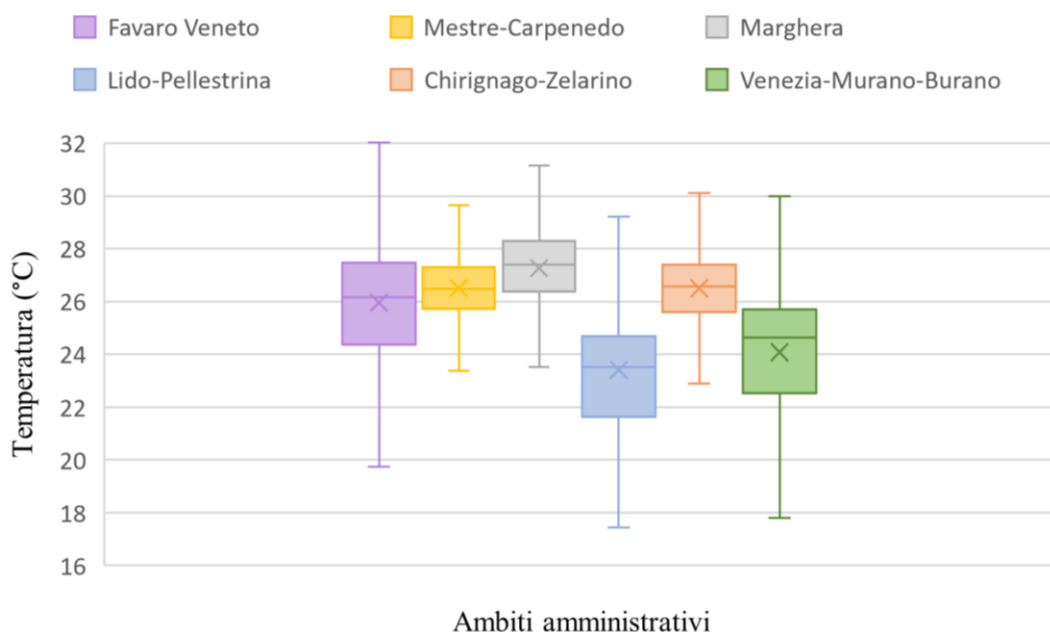


Figura 3.2.f: LST delle 6 zone del Comune di Venezia (04/08/2022)

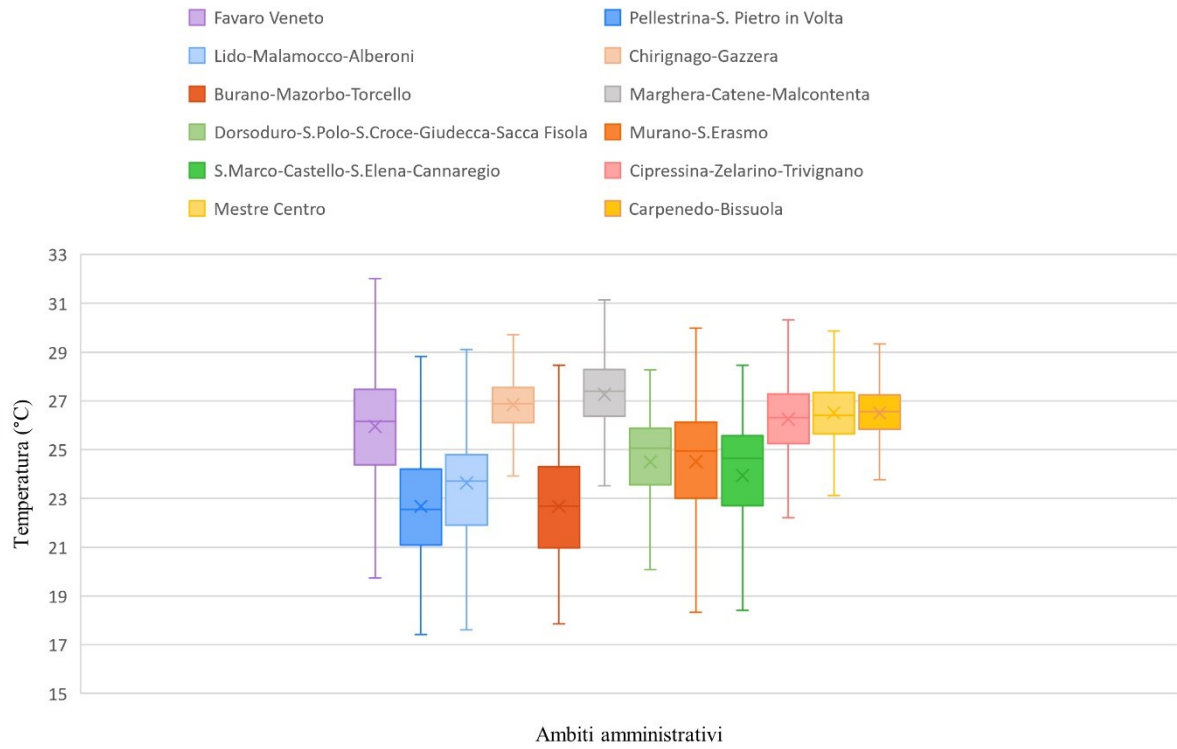


Figura 3.2.g: LST delle 12 zone del Comune di Venezia (04/08/2022)

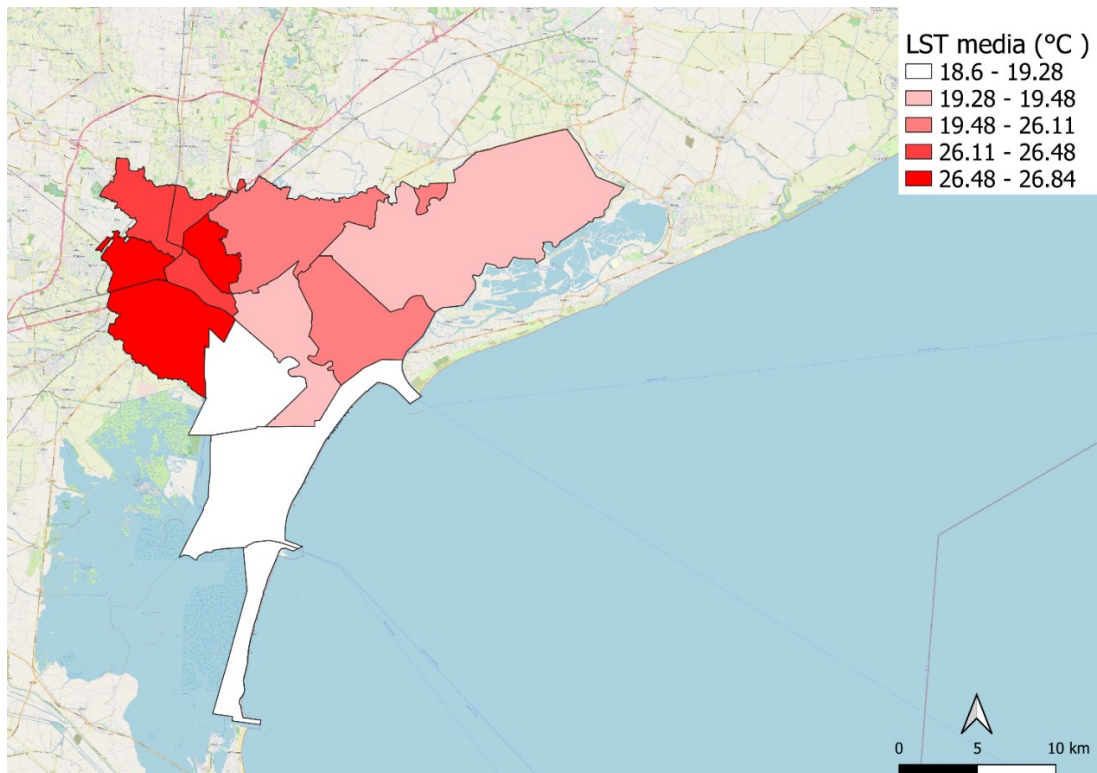


Figura 3.2.h: LST media delle 12 zone del Comune di Venezia (04/08/2022)

Come si evince dalla *Figura 3.2.f*, anche in questo caso Marghera raggiunge la temperatura media più alta, pari a 27,3 °C, ma, a differenza del 03/07, in data 04/08 è la zona di Favaro Veneto a raggiungere il valore massimo assoluto (32 °C). Anche Chirignago, che in data 03/07 si collocava più vicino ai valori del centro storico, ora si posiziona a livello di Mestre-Carpenedo con una media che si aggira intorno ai 26,5 °C. Sia Mestre-Carpenedo che Chirignago-Zelarino sono caratterizzate da una bassa variabilità, con un range interquartile rispettivamente pari a 1,6 °C e 1,8 °C. Ugualmente a quanto determinato in precedenza, i valori di LST più bassi si collocano nelle due zone lagunari: Venezia-Murano-Burano, caratterizzata da un'ampia variabilità di valori, ha una media pari a 24,1 °C, mentre quella dell'area di Lido-Pellestrina raggiunge i 23,4 °C. Lido-Pellestrina registra anche i valori minimi e massimi più bassi in assoluto, rispettivamente pari a 17,4 °C e 29,2 °C.

Scendendo più nel dettaglio grazie alle *Figura 3.2.g* e *Figura 3.2.h*, si osserva le zone di terraferma hanno tutte una media superiore ai 25,9 °C, mentre quelle relative al centro storico e alle isole raggiungono al massimo i 24,5 °C. Il picco nella media si registra sempre nell'area di Marghera (27,3 °C) seguita poi da Chirignago-Gazzera (26,9 °C). Rispetto al 03/07 però, oltre a Chirignago-Gazzera anche la zona di Cipressina-Zelarino-Trevignano raggiunge temperature più alte, con un valore massimo pari a 30,3 °C e una media di 26,3 °C. Spacchettando invece la parte lagunare si osserva che la zona di Murano-Burano registra i valori maggiori, con un massimo di 30 °C e una media che si mantiene in linea con la zona di Dorsoduro-S. Polo-S. Croce-Giudecca- Sacca Fisola (in entrambi i casi 24,5 °C). Anche questa volta è la zona di Pellestrina-S. Pietro in Volta a registrare il valore in assoluto più basso dell'intera area comunale (con un minimo di 17,4 °C) e, a differenza del 03/07 la sua media si discosta di circa un grado rispetto a quella del Lido-Malamocco-Alberoni (23,6 °C), rimanendo infatti sui 22,7 °C. Dato che queste due zone sono inserite in un contesto geografico molto simile, questa differenza di temperatura è probabilmente riconducibile ad una diversa quantità di suolo consumato, molto più pronunciata per l'area del Lido-Malamocco-Alberoni.

I risultati ottenuti dall'analisi sulle due giornate sono in linea con quanto era stato ipotizzato: le zone caratterizzate da un'intensa urbanizzazione registrano temperature maggiori rispetto a quelle che comprendono ampie aree verdi o sono mitigate dalla presenza di corpi idrici. Marghera, infatti, essendo un polo industriale soggetto ad un alto livello di consumo di suolo e ad un'elevata attività antropogenica, raggiunge le temperature più alte, mentre la parte insulare, inserita nel contesto lagunare e tipicamente più verde, risulta più fresca. Questo sembra quindi confermare la relazione tra percentuale di edificato, con relativa impermeabilizzazione delle superfici e uso di materiali con basso albedo, e aumento della temperatura.

3.3 Relazione tra copertura del suolo e Land Surface Temperature

Per analizzare in maniera più approfondita la relazione tra uso del suolo secondo la classificazione CLC e LST, si procede effettuando un'ulteriore analisi sull'intero territorio comunale. Si parte quindi generando due grafici a violino, uno per ciascuna delle due giornate di interesse: questi permettono una visualizzazione combinata sia delle informazioni tipicamente fornite dai boxpot (mediana, media, quartili, minimo e massimo), sia delle relative curve di densità.

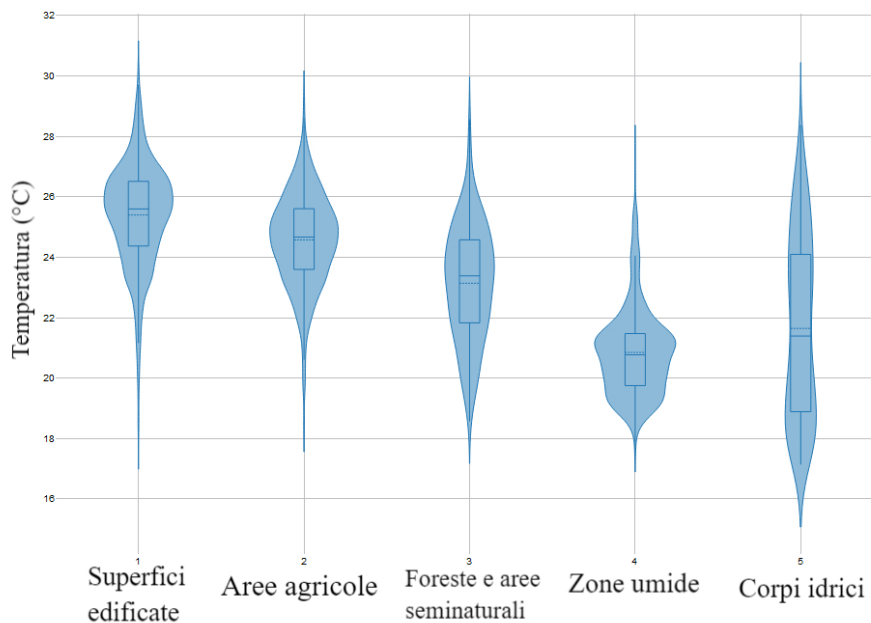


Figura 3.3.a: Grafico a violino che mette in relazione le cinque classi di copertura del suolo con la LST (03/07/2022)

Osservando dal grafico del 03/07, già di primo impatto si determina che le cinque classi di copertura del suolo di Corine Land Cover sono caratterizzate da temperature molto diverse fra loro.

La classe 1, che rappresenta tutta la parte di superfici artificiali tra cui gli agglomerati urbani, le zone industriali e la rete stradale e ferroviaria, registra le temperature massime di tutto il Comune, con un picco che raggiunge i 30,5 °C. La distribuzione risulta inoltre leggermente asimmetrica a sinistra, con una media di 25,4 °C che viene trascinata dai valori minimi. La mediana invece, che in questo caso è più rappresentativa della distribuzione, è pari a 25,6 °C.

Più in basso, per la zona agricola, rappresentata dalla classe 2, si ottiene una media pari a 24,6 °C, con un 50% dei valori compresi tra i 23,6 °C e i 25,6 °C. Come per la prima categoria, anche in questo caso la distribuzione registra temperature molto diverse tra loro: il valore massimo raggiunge i 29,4 °C, mentre il minimo è di 19,3 °C.

La terza categoria, che tipicamente include foreste ed in questo caso anche spiagge, registra invece una media di 23,1 °C. L'ampiezza del "violino" denota una grande variabilità, che viene superata solo dalla quinta classe, mentre le altre tre categorie sono caratterizzate da una curva di densità molto più raccolta intorno ai valori medi.

Concentrandosi infine sulle aree acquatiche, ovvero le classi 4 e 5, si osserva che queste sono le zone in cui si registrano temperature nettamente inferiori. Nella parte lagunare, ovvero la classe 4, il minimo raggiunge i 17,6 °C mentre la media è pari a 20,8 °C. È invece la quinta categoria ad ottenere i valori più bassi dell'intero grafico: il minimo raggiunge infatti i 17,1 °C. Inoltre, mentre la dispersione dei valori della distribuzione della quarta classe è molto più ridotta, la quinta è invece contraddistinta da un ampio range interquartile, di 5,2 °C.

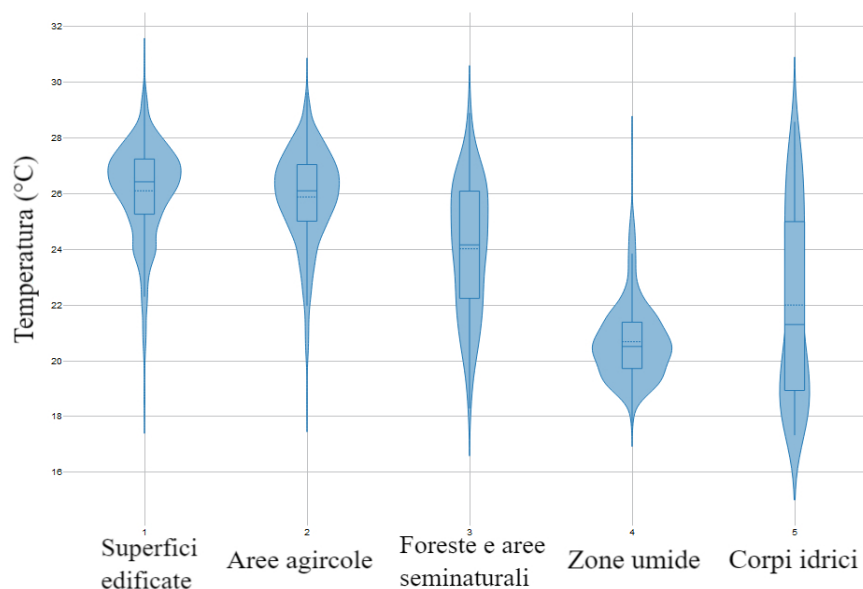


Figura 3.3.b: Grafico a violino che mette in relazione le cinque classi di copertura del suolo con la LST (04/08/2022)

Analizzando il grafico relativo al 04/08, anche in questo caso si osserva una differenza di temperatura in funzione della classe di uso del suolo.

Come nel grafico precedente, la media più alta, di 26,1 °C, è stata registrata all'interno del contesto urbanizzato, ma questa volta la temperatura della seconda classe non si discosta di molto da quella della prima: la media è pari a 25,9 °C e i valori minimi di entrambe le classi di aggirano intorno ai 18 °C. La classe 1 raggiunge però un massimo più accentuato, di 31 °C, mentre l'area agricola arriva solo a 30,1 °C.

Di nuovo, la terza categoria è caratterizzata da un'ampia variabilità di valori, con un range interquartile pari a 3,9 °C, ancora più grande di quello della stessa categoria nella *Figura 3.3.a*, di soli 2,8 °C. Inoltre, la media si abbassa di quasi 2 °C rispetto alla classe precedente, raggiungendo i 24 °C.

Anche in questo caso è la zona lagunare a registrare le temperature medie minori: la media della classe 4 è infatti di 20,7 °C. Poco più sopra si posiziona anche quella della quinta classe, pari a 22 °C. Ancora una volta, è però la quinta classe ad ottenere il valore più basso in assoluto, di 17,3 °C. Mentre la categoria 5 raggiunge un picco molto maggiore, con un massimo di 28,6 °C, la quarta, caratterizzata da una variabilità molto minore (range interquartile di 1,7 °C contro i 6,1 °C della quinta classe), raggiunge un picco di 28,1 °C.

Anche la *Figura 3.3.a* e la *Figura 3.3.b* sembrano quindi confermare la relazione tra percentuale di edificato e aumento della temperatura. In particolare, le LST maggiori sono state registrate nelle zone edificate, che hanno un'alta capacità di immagazzinare calore. I corpi d'acqua sono invece caratterizzati dalle temperature medie inferiori, e anche le aree forestali e le spiagge registrano una LST mediamente inferiore rispetto alle prime due categorie.

Ad ulteriore riprova di questa relazione si è poi passati a selezionare le sole aree relative alla classe 1, calcolandone la percentuale rispetto alla somma delle prime tre classi. Le categorie 4 e 5 sono invece state escluse, in modo da effettuare l'analisi prendendo in considerazione solo le zone di terra, escludendo quelle d'acqua.

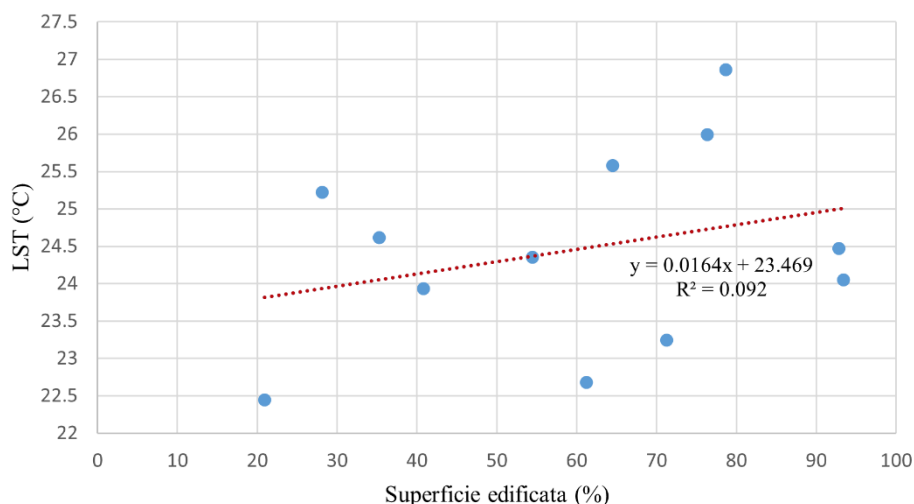


Figura 3.3.c: Scatterplot tra LST e % di edificato e retta di regressione OLS (03/07/2022)

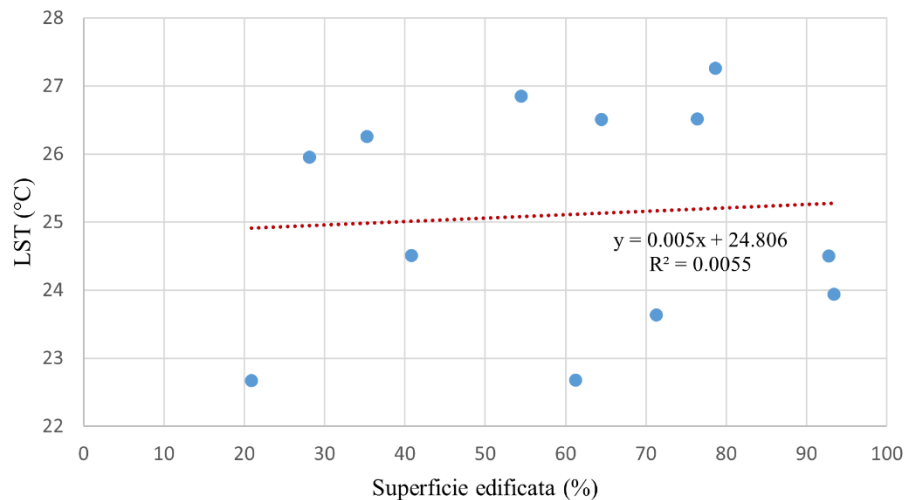


Figura 3.3.d: Scatterplot tra LST e % di edificato e retta di regressione OLS (04/08/2022)

Anche in questo caso si osserva che all'aumentare della percentuale di superficie edificata la LST aumenta. In entrambi i giorni è stato applicato un modello di regressione OLS, in modo da ottenere le due equazioni:

- $y = 0,0164 x + 23,469$ per il 03/07
- $y = 0,005 x + 24,806$ per il 04/08

Con un coefficiente di regressione pari a 0,0164, la pendenza risulta più accentuata nella giornata del 03/07, determinando che all'aumentare di 10 punti percentuali di copertura edificata la temperatura aumenta di 0,164 °C. La stessa tendenza, seppur in maniera meno evidente, si osserva anche in data 04/08: in questo caso il coefficiente β è pari a 0,005, ad indicare che, aumentando di un 10% la percentuale di superficie edificata la temperatura aumenta di 0,05 °C

Per determinarne la bontà di adattamento del modello ai dati si è poi passati a visualizzare anche i due valori di R^2 , che sono rispettivamente pari a 0,092 nel primo caso e 0,0055 nel secondo. Per entrambe le giornate il valore è molto ridotto, suggerendo che l'errore potrebbe contribuire in maniera significativa. Anche attraverso il test sul p-value, pari a 0,33 per il 03/07 e pari a 0,89 in data 04/08, si determina che, con $\alpha=0,05$, questo non è significativo. Nonostante ciò, si osserva comunque una correlazione positiva, pari a 0,303 in data 03/07 e 0,074 per il 04/08.

3.4 Analisi su *hotspots*

Si è poi passati ad un'analisi più dettagliata su alcune aree di interesse: in particolare si è andati a confrontare le tendenze della LST sugli *hotspots*, ovvero quelle zone che già delle prime elaborazioni (*Figura 3.1.a* e *Figura 3.1.b*) appaiono particolarmente calde.

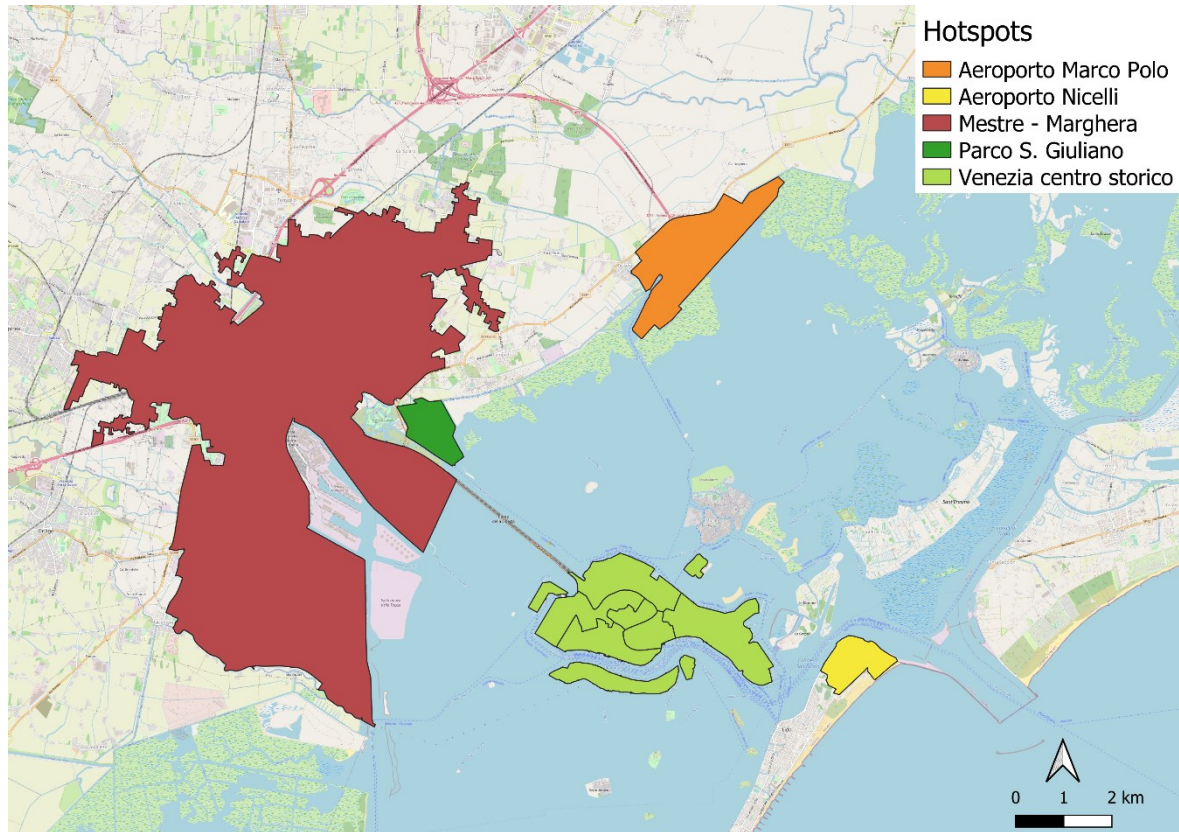


Figura 3.4.a: i cinque hotspots selezionati per il Comune di Venezia (fonte: QGIS)

La scelta delle aree da prendere in considerazione è stata fatta, come già accennato, a partire da quelle zone che sono state interessate dalle temperature maggiori già dalla prima analisi dell'LST sull'intero Comune. Inoltre, ci si è concentrati su due principali poli abitativi, Mestre-Marghera per la terraferma e Venezia centro storico all'interno del contesto lagunare, in modo da poter avere un'idea più precisa delle temperature che interessano queste due zone comunali nevralgiche.

Allo stesso tempo è stato importante includere in questa parte anche quelle zone che sono caratterizzate da un'elevata attività antropogenica, come il polo industriale di Marghera e i due aeroporti, Marco Polo e Nicelli. Per ultimo si è inserito anche parco S. Giuliano in quanto, contro le aspettative, si è delineato sia in *Figura 3.1.a* che in *Figura 3.1.b* come punto caldo all'interno del contesto comunale.

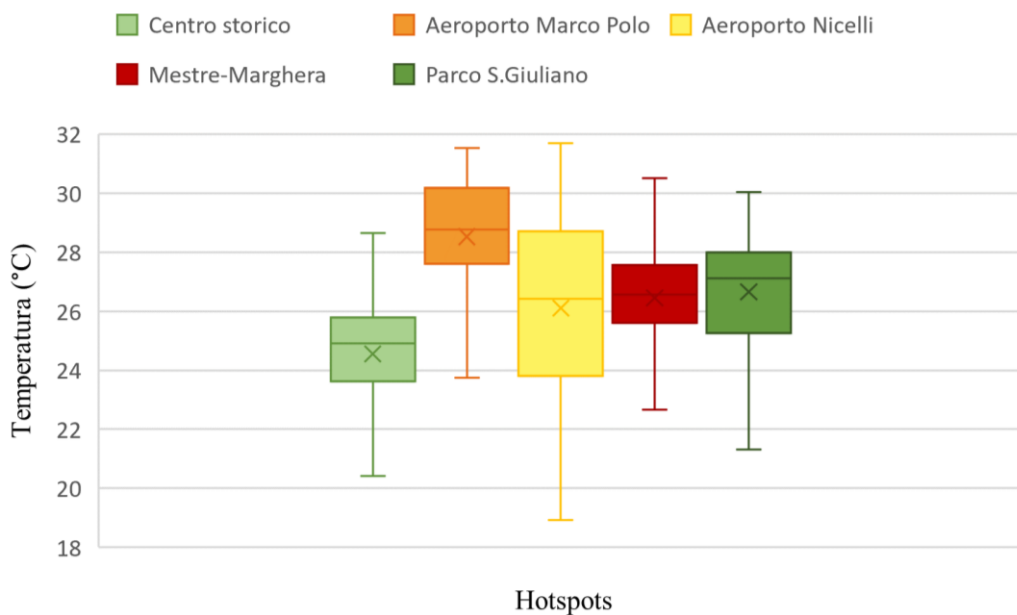


Figura 3.4.b: LST delle cinque aree hotspots del Comune di Venezia (03/07/2022)

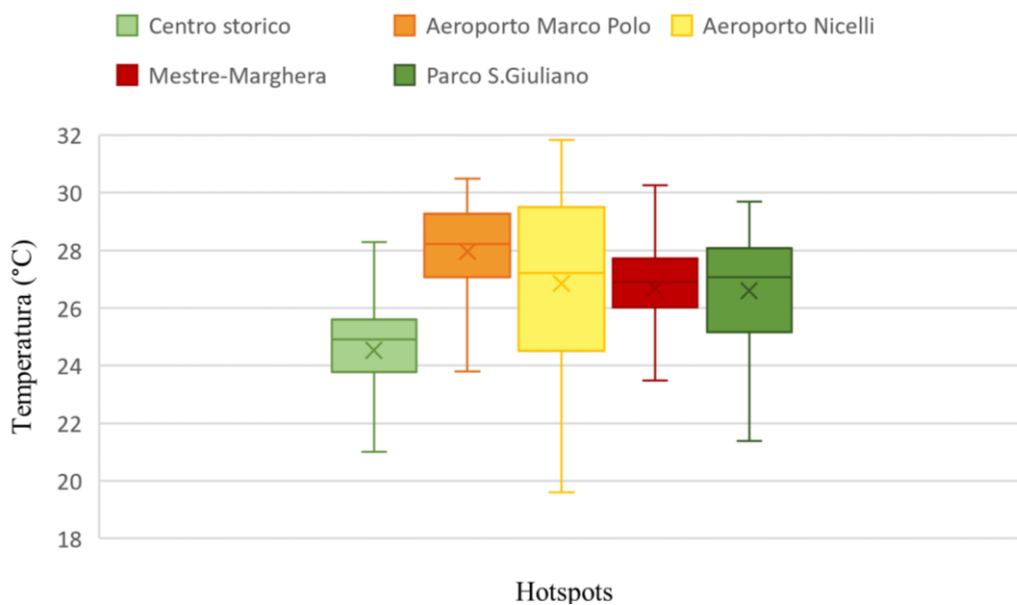


Figura 3.4.c: LST delle cinque aree hotspots del Comune di Venezia (04/08/2022)

Dalla Figura 3.4.b si evince che la temperatura media maggiore si registra nell'area dell'aeroporto Marco Polo, con un 50% dei valori che sono compresi tra i 27,6 °C e i 30,2 °C. Sebbene l'area dell'aeroporto Nicelli sia molto ridotta, essa è caratterizzata dalla più ampia variabilità di valori, con un range interquartile di 4,9 °C. La zona ottiene anche la LST più alta di tutto il grafico, pari a 31,7 °C, e la temperatura minima in assoluto, che raggiunge i 18,9 °C. Mestre-Marghera, con una variabilità molto ridotta, è invece caratterizzata da una media di 26,5 °C. Subito sopra si colloca anche parco S. Giuliano con una media di 26,7 °C. Per ultimo, il centro storico è caratterizzato dalle temperature minori, sia come minimo (20,4 °C) e massimo (28,7 °C), sia come media, pari a 24,6 °C.

Queste tendenze vengono confermate anche dalla *Figura 3.4.c*. In data 04/08 l'aeroporto Nicelli registra ancora la temperatura più alta (31,8 °C), mentre la sua media, di 26,8 °C, è più bassa di più di un grado rispetto a quella dell'aeroporto Marco Polo, pari a 28 °C. Come per il 03/07, anche in data 04/08 la media di Mestre-Marghera si posiziona più o meno all'altezza dell'area di parco S. Giuliano, anche se come prima la variabilità delle LST del parco risulta più accentuata, con un range interquartile di 3 °C. Infine, similmente a quanto osservato già in *Figura 3.4.b*, il centro storico registra una media di 24,5 °C, con un box molto contenuto.

Anche questa analisi sembra rispettare le teorie sulle isole di calore ad eccezione di parco S. Giuliano, che essendo un'area verde dovrebbe essere invece un'area della città più fresca. Questo può essere dovuto alla vegetazione bassa bruciata e all'esposizione del suolo nudo, caratterizzati da un albedo molto basso, osservati nel parco nel corso dei mesi estivi 2022. Di seguito si riporta in *Figura 3.4.d* un'immagine satellitare che permette di avere, da un punto di vista qualitativo, un'idea delle condizioni della vegetazione del parco durante il mese di luglio 2022.



Figura 3.4.d: immagine satellitare del Parco S. Giuliano nel luglio 2022 (fonte: Planet)

Allo stesso tempo si osserva che le aree caratterizzate dalla presenza di un'elevata impermeabilizzazione del suolo e attività antropica, come nel caso dei due aeroporti, sono quelle che registrano le temperature maggiori, seguite poi dalle zone di terraferma di Mestre-Marghera. Il centro storico invece, mitigato dall'azione della laguna e privato del calore antropogenico di grandi industrie, ottiene le temperature minori.

3.5 Variazione della LST rispetto alla linea di costa

Si è poi ritenuto fosse interessante determinare come varia la LST a partire dalla linea di costa.

Per farlo sono state create sei fasce che prendono come punto di riferimento la linea di costa posizionandosi su distanze diverse:

1. Da 0 a 250 m
2. Da 250 m a 500 m
3. Da 500 m a 750 m
4. Da 750 m a 1.000 m
5. Da 1.000 m a 1.250 m
6. Da 1.250 m a 1.500 m

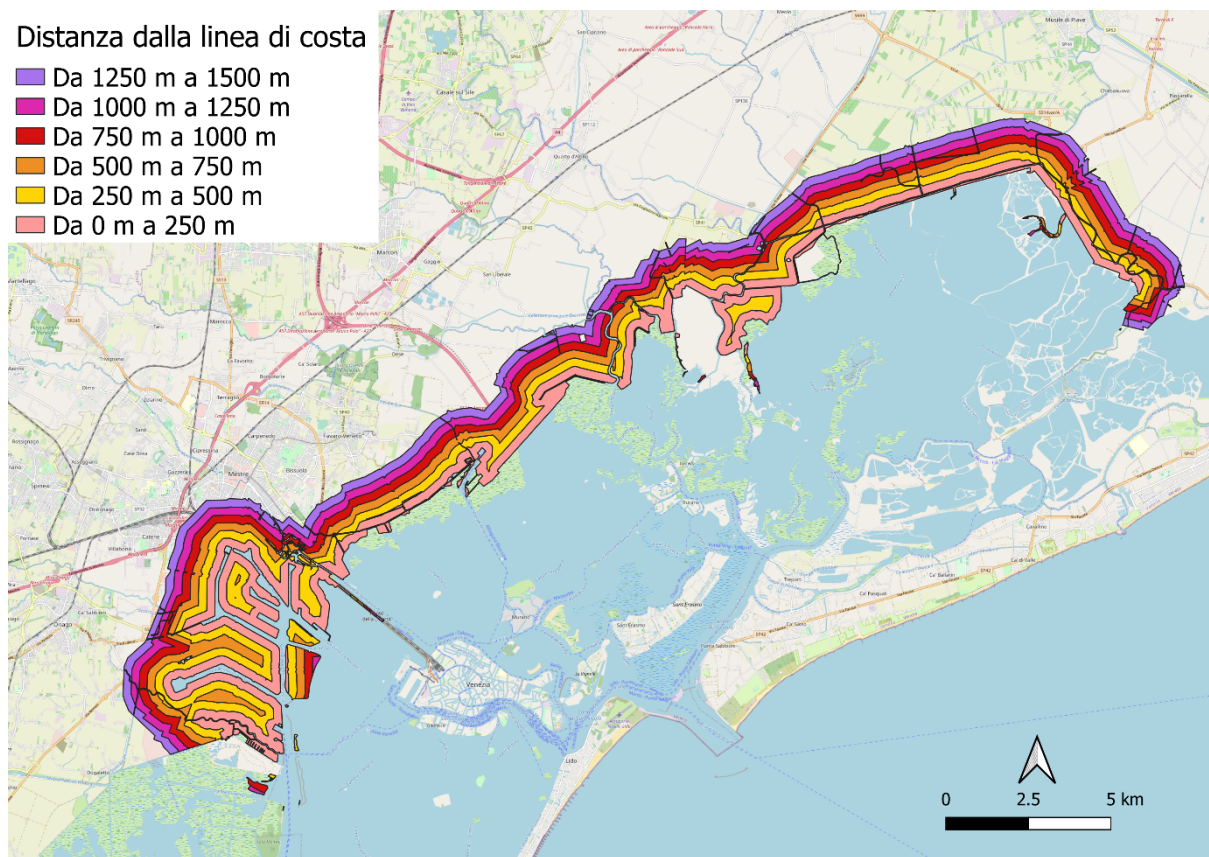


Figura 3.5.a: I sei buffer generati a partire dalla linea di costa (fonte: QGIS)

Si è quindi trovata la temperatura media per ogni fascia, e sono stati generati due scatterplot per determinare la relazione tra la LST e la distanza dalla linea di costa.

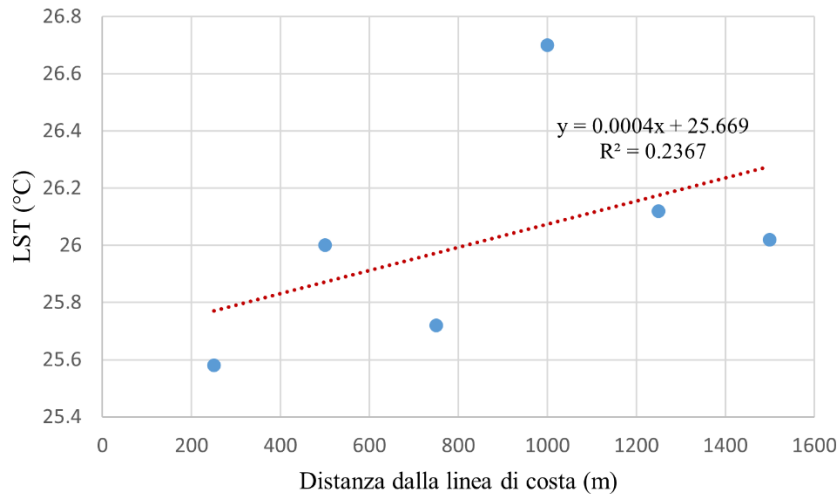


Figura 3.5.b: Scatterplot tra LST e distanza dalla linea di costa; retta di regressione OLS (03/07/2022)

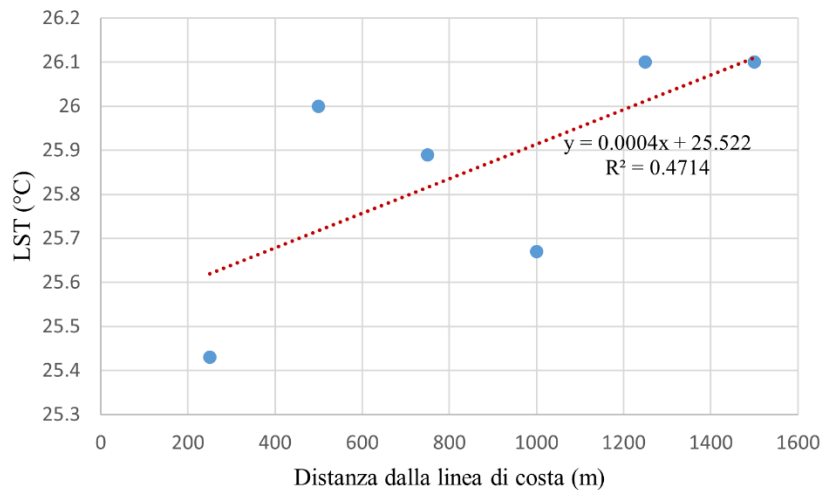


Figura 3.5.c: Scatterplot tra LST e distanza dalla linea di costa; retta di regressione OLS (04/08/2022)

Da entrambi i grafici si evince che, allontanandosi dalla linea di costa, la LST media aumenta. Il modello di regressione OLS determina che per entrambe le giornate il coefficiente di regressione è pari a 0,0004: questo implica che ogni 500 metri la temperatura aumenta mediamente di 0,24 °C. Per quanto riguarda l' R^2 le due giornate ottengono invece valori differenti, 0,2367 in data 03/7 e 0,4714 per il 04/08, comprovando un *fit* migliore nella giornata di agosto. Attraverso il test sul p-value, pari a 0,33 per il 03/07 e a 0,13 per il 04/08, si determina invece che (sempre con $\alpha=0,05$) il modello applicato non è significativo. In entrambi i casi si ottiene comunque una correlazione positiva, che risulta pari 0,487 nel primo caso e 0,687 nel secondo. Ad ogni modo si ipotizza che i risultati siano trascinati a ribasso: sebbene infatti sia stata evidenziata una certa correlazione, questa viene inficiata dalle elevate temperature di alcuni *hotspots* che si collocano proprio a ridosso della costa. L'aeroporto Marco Polo, per esempio, si estende dalla riva verso l'entroterra, è uno dei punti più caldi dell'intero Comune, con una media di 28,5 °C per il 03/07 e di 28 °C per il 04/08.

4. Conclusioni

Le isole di calore urbano sono un fenomeno che si verifica nelle aree cittadine di tutto il mondo, e risultano di particolare impatto se associate all'aumento delle temperature a livello globale generato dalle attività antropiche.

In particolare, si è deciso di andare ad indagarne le dinamiche all'interno del Comune di Venezia, che include sia un'ampia zona di terraferma che una parte lagunare. A partire dall'analisi fatta sui dati ricavati dalle tre stazioni meteorologiche di Venezia-Istituto Cavanis, Favaro Veneto e Cavallino Treporti, si è evinto che le due giornate del 03/07/2022 e del 04/08/2022 sono state particolarmente calde (superando il novantesimo percentile delle serie) per tutte e tre le stazioni.

Su queste due giornate si è andati a mappare la LST, ottenendo così una prima visione della disomogeneità della temperatura nelle diverse parti dell'area di studio. Scendendo più nel dettaglio si è quindi andati ad indagare come varia la LST all'interno degli ambiti amministrativi comunali: da questa prima analisi si determina che le LST maggiori sono quelle del polo industriale di Marghera e più in generale della terraferma. Questo risultato sembra suggerire una stretta relazione tra LST e copertura del suolo, ed in effetti sono proprio le superfici urbanizzate a registrare le temperature più alte. Inoltre, applicando un modello di regressione OLS, si è riusciti ad individuare una correlazione tra percentuale di superficie edificata e LST: in entrambe le giornate si osserva una correlazione positiva pari a pari a 0,303 in data 03/07 e 0,074 per il 04/08. Infine, si procede con un confronto tra alcuni punti *hotspots* del Comune e si conclude con un'analisi che evidenzia una correlazione positiva tra l'allontanamento dalla linea di costa e l'aumento della LST media.

Il lavoro viene proposto come supporto ai piani di adattamento in quanto, stimando che nel 2050 il 68% della popolazione vivrà in zone urbanizzate, le conseguenze delle UHI interesseranno una porzione sempre maggiore di individui, colpendo soprattutto i più vulnerabili da un punto di vista fisico o socioeconomico. Le ripercussioni possono essere anche estreme: l'aumento di temperatura in città è il principale fattore scatenante delle malattie ed eventi di mortalità associati al caldo (Ballester et al, 2023).

Bibliografia e sitografia

1. Amado, C., 2022. Unravelling the Urban Heat Island Phenomenon in the Netherlands. A Multicity Spatial Analysis on the Distributive component of Environmental Justice, analysing the Urban Green Infrastructure, and the Urban Heat Island Effect. *Social Scienncce Research Network* [e-journal]: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4049664>
2. Anandababu, D., Purushothaman, B. M., & Suresh, B. S. (2018). Estimation of land surface temperature using Landsat 8 data. *International Journal of Advance Research* [pdf]: <https://www.ijariit.com/manuscripts/v4i2/V4I2-1195.pdf>
3. ARPAV, 2022. *Consumo di suolo nella regione Veneto* [pdf]: <https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/soilo/file-e-allegati/documenti/consumo-di-suolo/consumo-di-suolo-nella-regione-veneto-nel-2021.pdf/@@display-file/file>
4. ARPAV, 2022. *Dati meteorologici orari* [online]: <https://www.ambienteveneto.it/stazioni/datorari/>
5. Ballester, J., Quijal-Zamorano, M., Méndez Turrubiates, R. F., Pegenaute, F., Herrmann, F. R., Robine, J. M., Basagagna, X., Tonne, C., Antò, J. M., & Achebak, H., 2023. Heat-related mortality in Europe during the summer of 2022. *Nature Medicine* [e-journal]: <https://doi.org/10.1038/s41591-023-02419-z>
6. CNR. *Radiazione e suolo: Albedo*. [pdf]: <https://www.isac.cnr.it/sites/default/files/2020-03/Albedo.pdf>
7. Colelli, F. P., Emmerling, J., Marangoni, G., Mistry, M. N., & De Cian, E., 2022. Increased energy use for adaptation significantly impacts mitigation pathways. *Nature Communications* [e-journal]: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32471-1>
8. Comune di Venezia, 2021. *Annuario del turismo dati 2021* [pdf]: https://www.comune.venezia.it/sites/comune.venezia.it/files/documenti/Turismo/2021_annuario_ITA_rev2023.pdf
9. Comune di Venezia, 2023. *Dati demografici-popolazione* [online]: <https://www.comune.venezia.it/it/content/statistica-statistiche-popolazione-0>
10. Copernicus, 2022. *Seasonal review. Europe's record-breaking summer* [online]: <https://climate.copernicus.eu/seasonal-review-europes-record-breaking-summer>
11. Copernicus. *Climate Indicators – Temperature* [online]: <https://climate.copernicus.eu/climate-indicators/temperature>
12. Copernicus. *Extreme Heat* [online]: <https://climate.copernicus.eu/esotc/2022/extreme-heat>
13. Copernicus. *Surface air temperature maps (July 2022, July 2023, August 2023)* [online]: <https://climate.copernicus.eu/surface-air-temperature-maps>
14. Cristiano, S., & Gonella, F., 2020. ‘Kill Venice’: a system thinking conceptualisation of urban life, economy, and resilience in tourist cities. *Humanities and Social Sciences Communications* [e-journal]: <https://doi.org/10.1057/s41599-020-00640-6>
15. ESA, 2022. *City heat extremes* [online]: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/City_heat_extremes
16. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 2023. *European Heatwave July 2023* [online]: <https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/science-blog/2023/european-heatwave-july-2023>
17. Geoportale del Comune di Venezia, 2023. *Portale dei servizi* [online]: <https://portale.comune.venezia.it/content/dati-urbanistica>

18. Geoportale della Regione Veneto, 2023. *Ricerca da catalogo* [online]: <https://idt2.regione.veneto.it/idt/search/searchPage>
19. IPCC, 2021. *Summary for policymakers* [pdf]: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf
20. IPCC, 2023. *AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023*. [pdf]: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
21. ISPRA, 2022. *Gli indicatori del clima in Italia nel 2021* [pdf]: https://www.isprambiente.gov.it/files2022/pubblicazioni/stato-ambiente/rapporto_clima_2021.pdf
22. ISTAT, 2022. *Bilancio demografico mensile e popolazione residente per sesso, anno 2022* [online]: <https://demo.istat.it/app/?l=it&a=2022&i=D7B>
23. Kovats, R. S., Hajat, S., & Wilkinson, P., 2004. Contrasting patterns of mortality and hospital admissions during hot weather and heat waves in Greater London, UK. *Occupational and environmental medicine* [e-journal]: <https://doi.org/10.1136/oem.2003.012047>
24. Met office. *What is a Heatwave?* [online]: <https://www.metoffice.gov.uk/weather/learn-about/weather/types-of-weather/temperature/heatwave>
25. Mijani, N., Firozjaei, M. K., Mijani, M., Khodabakhshi, A., Qureshi, S., Arsanjani, J. J., & Alavipanah, S. K., 2023. Exploring the effect of COVID-19 pandemic lockdowns on urban cooling: A tale of three cities. *Advances in Space Research* [e-journal]: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.09.052>
26. Mitchell, B. C., Chakraborty, J., & Basu, P., 2021. Social inequities in urban heat and greenspace: Analyzing Climate Justice in Delhi, India. *International Journal of Environmental Research and Public Health* [e-journal]: <https://doi.org/10.3390/ijerph18094800>
27. Morabito, M., Crisci, A., Gioli, B., Gualtieri, G., Toscano, P., Di Stefano, V., Orlandini, S., & Gensini, G. F., 2015. Urban-hazard risk analysis: Mapping of heat-related risks in the elderly in major Italian cities. *PLoS one* [e-journal]: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0127277>
28. Nayak, S. G., Shrestha, S., Kinney, P. L., Ross, Z., Sheridan, S. C., Pantea, C. I., Hsu, W. H., & Hwang, S. A. et al, 2018. Development of a heat vulnerability index for New York State. *Public Health* [e-journal]: <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2017.09.006>
29. Nunez, M., & Oke, T. R., 1977. The energy balance of an urban canyon. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* [e-journal]: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1977\)016%3C0011:teboau%3E2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1977)016%3C0011:teboau%3E2.0.co;2)
30. Oke, T. R., 1988. Street design and urban canopy layer climate. *Energy and buildings* [e-journal]: [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(88\)90026-6](https://doi.org/10.1016/0378-7788(88)90026-6)
31. Otto, I. M., Reckien, D., Reyer, C. P., Marcus, R., Le Masson, V., Jones, L., Norton, A., & Serdeczny, O., 2017. Social vulnerability to climate change: a review of concepts and evidence. *Regional environmental change* [e-journal]: <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1105-9>
32. Pappalardo, S. E., Zanetti, C., & Todeschi, V., 2023. Mapping urban heat islands and heat-related risk during heat waves from a climate justice perspective: A case study in the municipality of Padua (Italy) for inclusive adaptation policies. *Landscape and Urban Planning* [e-journal]: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104831>
33. Planet, 2022 [online]: <https://www.planet.com/>
34. Sanchez-Guevara, C., Peiró, M. N., Taylor, J., Mavrogianni, A., & González, J. N., 2019. Assessing population vulnerability towards summer energy poverty: Case studies of Madrid and London. *Energy and Buildings* [e-journal]: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.02.024>

35. Simmon, A. J., 2022. Trends in the tropospheric general circulation from 1979 to 2022. *Weather and Climate Dynamics* [e-journal]: <https://doi.org/10.5194/wcd-3-777-2022>
36. SNPA, 2022. *Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici* [pdf]: https://www.snambiente.it/wp-content/uploads/2022/07/Rapporto_consumo_di_suolo_2022.pdf
37. Stewart, I. D., & Oke, T. R., 2012. Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society* [e-journal]: <https://doi.org/10.1175/bams-d-11-00019.1>
38. Sustainable energy for all, 2022. *Chilling Prospects* [pdf]: <https://www.seforall.org/system/files/2022-07/seforall-chilling-prospects-2022.pdf>
39. Theeuwes, N. E., Steeneveld, G. J., Ronda, R. J., Heusinkveld, B. G., & Holtslag, A. A. M., 2012. *Mitigation of the urban heat island effect using vegetation and water bodies* [e-journal]: <https://edepot.wur.nl/218899>
40. United Nations, 2018. *World Urbanization prospects* [pdf]: <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>
41. United States Geological Survey, 2022. *USGS Earth Explorer* [online]: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
42. Vicedo-Cabrera, A. M., Scovronick, N., Sera, F., Royé, D., Schneider, R., Tobias, A., ... & Gasparrini, A., 2021. The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change. *Nature Climate Change* [e-journal]: <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01058-x>
43. World Meteorological Organization, 2023. *State of the Climate in Europe 2022* [pdf]: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=11698
44. Yuan, F., & Bauer, M. E., 2007. 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* [e-journal]: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.003>
45. _Zanter, K., 2018. *Landsat surface temperature (ST) product guide* [pdf]: https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/atoms/files/LSDS-1330-LandsatSurfaceTemperature_ProductGuide-v2.pdf

