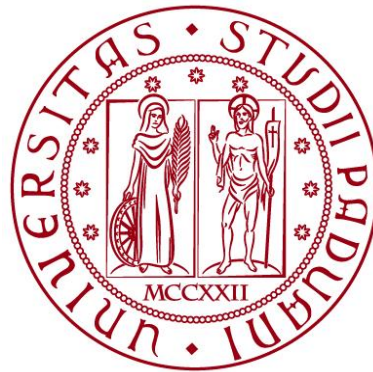


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Biologia

Corso di Laurea in
SCIENZE NATURALI



ELABORATO DI LAUREA

ONDATE DI CALORE A PADOVA NELL'ESTATE DEL 2024: MOBILE MAPPING DELLE ISOLE DI CALORE URBANE MEDIANTE L'USO DI METEOTRACKER©

Tutor: Prof. Salvatore Pappalardo

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale

Co-tutor: Dott. Carlo Zanetti

Centro di Ateneo per i Diritti Umani

Laureanda: Mila Micoli

Anno Accademico 2023-2024

Abstract:

Negli ultimi decenni, il fenomeno delle isole di calore urbano (*Urban Heat Islands*, UHIs) – ovvero l'incremento delle temperature nelle aree urbane rispetto a quelle rurali – si è intensificato, in parallelo con l'aumento della frequenza e intensità degli eventi climatici estremi. Questo fenomeno è il risultato di complesse interazioni tra l'ambiente costruito e le condizioni atmosferiche ed è legato principalmente a fattori come l'uso del suolo, la morfologia urbana e l'albedo. Le aree urbane, con una maggiore densità di edifici e superfici impermeabili che immagazzinano calore, risultano particolarmente vulnerabili alle ondate di calore, con impatti negativi per la qualità della vita e la salute dei cittadini, oltre che per il consumo energetico legato al raffrescamento.

L'obiettivo di questo studio è analizzare le anomalie termiche di una determinata zona della città di Padova, durante le giornate estive, e in condizioni meteorologiche variabili, utilizzando dispositivi *low-cost* per il mobile mapping, come MeteoTracker© e Open Seneca. La prima fase della ricerca si è focalizzata sull'analisi spatio-temporale dei dati raccolti nel periodo estivo (giugno – agosto 2024), per identificare e cartografare le UHI nelle aree analizzate. Dopo un esame dettagliato dei singoli percorsi, le misurazioni sono state aggregate e analizzate per stimare la temperatura media lungo i tracciati. Successivamente, si è approfondita la relazione tra la temperatura dell'aria e l'uso del suolo, nonché tra la temperatura e il *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*, che stima il vigore della vegetazione. La seconda parte della ricerca ha confrontato la temperatura dell'aria con il valore di *Land Surface Temperature (LST)*, ottenuto dall'elaborazione delle immagini termiche dei satelliti Landsat 8 e 9, al fine di valutare se il dato satellitare possa rappresentare un *proxy* della temperatura dell'aria. Per questo, i rilevamenti sono stati sincronizzati con i passaggi dei satelliti. Infine, all'interno del percorso sono state confrontate le temperature in diverse zone per valutare l'effetto mitigante del verde urbano, evidenziando il ruolo delle aree vegetate nel raffrescamento degli spazi circostanti. In particolare, Piazza Savelli, pur essendo stata progettata con elementi di verde urbano, mostra carenze significative in termini di mitigazione termica, offrendo un esempio delle limitazioni di alcune soluzioni di "verde urbano".

È dunque evidente l'importanza di monitorare e mappare le UHI nelle aree cittadine più impermeabilizzate, integrando misurazioni di temperatura ottenute tramite mobile mapping con i dati provenienti dalle piattaforme satellitari.

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Ondate ed isole di calore urbano	1
1.1.1	Cause e conseguenze	3
1.1.2	Mitigazione e adattamento	5
1.2	La Citizen Science e l'utilizzo delle "Sniffer Bikes"	7
1.3	Obiettivi dello studio	8
2	Materiali e metodi	9
2.1	Materiali	9
2.1.1	Dispositivo mobile <i>MeteoTracker</i> ®	9
2.1.2	Dispositivo mobile <i>Open Seneca</i>	11
2.1.3	Dati satellitari: Landsat 8 e 9	13
2.1.4	<i>Land Surface Temperature</i> e <i>Normalized Difference Vegetation Index</i>	14
2.1.5	Carta di copertura del suolo	15
2.1.6	<i>Software</i> per l'elaborazione dei dati	16
2.1.7	Erbario e Flora d'Italia	16
2.2	Metodi	18
2.2.1	Inquadramento geografico del percorso di studio	18
2.2.2	Mobile Mapping	19
2.2.3	Elaborazione ed analisi dei dati	19
2.2.4	Catalogazione della flora	31
4	Risultati e discussione	35
4.1	Andamento delle temperature registrate da <i>MeteoTracker</i> ®	35
4.2	Confronto tra i dispositivi <i>Meteotracker</i> ® e <i>Open Seneca</i>	39
4.3	Mappatura delle isole di calore urbano	43
4.4	Analisi della copertura del suolo e delle temperature	51
4.5	Impatto delle condizioni metereologiche sulle temperature	55
4.6	Elaborazione e analisi dati ambientali	58
4.7	Il ruolo delle aree verdi nella mitigazione del calore urbano	64
5	Conclusioni	73
6	Ringraziamenti	75
7	Bibliografia	77
8	Sitografia	83
9	Allegato 1	85

1 Introduzione

1.1 *Ondate ed isole di calore urbano*

Secondo quanto afferma il *World Meteorological Organization* (WMO), le ondate di calore (*Heat Waves*, HWs) sono periodi di caldo anomalo che possono durare da pochi giorni a mesi, in cui le temperature massime e minime sono insolitamente elevate in una determinata località. Questa descrizione viene confermata anche dal Ministero della Salute Italiano, il quale specifica ulteriormente e definisce le HWs come fenomeni meteorologici estremi spesso associati a tassi elevati di umidità, forte irraggiamento solare e assenza di ventilazione. Per una definizione più specifica, che permetta di identificare tali eventi sulla base delle condizioni locali e dei dati storici, il WMO definisce un'ondata di calore come un fenomeno in cui la temperatura massima giornaliera supera il 90° percentile rispetto al periodo climatologico di riferimento per almeno sei giorni consecutivi. In altre parole, se la temperatura massima giornaliera, per almeno sei giorni consecutivi, supera il livello raggiunto dal 90% della serie storica di riferimento, si considera che si sia verificata un'ondata di calore.

Copernicus Climate Change Service ha dichiarato che agosto 2024 è stato il mese più caldo a livello globale, insieme ad agosto 2023, confermando che nel 2024 le temperature globali sono state costantemente al di sopra della media preindustriale di circa 1,5°C (Figura 1). Il grafico evidenzia chiaramente l'aumento delle temperature globali nel contesto del cambiamento climatico, mostrando un riscaldamento marcato negli ultimi anni (in rosso e arancione) rispetto al passato (linee grigie). Inoltre, dalla Figura 2 emerge che la temperatura media globale per l'estate boreale del 2024 è stata la più alta mai registrata, con un incremento di 0,69 °C rispetto alla media del periodo 1991-2020 per i mesi estivi. Questo valore supera il precedente record di giugno-agosto 2023, che era stato di 0,66 °C sopra la media. Questi grafici sono particolarmente significativi secondo Samantha Burgess, vicedirettrice del Copernicus Climate Change Service, che afferma: “La serie di temperature record aumenta la probabilità che il 2024 sia l'anno più caldo mai registrato. Gli eventi estremi legati alla temperatura osservati quest'estate diventeranno ancora più intensi, con conseguenze più devastanti per le persone e il pianeta, a meno che non adottiamo misure urgenti per ridurre le emissioni di gas serra.” Questa osservazione è confermata anche dal sesto rapporto di valutazione dell'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), che prevede un aumento dell'intensità, della frequenza e della durata delle ondate di calore con ulteriore riscaldamento globale.

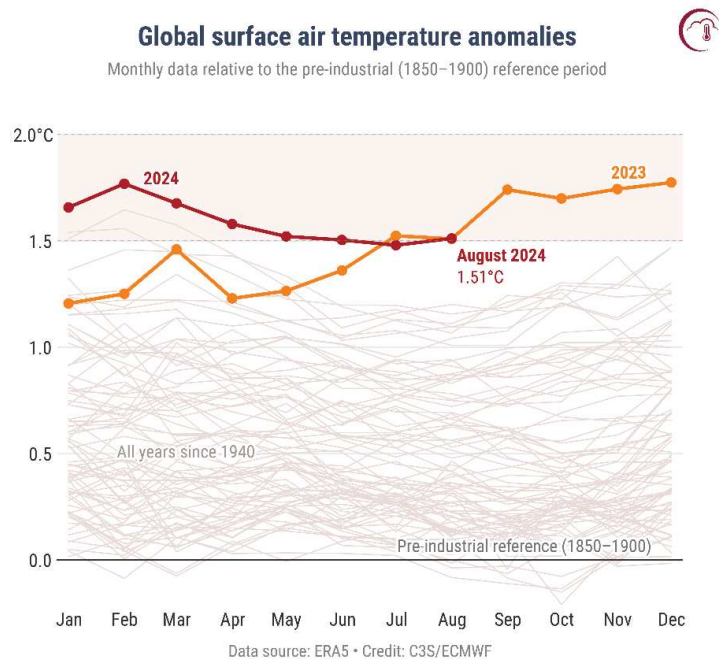


Figura 1. Anomalie mensili della temperatura dell'aria superficiale globale - Copernicus Climate Change Service /ECMWF

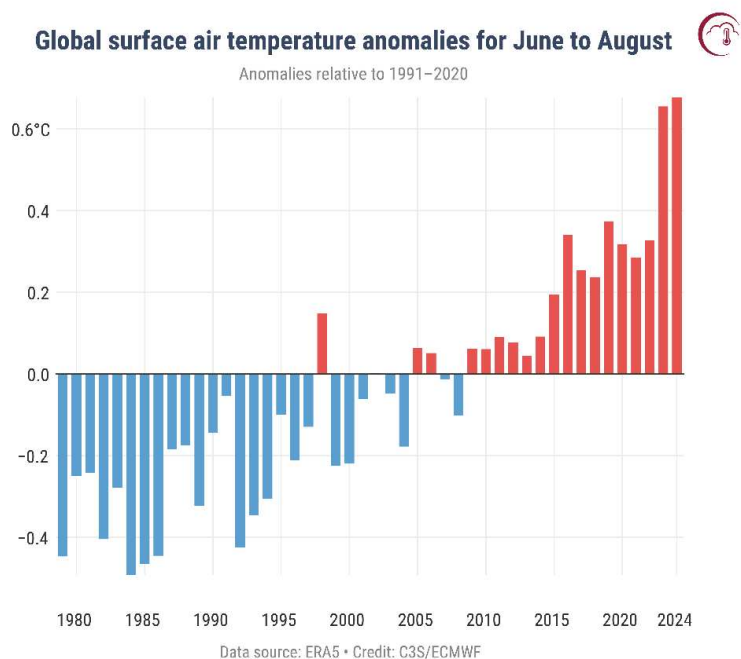


Figure 2 Anomalie della temperatura media globale dell'aria superficiale rispetto al periodo 1991-2020 per ogni estate boreale (da giugno ad agosto) - Copernicus Climate Change Service /ECMWF

L'effetto dell'isola di calore urbana, invece, è descritto come un fenomeno in cui le temperature superficiali e dell'aria nelle aree urbane risultano significativamente più elevate rispetto a quelle delle zone rurali circostanti. Questo effetto viene misurato attraverso la differenza di temperatura tra il centro della città e un'area rurale di riferimento, ed è generalmente proporzionato alla dimensione della popolazione (Mohajerani et al., 2017; Oke, 1973, 1981).

I primi studi condotti dal World Meteorological Organization (WMO) e Oke (1981) rilevano che l'effetto delle isole di calore, definite anche *Urban Heat Island* (UHI), può aumentare la temperatura dell'aria in una città urbana in media tra 1° e 3°C, con incrementi fino a 10°C in condizioni di cielo sereno.

Studi più recenti, invece, individuano un intervallo in modo più accurato comprendendolo precisamente tra 5 e 15°C (Santamouris, 2013).

In generale le condizioni più favorevoli per un effetto UHI, di grandi dimensioni, si verificano quando il cielo è sereno e quando i venti sono leggeri, poiché ciò comporta un aumento del riscaldamento solare durante il giorno, riducendo la miscelazione atmosferica e la dispersione dell'aria calda. Queste condizioni spesso coincidono con le ondate di calore (Heaviside et al., 2017). Dunque il fenomeno delle UHI risulta accentuato durante le ondate di calore e siccome il cambiamento climatico globale contribuisce ad aumentare la frequenza, la durata e l'intensità degli eventi estremi, le "isole di calore" tenderanno ad accentuare ulteriormente queste temperature (Stone Jr, 2012). Di conseguenza, è molto probabile che nel prossimo decennio l'incidenza dei rischi per la salute, legati alle ondate di calore nelle aree urbane, aumenterà a scapito del benessere dei residenti, causando un incremento significativo della mortalità (Tong et al., 2021).

Alcuni studi eseguiti a Parigi e in altre città francesi, evidenziano proprio il rischio aggiuntivo che le popolazioni subiscono in queste città dove il fenomeno è più evidente a causa della maggiore estensione; ciò non toglie che il fenomeno finora descritto possa verificarsi in qualsiasi area urbanizzata (Heaviside et al., 2017; Le Tertre et al., 2006; Mitchell et al., 2016).

È risaputo che la maggior parte della ricerca sull'effetto delle isole di calore si concentra nel periodo estivo, poiché in questa stagione si verificano i principali impatti sulla salute pubblica e sul territorio urbano. Tuttavia, nonostante l'energia solare in arrivo sia minore in inverno rispetto all'estate, l'effetto UHI può rimanere significativo durante tutto l'anno (Heaviside et al., 2017). In particolare, l'effetto UHI è maggiormente evidente durante la notte, a causa della minore capacità di raffreddamento del suolo urbano.

1.1.1 Cause e conseguenze

L'effetto isola di calore insorge conseguentemente alle caratteristiche delle nostre città che tendenzialmente riducono la vegetazione e l'evapotraspirazione e aumentano la prevalenza di superfici scure con basso albedo incrementando la produzione di calore antropogenico (Stone et al., 2010). Il fenomeno è fortemente influenzato dalle caratteristiche geografiche locali, dalle condizioni climatiche e dalle variazioni stagionali specifiche di ogni area urbana. In uno studio Oke (1982) evidenzia che oltre agli aspetti ambientali sopra descritti, ci sono variabili meteorologiche particolarmente importanti come l'umidità e la piovosità; tuttavia, la velocità del vento e la copertura nuvolosa risultano essere ancora più influenti. A supporto di questa tesi, Yavuzturk et al. (2005) dimostrano che una pavimentazione estesa, in presenza di un flusso di vento ininterrotto, favorisce un maggiore trasferimento di calore all'atmosfera dalla superficie stradale, contribuendo efficacemente al raffreddamento della stessa.

Un'altra causa delle isole di calore risiede nei materiali utilizzati nelle aree urbane, che presentano caratteristiche idrauliche, radiative e termiche significativamente diverse da quelli naturali. Questa differenza comporta un'emissività di calore maggiore, soprattutto nelle ore notturne, contribuendo all'innalzamento delle temperature (Mohajerani et al., 2017). Tali materiali modificano gli scambi energetici e il flusso d'aria, creando un microclima urbano alterato. Quando questo effetto si combina con il calore antropico e l'inquinamento, l'intensificazione del fenomeno delle isole di calore diventa inevitabile (Grimmond, 2007).

La configurazione delle zone urbane presenta un certo grado di ambiguità nella ricerca sull'effetto delle isole di calore (Mohajerani et al., 2017); infatti il fenomeno considerato è

stato frequentemente associato all'espansione urbana, suggerendo che la densificazione urbana potrebbe essere una strategia di mitigazione efficace (Stone et al., 2010). Tuttavia, Debbage e Shepherd (2015) indicano che l'intensità dell'isola di calore è più fortemente correlata ad altri fattori di urbanizzazione, come la contiguità urbana, piuttosto che alla semplice densità. Di conseguenza, sia le città estese che quelle densamente popolate possono manifestare l'effetto UHI. Questo ne dimostra la variabilità degli effetti e sottolinea la necessità di ricerche localizzate e di sforzi mirati per la mitigazione.

L'effetto delle isole di calore ha conseguenze significative sulla vivibilità nelle nostre città e contribuisce a numerosi problemi ambientali nelle aree urbane (Yang et al., 2015). Le ondate di calore, ad esempio, portano a un aumento dell'uso di elettricità e acqua (Hatvani-Kovacs et al., 2016). Inoltre, Santamouris (2013) dimostra che vari studi hanno rilevato significativi aumenti delle temperature urbane, e che ciò ha comportato un raddoppio dell'uso di energia per il raffreddamento degli edifici. Oltretutto, l'effetto UHI può amplificare gli impatti sulla salute interagendo e aggravando l'inquinamento atmosferico (Xu et al., 2014), aumentando il rischio di inondazioni e riducendo la qualità dell'acqua (Hester & Bauman, 2013).

I cambiamenti legati all'urbanizzazione, inoltre, influenzeranno i cicli climatici, idrologici e biofisici dell'ambiente, con effetti negativi non solo sugli esseri umani, ma anche sugli ecosistemi naturali (Gorsevski et al., 1998), portando infine a una perdita di biodiversità. Tuttavia, l'effetto più diretto delle isole di calore sulla salute umana è l'esposizione prolungata a temperature elevate, che diventa particolarmente critica durante le ondate di calore (Heaviside et al., 2017). La letteratura concorda nel considerare le ondate di calore come un rischio significativo per la salute della popolazione; infatti, l'esposizione prolungata a temperature elevate può causare disturbi lievi, come crampi e svenimenti, ma anche gravi, come congestione, colpo di calore e disidratazione. Inoltre, secondo il Ministero della Salute Italiano, in condizioni di caldo estremo, può aggravarsi la salute di persone con patologie croniche preesistenti. In linea con queste evidenze, lo studio di Ballester et al., 2023 ha stimato che durante l'estate del 2022, si sono verificati circa 61.672 decessi in Europa attribuibili al caldo estremo. L'Italia ha riportato il numero più alto con 18.010 decessi.

L'aumento delle temperature, accompagnato dall'urbanizzazione crescente, dal cambiamento climatico e dall'invecchiamento della popolazione, comporta un rischio sempre maggiore di mortalità legata al calore nelle aree urbane. Questi fattori combinati contribuiscono a un aumento significativo di tali rischi, destinati a intensificarsi ulteriormente in futuro (Hajat et al., 2014; Li & Bou-Zeid, 2013; Patz et al., 2005).

Diversi studi hanno dimostrato che, sebbene l'aumento delle temperature possa ridurre la mortalità legata al freddo in futuro, è probabile che i benefici siano superati dall'aumento dei decessi correlati al calore, dovuto agli effetti combinati dell'incremento della temperatura media, della frequenza delle ondate di calore e all'invecchiamento e crescita della popolazione (Vardoulakis et al., 2014; Hajat et al., 2014). Poiché sono disponibili meno ricerche sui potenziali benefici per la salute dell'UHI nella prevenzione della mortalità legata al freddo durante i mesi invernali, è importante che interventi come le modifiche nella progettazione degli edifici per proteggere dagli effetti del calore non aggravino i rischi associati al freddo e viceversa (Vardoulakis et al., 2014).

Dunque, lo stress da calore è una conseguenza diretta dell'effetto delle isole di calore e il suo impatto negativo sulle infrastrutture urbane, sugli ecosistemi e sulla salute umana sottolinea l'urgenza di adottare misure di mitigazione. Pertanto, è cruciale esplorare e implementare strategie efficaci per affrontare e ridurre l'intensità dell'UHI nelle nostre città.

1.1.2 Mitigazione e adattamento

Nel contesto delle isole di calore urbane, i concetti di mitigazione e adattamento rappresentano due strategie complementari per affrontare questo fenomeno. La mitigazione comprende interventi mirati a ridurre le cause del riscaldamento urbano, limitando l'accumulo di calore. D'altro canto, l'adattamento rende le città più resilienti agli effetti delle isole di calore, agendo sulla prevenzione degli impatti, ad esempio attraverso l'implementazione di sistemi di allerta per le ondate di calore. (Feng et al., 2023).

L'azione principale e più incisiva di mitigazione consiste nel ridurre il calore antropico dovuto alla viabilità dei cittadini. Tuttavia, una delle soluzioni più efficaci per mitigare l'effetto delle isole di calore urbane è il ripristino dell'ambiente naturale, soprattutto nelle aree urbanizzate e impermeabilizzate. Questo perché tra le principali cause dell'intensificazione di questo fenomeno vi è la riduzione della vegetazione, dovuta al cambio d'uso del suolo (Akbari et al., 2001; Oke, 1982; Stone et al., 2010). A conferma di ciò, in uno studio di Takebayashi, sul bilancio termico superficiale di vari materiali per pavimentazione, ha dimostrato che la temperatura diurna dell'asfalto normale può essere fino a 20 °C più calda rispetto all'erba, evidenziando così l'importanza del verde urbano (Takebayashi & Moriyama, 2012). Infatti, le temperature superficiali e dell'aria nelle aree verdi sono inferiori rispetto a quelle del contesto urbano circostante e, anche aree verdi di dimensioni ridotte, possono generare un effetto di raffreddamento significativo, i cui benefici si estendono all'area urbana circostante (Mohajerani et al., 2017; Tan et al., 2015). Di conseguenza, la piantumazione di vegetazione nelle aree urbane non solo offre ombra a edifici e cittadini, ma contribuisce anche a raffreddare l'aria attraverso il processo di evapotraspirazione (Akbari et al., 2001). Tuttavia, per massimizzare questi effetti positivi, è fondamentale prestare attenzione alla progettazione della chioma arborea, alla scelta delle specie più adatte al contesto urbano in quanto c'è la necessità di manutenzione continua.

Una maggiore quantità di vegetazione non solo riduce il calore all'interno di una città, ma offre anche importanti co-benefici per la qualità dell'ambiente. Infatti, un aumento delle aree verdi, previene la concentrazione di smog, riduce la riflessione e l'abbagliamento delle superfici urbane, e migliora il comfort termico per i residenti, minimizzando gli impatti sulla salute correlati al calore (Gorsevski et al., 1998; Mohajerani et al., 2017).

La letteratura evidenzia l'effetto significativo e dannoso dell'urbanizzazione sull'ambiente e il benessere generale, rendendo evidente l'importanza di incrementare la presenza di vegetazione per ridurre le temperature urbane. Le modalità sono molteplici, e includono l'installazione di parchi cittadini, giardini privati, alberi stradali e tetti verdi, ciascuno dei quali offre benefici climatici ed ecologici.

Anche la progettazione dei tetti gioca un ruolo cruciale nella mitigazione del fenomeno UHI, in quanto in Italia questi rappresentano circa il 20-25% delle superfici urbane e il 60-70% dell'involucro edilizio (Costanzo et al., 2016). I tetti verdi e freddi, ovvero coperture edilizie progettate per riflettere maggiore quantità di radiazione solare e assorbire meno calore, tramite materiali ad alta riflettanza e alta emissività termica, rispetto ai tetti tradizionali, sono due strategie particolarmente efficaci per ridurre l'assorbimento della radiazione solare. In particolare, i tetti verdi non solo riducono la temperatura degli edifici, ma apportano numerosi altri benefici ambientali, come la riduzione del deflusso idrico, la aumento della biodiversità e infine l'assorbimento di CO₂ (Heaviside et al., 2017; Mohajerani et al., 2017). Sebbene i tetti freddi siano considerati una soluzione più pratica ed economica per mitigare l'UHI, i tetti verdi forniscono benefici ambientali e di salute a lungo termine, poiché creano un ambiente più naturale, efficace anche nelle altre stagioni (Phelan et al., 2015).

È fondamentale riconoscere le difficoltà associate alla conversione di ampie aree urbane in spazi verdi. Questa consapevolezza ci porta a considerare il concetto di adattamento, che implica l'adozione di strategie in grado di attenuare gli effetti del calore sulla salute senza necessitare di interventi infrastrutturali significativi. Ad esempio, nel Regno Unito, le

azioni per l'implementazione di sistemi di allerta per le ondate di calore comprendono l'adozione di linee guida specifiche destinate alla protezione dei soggetti vulnerabili e alla gestione del rischio. Tali misure prevedono l'emissione di avvisi preventivi rivolti a istituzioni sanitarie e comunitarie, la preparazione delle strutture per affrontare il rischio di colpi di calore e la distribuzione di informazioni e consigli pratici alla popolazione. Questo approccio consente di integrare interventi preventivi nelle infrastrutture già esistenti, migliorando la resilienza del sistema sanitario e delle comunità (GOV.UK, *Hot weather and health guidance*, n.d.). Tuttavia, oltre a tali misure, è fondamentale sviluppare politiche di prevenzione, le quali dovrebbero includere interventi specifici, come l'adozione di piani di emergenza, e richiedere una progettazione più efficace, guidata da una chiara comprensione degli obiettivi finali da raggiungere (Heaviside et al., 2017; Sailor et al., 2016).

Sebbene i cambiamenti comportamentali, come l'adozione di abitudini che limitano l'esposizione al calore, siano un aspetto importante dell'adattamento, nel contesto dei cambiamenti climatici risulta ancora più cruciale adottare una progettazione urbana resiliente (Feng et al., 2023). Infatti, è attraverso una pianificazione urbana strategica che si possono ottenere risultati significativi e duraturi nel ridurre la vulnerabilità delle città agli effetti del calore. In particolare, le soluzioni a base d'acqua, come le zone umide artificiali, le fontane e i sistemi di nebulizzazione, offrono un esempio efficace di progettazione urbana sensibile, raffreddando l'aria grazie al miglior trasferimento di calore convettivo (Feng et al., 2023). L'uso ottimale di queste soluzioni richiede attenzione alla permeabilità del paesaggio urbano e alla riduzione del deflusso idrico, con materiali che favoriscano l'infiltrazione e l'evaporazione, contribuendo non solo a mitigare il surriscaldamento urbano, ma anche a prevenire le inondazioni (Feng et al., 2023; Xie et al., 2019). Queste soluzioni, integrate con tecniche di raffreddamento passivo, ovvero la creazione di aree che favoriscano la ventilazione naturale, consentono di ridurre la dipendenza dall'aria condizionata, contribuendo così a minimizzare l'impatto ambientale e i rischi associati al riscaldamento antropico. Studi recenti che analizzano i rischi per la salute correlati al calore sottolineano l'importanza di affrontare anche l'ambiente interno degli edifici, non solo quello esterno (Buchin et al., 2016). Sebbene alberi, tetti verdi e pavimentazioni riflettenti apportino benefici in termini di salute, il raffreddamento passivo, ovvero una strategia che sfrutta elementi architettonici e materiali per abbassare la temperatura interna senza ricorrere a sistemi meccanici, risulta particolarmente utile per mitigare i rischi legati al calore all'interno degli edifici, soprattutto quando l'uso dell'aria condizionata è limitato da interruzioni di corrente o dall'inefficienza energetica (Hatvani-Kovacs et al., 2016).

Un esempio di strategia di successo si può osservare a Lisbona, in Portogallo, dove è stata individuata una correlazione tra la vicinanza a spazi verdi e blu urbani e una diminuzione della mortalità tra le persone anziane, anche dopo aver considerato i fattori confondenti. Inoltre, per quanto riguarda i corpi idrici, i benefici per la salute sono stati riscontrati anche a diversi chilometri di distanza (Burkart et al., 2016; Heaviside et al., 2017).

In conclusione, come evidenziato da numerosi studi scientifici, la combinazione di strategie di mitigazione e adattamento risulta essenziale per affrontare efficacemente il fenomeno delle isole di calore urbane, garantendo risultati superiori rispetto a interventi isolati. A questo proposito, gli interventi su piccola scala, distribuiti strategicamente, si rivelano più incisivi rispetto a una singola misura di ampia portata (Feng et al., 2023; Gunawardena et al., 2017; Yenneti et al., 2020). Infine, il successo delle strategie di mitigazione e adattamento è strettamente legato a un contesto urbano favorevole, caratterizzato da una pianificazione che promuova l'uso misto del suolo e contenga l'espansione urbana.

1.2 *La Citizen Science e l'utilizzo delle "Sniffer Bikes"*

La *Citizen Science*, nota anche come “scienza cooperativa” o “scienza civica”, implica la partecipazione attiva del pubblico alla ricerca scientifica, consentendo ai singoli, spesso cittadini non specializzati, di contribuire alla raccolta e all'osservazione o analisi dei dati scientifici. Questo approccio collaborativo, solitamente coordinato da scienziati o organizzazioni professionali, ha guadagnato slancio in vari campi, tra cui anche le scienze ambientali, grazie al suo potenziale di generare grandi set di dati e coinvolgere le comunità nella ricerca scientifica (Dickinson et al., 2010; Loglisci et al., 2024). Applicato al tema di questo lavoro, ovvero il monitoraggio delle isole di calore in città, questo processo si traduce nella creazione e diffusione sul mercato di dispositivi di mobile mapping in grado di rilevare la temperatura dell'aria e altre variabili meteorologiche, i cui dati vengono ottenuti, generati e messi a disposizione direttamente dai cittadini.

Nel monitoraggio ambientale, i progetti di *Citizen Science* offrono il vantaggio di una maggiore copertura spaziale, colmando le lacune delle reti di monitoraggio tradizionali e fornendo preziose informazioni sui modelli climatici locali (Conrad & Hilchey, 2011). Questo è particolarmente rilevante nel contesto delle UHI, un fenomeno che ha suscitato un interesse sempre crescente, tanto che i metodi per quantificarne l'intensità si sono evoluti nel tempo. Tradizionalmente, si utilizzavano dati provenienti da due siti di osservazione, ma la variabilità della posizione, insieme alle caratteristiche specifiche dell'ambiente locale, rende difficile il confronto tra città. Inoltre, le rilevazioni puntuali forniscono informazioni limitate sulle variazioni di temperatura all'interno di una stessa area urbana, poiché le stazioni meteorologiche sono spesso collocate al di fuori dei centri abitati per minimizzare l'influenza delle strutture urbane sulle misurazioni. Sebbene questa scelta sia utile per analisi di lungo periodo, riduce la disponibilità di dati che riflettano con precisione le condizioni termiche all'interno della città. I sensori utilizzati, pur essendo sofisticati e in grado di fornire dati precisi, risultano costosi e limitati a specifiche aree cittadine. In questo contesto, i transetti mobili effettuati in città utilizzando veicoli possono fornire maggiori informazioni spaziali (Heaviside et al., 2017). Un'alternativa efficace è rappresentata dall'uso di sensori *low-cost* applicati alle biciclette, come proposto da Blandino (2022), che consente una mappatura più dettagliata e accessibile dell'intera città. Un esempio pratico di questa tecnologia sono le sniffer bikes, che offrono una soluzione concreta alle limitazioni precedentemente citate. Si fa riferimento a dispositivi equipaggiati con sensori in grado di misurare la temperatura dell'aria, l'umidità e vari inquinanti atmosferici. I microsensori vengono assemblati in una scheda di controllo che include componenti essenziali come GPS, accelerometro, archiviazione dati, antenna per la connettività wireless, porte di comunicazione e batteria. Le piattaforme di sensori assemblati stanno aumentando rapidamente in tutto il mondo, con costi in diminuzione e una maggiore facilità d'uso, e vengono già installati su biciclette utilizzate per il monitoraggio del microclima e della qualità dell'aria nelle città. Questi dispositivi “sniffano” l'aria, rilevandone le caratteristiche durante gli spostamenti nelle strade urbane (Zanetti et al., 2023). Grazie alla loro flessibilità e alla capacità di raccogliere dati in tempo reale, le sniffer bikes possono offrire un'alternativa accessibile e sostenibile per monitorare l'intensità delle isole di calore e migliorare la nostra comprensione delle dinamiche urbane e, in ultima analisi, la fruibilità delle città. I vantaggi di questa scelta sostenibile includono *i)* la possibilità di individuare percorsi ottimali a seconda delle stagioni, a beneficio dei soggetti particolarmente sensibili, *ii)* il supporto alle amministrazioni locali e provinciali nel prendere decisioni urbanistiche in merito al contenimento delle isole di calore, favorendo la presenza di parchi e aree verdi e *iii)* assistere le organizzazioni di ricerca nella raccolta di dati (Smith & Rodriguez, 2017). Per il seguente studio è stato utilizzato il dispositivo mobile MeteoTracker®, un sensore sviluppato dalla IoTopon srl, che è in grado di campionare l'aria sulla base di una frequenza stabilita, ricavandone temperatura e umidità relativa. Può essere montato sia sulle biciclette, sia sul tettuccio delle automobili; inoltre, si attiva con il movimento e comunica i dati tramite un'applicazione mobile (Antoniciello, s.d.). A partire dal 2021, anche i ricercatori

per il progetto I-CHANGE (Citizen Actions on Climate Change and Environment) si sono serviti di tale sensore per effettuare una campagna di raccolta dati nel comune di Genova. Il progetto rappresenta un interessante esempio di sfruttamento della *Citizen Science* nella ricerca meteorologica (Loglisci et al., 2024). Il coinvolgimento diretto dei cittadini risulta essenziale, tuttavia l'uso delle osservazioni raccolte può essere messo in discussione a causa della percezione di una scarsa qualità dei dati, poiché queste informazioni provengono da fonti non ufficiali. Pertanto, è fondamentale garantire e documentare l'applicazione di metodologie solide per la verifica e la convalida dei dati (Kim, s.d.; Loglisci et al., 2024; Zanetti et al., 2023). Nonostante le potenziali fonti di errore, come la calibrazione degli strumenti, la distorsione delle misurazioni e le incongruenze nei report dei dati, i dati generati dai cittadini hanno dimostrato un'elevata qualità e affidabilità, in quando sottoposti a rigorose procedure di controllo della qualità (Downs et al., 2021; Kullenberg & Kasperowski, 2016; Loglisci et al., 2024). Nel complesso, l'analisi comparativa condotta nello studio citato evidenzia l'affidabilità e la concordanza dei dati sulla temperatura raccolti dai cittadini tramite l'utilizzo del dispositivo Meteo Tracker (MT) e dalle fonti convenzionali, come l'Osservatorio Nazionale del Clima (OWN). Questo supporta la loro intercambiabilità nelle applicazioni di monitoraggio della temperatura e sottolinea il ruolo complementare della "scienza partecipativa" nell'ampliamento delle reti di monitoraggio esistenti (Loglisci et al., 2024).

La *Citizen Science* offre benefici che vanno oltre i risultati scientifici, accrescendo la consapevolezza sui problemi locali e migliorando la salute pubblica incoraggiando ad evitare aree particolarmente inquinate e calde. Il coinvolgimento dei cittadini stimola azioni concrete per ridurre l'impronta ecologica e promuovere il risparmio energetico, sostenendo politiche ambientali e sostenibili (European *Citizen Science* Association, 2015). A livello politico, si è riscontrato che il coinvolgimento dei cittadini contribuisce a una legislazione più efficace e a una maggiore partecipazione civica, migliorando al contempo l'efficienza della spesa pubblica. Infine, vi sono benefici personali per i partecipanti, che vanno dal piacere dell'attività, all'acquisizione di nuove conoscenze, fino a un aumento dell'alfabetizzazione scientifica generale (Fraisl et al., 2022).

1.3 *Obiettivi dello studio*

L'obiettivo principale di questa tesi è quello di indagare e mappare le isole di calore urbano (UHI) a Padova. A tal fine, sono stati raccolti dati tramite dispositivi mobili *low-cost*, come MeteoTracker© e "Open Seneca", consentendo rilevazioni a livello del suolo per un periodo di tre mesi, da giugno ad agosto 2024. Poiché è stato effettuato un unico percorso, si è ottenuta una stima della temperatura per ogni giorno di rilevamento.

Questa prima fase ha permesso di cartografare le UHI nelle diverse aree urbane di Padova, indagando il rapporto tra temperatura dell'aria, tipo di copertura del suolo e presenza di vegetazione. Durante il tragitto, sono state identificate le aree verdi, permettendo un confronto successivo con altre zone del percorso effettuato. Infine, sono state messe in relazione le temperature registrate nelle diverse aree per valutare l'impatto del verde urbano.

Nella seconda parte della ricerca, si è indagato se il valore di *Land Surface Temperature* (LST), ottenuto attraverso l'elaborazione, la calibrazione e la modellizzazione delle immagini satellitari acquisite da Landsat 8 e 9, potesse essere rappresentativo anche della temperatura dell'aria. Per raggiungere questo obiettivo, si è confrontato il LST con i dati di temperatura dell'aria raccolti tramite il dispositivo MeteoTracker©.

Nel contesto delle ondate di calore, le misurazioni locali - ottenute con dispositivi come MeteoTracker© tramite l'utilizzo di sniffer bike - risultano fondamentali per identificare le aree di maggiore pericolosità, fornendo dati spaziali precisi necessari per elaborare piani d'azione volti a garantire interventi mirati a tutela dei soggetti vulnerabili.

2 Materiali e metodi

2.1 Materiali

2.1.1 Dispositivo mobile *MeteoTracker*©

Il dispositivo *MeteoTracker*©, rappresentato in Figura 1, è una mini-stazione meteorologica *low-cost*, progettata per le misurazioni in movimento, che campiona diverse variabili meteorologiche in movimento (sensore mobile). Si basa su una tecnologia brevettata RECS (patented Radiation Error Correction System) ed è associata ad un'applicazione per smartphone e ad un'infrastruttura basata su cloud (su sito web: <https://MeteoTracker.com>) che implementa una rete meteorologica mobile a livello mondiale (Antoniciello, 2021).

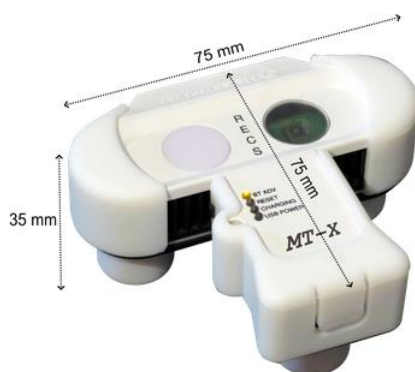


Figura 1 Stazione *MeteoTracker*©

Di seguito sono riportate le sue specifiche tecniche e le funzionalità (dal manuale dell'utente fornito assieme al prodotto):

- Versione: *MeteoTracker*© MT01.
- Componenti:
 - stazione mobile *MeteoTracker*©;
 - supporto per bicicletta;
 - cavo USB-C per la ricarica del dispositivo;
 - guaina di riserva.
- Frequenza di campionamento: la frequenza desiderata può essere impostata dalla App *MeteoTracker*©. In questo specifico caso la minima distanza tra due acquisizioni è di 12 m. Sui dispositivi iPhone non è prevista la regolazione dell'intervallo di tempo tra due acquisizioni, tuttavia sulla base della distanza sopracitata, si può affermare che l'intervallo di campionamento dovrebbe risultare intorno ai 3 secondi.
- Connettività: connessione all'applicazione per smartphone tramite bluetooth.
- Installazione: il dispositivo è dotato di una base a tre magneti per permettere l'installazione su superfici ferromagnetiche (per es. il tetto delle automobili); nella confezione è inoltre presente un supporto per assicurare il *device* mobile al manubrio della bicicletta.
- Parametri misurati: *MeteoTracker*© è in grado di rilevare temperatura, umidità relativa, pressione, temperatura di rugiada, altitudine, gradiente termico verticale e l'indicatore di intensità solare. Per il seguente studio ci si è concentrati sulla temperatura:
 - Unità di misura: °C.

- Accuratezza: +/- 0,2 °C (typ, sensori) | +/- 0,5 °C (sottoesposizione al sole a velocità > 7 km/h, patented Radiation Error Correction System RECS).
- Valori restituiti: misurazioni in tempo reale, massimi, minimi e medi della sessione.
- Range operativo: da - 40 °C a 125°C.
- Velocità di misura: 15 °C di variazione in 30 secondi a una velocità di 20 km/h.
- Visualizzazione dei dati: tramite App per iPhone (disponibile anche per Android).
 - visualizzazione in tempo reale su mappa, grafici ed in formato numerico (Figura 2);
 - visualizzazioni delle sessioni in archivio su mappa, grafici ed in formato numerico (Figura 3);
 - statistiche delle sessioni.



Figura 2 Esempio di visualizzazione dei dati in tempo reale

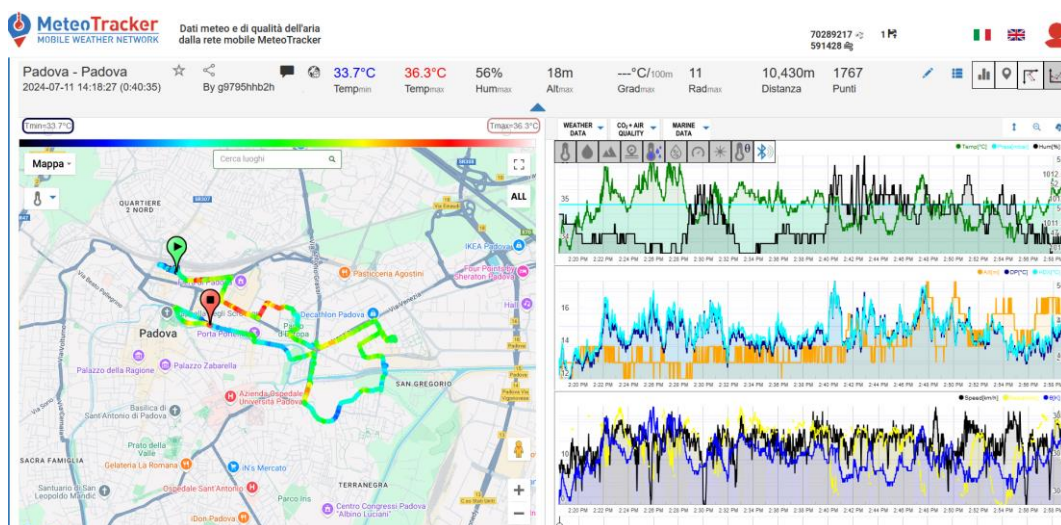


Figura 3 Esempio di visualizzazione dati delle sessioni in archivio (Dashboard)

- Esportazione dati: l'esportazione dati e l'integrazione su piattaforme terze è possibile da dashboard e da App, è possibile scaricare le misurazioni in formato CSV e APIs.
- Certificazioni:
 - CE (ID: HTT202111418) E FCC (ID:2A6AH-MT01).
 - IP grade: water-resistant

In uno studio precedente condotto da Zanetti et al. (2023), è stato effettuato un confronto tra il dispositivo MeteoTracker© e un termometro calibrato Lutron TM-947SD (Figura 4). Dallo studio è emerso che il dispositivo mobile fornisce valori di temperatura affidabili in condizioni dinamiche, con un'accuratezza di 0,1 °C. Tuttavia, non è in grado di rilevare le variazioni di temperatura quando viene spostato all'interno di un edificio in condizioni statiche.

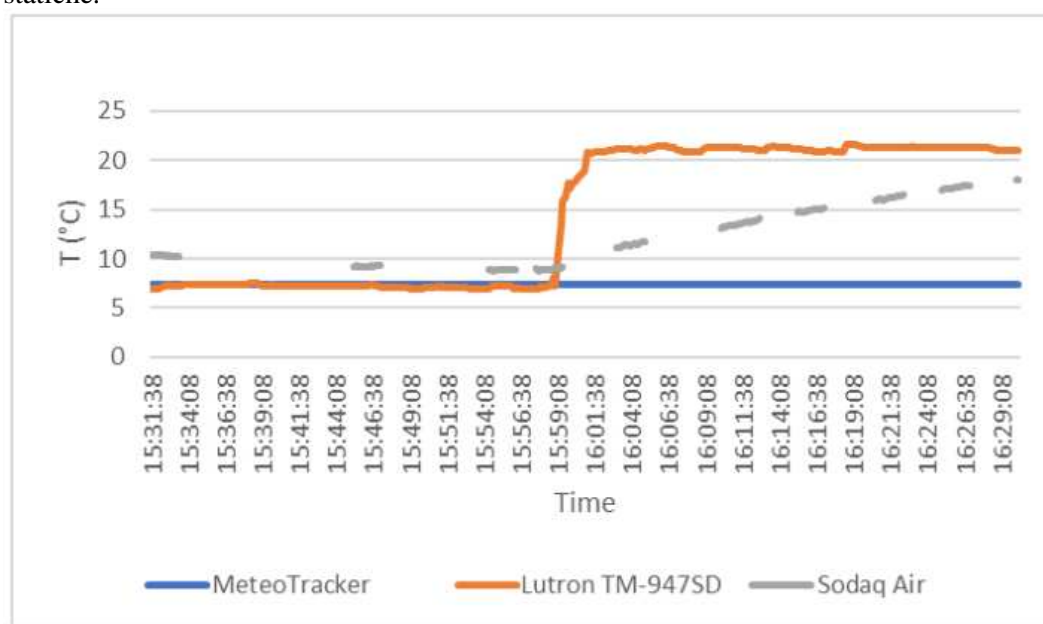


Figura 4 Temperatura dell'aria esterna e interna rilevata da Sodaq Air, MeteoTracker© e Lutron TM-947SD in modalità statica il 14 dicembre 2022 (Zanetti et al., 2023).

In conclusione, il dispositivo MeteoTracker© presenta numerosi punti di forza, tra cui la sua interfaccia intuitiva, la capacità di adattarsi a diverse esigenze e il potenziale di coinvolgere vari attori nelle attività di monitoraggio ambientale (Loglisci et al., 2024).

2.1.2 Dispositivo mobile *Open Seneca*

Il dispositivo Air Pollution Monitoring Device Open-Seneca (Figura 5), che è una mini-stazione meteorologica *low-cost*, è il frutto di un progetto svolto da alcuni studenti dell'università di Cambridge iniziato nel 2018. L'obiettivo degli studenti era quello di creare uno strumento a basso costo che consentisse alla comunità di affrontare l'inquinamento atmosferico in un contesto globale. Il loro primo *device*, il "Cambike Sensor", è stato sviluppato come un dispositivo open-hardware che doveva monitorare la qualità dell'aria e del manto stradale. I risultati del progetto iniziale sono stati molto positivi. Da allora, il progetto si è ampliato con il nome di "Open-Seneca", prendendo spunto dal primo resoconto conosciuto, del filosofo romano Seneca, sulla qualità dell'aria e mantenendo così il loro interesse per l'*open-source*.



Figura 5 Foto del device Open-Seneca (fonte: <https://www.open-seneca.org/>).

- Versione: Air Pollution Monitoring Device Open-Seneca base. Con dimensioni pari a: 82 mm x 57 mm x 34 mm.
- Componenti:
 - stazione mobile Open-Seneca.
 - supporto per bicicletta.
 - cavo USB Micro per la ricarica del dispositivo.
- Frequenza di campionamento: la frequenza non poteva essere impostata. In questo specifico caso la minima distanza tra due acquisizioni è di 25 m e il minimo intervallo tra due acquisizioni è di 1 secondo.
- Connettività: non avendo App e sensore Bluetooth, il dispositivo non doveva collegarsi al telefono ma era indipendente.
- Installazione: il dispositivo è dotato di un supporto per assicurare il *device* mobile al manubrio della bicicletta.
- Parametri misurati: Open-Seneca è in grado di rilevare temperatura, umidità relativa e Particolato atmosferico (PM2.5 e PM10). Per il seguente studio, ci si è concentrati sulla temperatura, espressa in gradi Celsius (°C). Tuttavia, non sono fornite informazioni specifiche riguardanti l'accuratezza, il range operativo e la velocità di misurazione sul sito consultato.
- Visualizzazione dei dati: il dispositivo utilizza una scheda memoria micro-SD per salvare i dati dal momento dell'accensione.
- Esportazione dati: l'integrazione su piattaforme terze è possibile mediante l'utilizzo di una chiavetta in grado di leggere la sua scheda micro-SD; i dati relativi alle misurazioni vengono visualizzati nel computer in formato CSV.



Figura 6 Esempio di installazione su bicicletta dei device MeteoTracker© e Open-Seneca.

2.1.3 Dati satellitari: Landsat 8 e 9

Per sviluppare le analisi comparative tra i dati rilevati dal dispositivo MeteoTracker®, il parametro LST e l'indice di vegetazione NDVI sono state elaborate le immagini satellitari acquisite da Landsat 8 e Landsat 9. In particolare, sono stati acquisiti i dataset, relativi a più giorni di rilevazione nell'estate del 2024, dal sito ufficiale di USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov>).

Il programma Landsat rappresenta una delle missioni più longeve per il monitoraggio della Terra dallo spazio, nato dalla collaborazione tra NASA e l'U.S. Geological Survey (USGS). La NASA è responsabile delle fasi di progettazione, costruzione, lancio e calibrazione in orbita dei satelliti. L'USGS, invece, si occupa della calibrazione post-lancio, della gestione operativa dei satelliti, della produzione dei dati e della loro archiviazione presso il centro EROS (Earth Resources Observation and Science).

I satelliti Landsat 8 e Landsat 9, lanciati rispettivamente nel 2013 e nel 2021 dalla base aeronautica di Vandenberg in California, sono i più recenti della serie e continuano a raccogliere dati preziosi per la gestione ambientale e climatica, la mappatura delle risorse naturali e il monitoraggio delle temperature superficiali. Il ruolo fondamentale di questo programma è quello di assicurare un monitoraggio delle variazioni nella copertura e nell'uso del suolo a livello globale, cambiamenti che hanno un impatto significativo sul clima, sulle condizioni meteorologiche e sulle funzioni e i servizi degli ecosistemi.

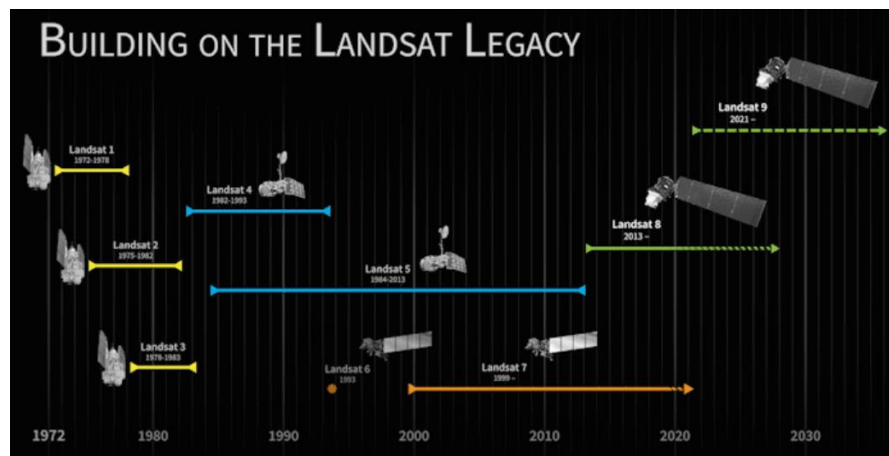


Figura 7 Timeline del programma Landsat, a partire dal lancio di Landsat 1 fino a Landsat 9, evidenziando la continuità delle missioni di monitoraggio della Terra.

Landsat 8 è stato progettato per continuare la tradizione di acquisizione di immagini multispettrali iniziata con i primi satelliti Landsat. Esso è dotato di due sensori principali: l'Operational Land Imager (OLI) e il Thermal Infrared Sensor (TIRS). Questi due sensori forniscono una copertura stagionale della massa continentale globale con una risoluzione spaziale di 30 metri (visibile, NIR, SWIR), 100 metri (termico), e 15 metri (pancromatico). Nello specifico il sensore OLI cattura immagini multispettrali in nove bande diverse (Figura 8), incluse le bande dedicate al monitoraggio della vegetazione, dell'acqua e delle superfici artificiali. Invece il TIRS di Landsat 8 fornisce dati sulle radiazioni infrarosse termiche in due bande, che permettono di calcolare le temperature della superficie terrestre. Quest'ultimo tipo di informazione è particolarmente utile per gli studi sul riscaldamento urbano e sulle aree ad alto rischio di stress termico. Ai fini di questo studio sono state considerate le bande 4 (Red), 5 (NIR) e 10 (TIR-1).

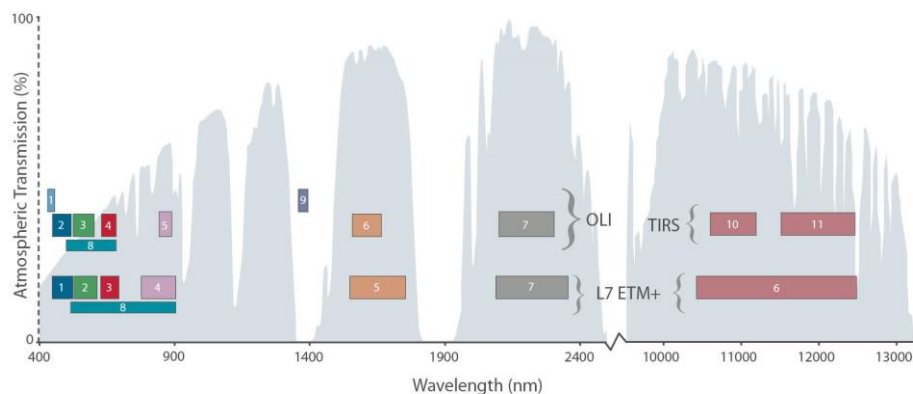


Figura 8 Bande di acquisizione del Landsat 8 tramite i sensori OLI e TIRS
(<https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/>)

Landsat 9, lanciato nel 2021, è un'evoluzione del suo predecessore, progettato per garantire la continuità dei dati e per migliorare la qualità delle osservazioni. Landsat 9 è dotato degli stessi due sensori principali: OLI-2 e TIRS-2, che mantengono le stesse capacità di raccolta dati, con una dimensione della scena che copre 185 km per 180 km, ma con miglioramenti tecnici significativi. OLI-2 opera sulle stesse nove bande multispettrali, ma è stato ottimizzato per garantire una maggiore precisione nell'acquisizione dei dati visibili e infrarossi. La novità principale di Landsat 9 risiede nel TIRS-2, che riduce notevolmente il problema della luce diffusa, che causava errori nelle misurazioni della temperatura della superficie terrestre. Ai fini di questo studio sono state considerate le bande 4 (Red), 5 (NIR) e 10 (TIR-2). Pur essendo strumenti molto simili, sono presenti alcune differenze tra Landsat 8 e 9:

- **Calibrazione migliorata:** Landsat 9 presenta una migliore calibrazione del sensore termico TIRS-2 rispetto a Landsat 8, il che permette di ottenere dati più precisi.
- **Efficienza operativa:** Landsat 8 è progettato per acquisire regolarmente 725 scene al giorno, mentre Landsat 9 ha aumentato questa capacità, consentendo la raccolta di oltre 1.400 scene al giorno. Questo incremento permette una maggiore frequenza di osservazioni e una copertura più ampia, riducendo il tempo necessario per rivisitare aree di interesse, che avviene ogni otto giorni.

In questo lavoro si è deciso di utilizzare entrambi i satelliti Landsat 8 e 9 per sfruttare al meglio la copertura temporale dei dati. Grazie all'integrazione dei dati tra i due satelliti, è possibile ottenere una frequenza di osservazione ogni otto giorni, poiché Landsat 9 ha sostituito Landsat 7 mantenendo lo stesso ciclo di rivisita, sfalsato rispetto a Landsat 8. Questo intervallo regolare di otto giorni è essenziale per analisi a lungo termine e per monitorare fenomeni come le isole di calore urbano e il riscaldamento superficiale, migliorando la precisione e la continuità delle osservazioni.

2.1.4 Land Surface Temperature e Normalized Difference Vegetation Index

Il parametro LST è una stima della temperatura superficiale della terra: esso è fondamentale nella comprensione dei fenomeni di scambio energetico che avvengono all'interfaccia tra la superficie terrestre e l'atmosfera sovrastante. Per determinare questa grandezza sono necessari opportuni sensori sensibili alla radiazione termica infrarossa in grado di eseguire misure di radianza correlabili alla LST tramite l'equazione di trasferimento radiativo (RTE) (Pastore et al., 2014).

I dati della LST sono stati acquisiti dai satelliti Landsat 8 e 9 nei giorni di rilevamento. Contestualmente, sono state condotte sessioni di rilevamento con sniffer bike in

coincidenza con il passaggio mattutino (intorno alle ore 12:00 UTC) dei satelliti, al fine di confrontare i dati raccolti con quelli acquisiti tramite MeteoTracker©.

Il Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) è un indice di vegetazione che descrive il livello di vigoria di una coltura e si calcola come il rapporto tra la differenza e la somma delle radiazioni riflesse nel vicino infrarosso e nel rosso (Antognelli, 2018).

Valuta la presenza di attività fotosintetica, in quanto mette in relazione lo spettro del rosso, in cui c'è assorbimento da parte della clorofilla, e quello del vicino infrarosso in cui le foglie riflettono la luce per evitare il surriscaldamento. I valori dell'indice sono compresi tra -1 e +1 e calcolati, nel seguente studio, a partire dalle bande 4 e 5 di Landsat 8 e 9. In generale i valori variano tra 0 e 1 e a ciascun valore corrisponde una diversa situazione agronomica, come è possibile osservare in Tabella 1. Infatti, la presenza di vegetazione assume valori maggiori di 0.2.

Tabella 1 Interpretazione indice NDVI (Antognelli, 2018).

NDVI	INTERPRETAZIONE
< 0,1	Suolo nudo o nuvole
0,1 - 0,2	Copertura vegetale quasi assente
0,2 - 0,3	Copertura vegetale molto bassa
0,3 - 0,4	Copertura vegetale bassa con vigoria bassa o copertura vegetale molto bassa con vigoria alta
0,4 - 0,5	Copertura vegetale medio-bassa con vigoria bassa o copertura vegetale molto bassa con vigoria alta
0,5 - 0,6	Copertura vegetale media con vigoria bassa o copertura vegetale medio-bassa con vigoria alta
0,6 - 0,7	Copertura vegetale medio-alta con vigoria bassa o copertura vegetale media con vigoria alta
0,7 - 0,8	Copertura vegetale alta con vigoria alta
0,8 - 0,9	Copertura vegetale molto alta con vigoria molto alta
0,9 - 1,0	Copertura vegetale totale con vigoria molto alta

2.1.5 Carta di copertura del suolo

Con il termine copertura del suolo la direttiva 2007/2/CE definisce la copertura fisica e biologica della superficie terrestre, comprese le superfici artificiali, le zone agricole, i boschi e le foreste, le aree seminaturali, le zone umide e i corpi idrici. L'identificazione delle diverse classi di copertura del suolo è effettuata attraverso la classificazione del progetto Corine Land Cover (CLC), nato a livello europeo per il rilevamento e il monitoraggio delle caratteristiche di copertura e uso del territorio, con particolare attenzione alle esigenze di tutela ambientale.

Per il confronto tra la temperatura dell'aria e l'uso del suolo è stata utilizzata la "Carta di copertura del suolo" di Padova, disponibile nella versione più recente relativa al 2020, acquisita dal Geoportale della Regione Veneto. In particolare, è stato utilizzato il primo livello di classificazione, che suddivide il territorio in cinque tipologie: superfici artificiali, superfici agricole utilizzate, territori boscati e ambienti semi-naturali, zone umide e corpo idrico (Isprambiente, Legenda del CORINE Land Cover 2000, 2020). Per una più chiara

visualizzazione si è però preferito riclassificare in valori binari le diverse tipologie di uso del suolo: il suolo impermeabile, composto dalle superfici artificiali, e il suolo permeabile, composto dalle restanti aree.

2.1.6 Software per l'elaborazione dei dati

Per l'analisi dei dati spaziali e per la rappresentazione cartografica dei risultati è stato utilizzato il software per l'analisi geografica QGIS 3.36.3 "Merton". mentre per l'elaborazione dei modelli statistici è stato utilizzato il software Microsoft Excel©. Per il calcolo e la rappresentazione cartografica delle distanze tra due punti è stato utilizzato il software Google Earth Pro©.

2.1.7 Erbario e Flora d'Italia

Un erbario è una collezione di piante vascolari essiccate, pressate e fissate su fogli di carta, corredate di informazioni scientifiche. Questa pratica di conservazione permette di preservare esemplari vegetali a fini di ricerca, garantendo una risorsa preziosa per lo studio della biodiversità e dell'evoluzione delle piante. Gli erbari documentano anche le esplorazioni scientifiche e la storia delle tecniche di conservazione, testimoniando lo sviluppo delle conoscenze botaniche nei secoli. Oltre alla loro valenza storica, gli erbari sono rilevanti per la tassonomia, facilitando l'identificazione accurata delle specie e la corretta applicazione della nomenclatura scientifica attraverso il confronto diretto con campioni di riferimento (Clementi, 2014; Donaldson, 2009).

Per creare l'erbario si è fatto riferimento alle tecniche illustrate sia nella guida per professionisti *Herbarium Handbook* del 1989, sia nel manuale più accessibile agli studenti, "Guida pratica all'erbario di studio" di Moreno Clementi. Sebbene gli erbari siano solitamente composti da specie spontanee, in questo studio sono state raccolte piante inserite artificialmente in un contesto urbano. Questa scelta amplia l'utilità dell'erbario alla documentazione delle specie impiegate in progetti urbanistici sostenibili e al monitoraggio della flora urbana in aree antropizzate. La Flora d'Italia, scritta da Sandro Pignatti, è un'opera botanica di riferimento che descrive in dettaglio le piante vascolari finora individuate entro i confini italiani (Pignatti, 2017). Composta da quattro volumi, la nuova edizione pubblicata nel 2017 è disponibile in formato cartaceo e digitale, offrendo agli studiosi e agli appassionati un repertorio completo e aggiornato per l'identificazione e la classificazione delle specie vegetali italiane. Quest'opera comprende oltre 7.600 specie, descritte con dati morfologici, ecologici e fitosociologici, evidenziando la dipendenza delle piante dalle condizioni ambientali.

Strutturata con precisione metodologica e supportata da chiavi dicotomiche e un'estesa iconografia, Flora d'Italia permette di identificare le specie con affidabilità scientifica, coprendo un vasto spettro di piante spontanee italiane. Ogni specie è classificata tramite il sistema binomiale introdotto da Linneo in *Species Plantarum* nel 1753, organizzando le piante in base a caratteristiche floreali. Negli anni, i sistemi di classificazione sono stati affinati, e Flora d'Italia utilizza una classificazione filogenetica che riflette le relazioni filogenetiche tra le specie, evidenziando le loro connessioni evolutive. Questo approccio consente non solo di organizzare le piante secondo somiglianze strutturali, ma anche di rappresentare le relazioni genetiche che le legano (Pignatti, 2017).

Grazie alla sua accuratezza scientifica e al rigoroso approccio sistematico, Flora d'Italia è diventata uno strumento indispensabile per i botanici italiani, rilevante tanto nella ricerca accademica quanto nella pratica sul campo. Per la presente tesi, questo testo è stato particolarmente utile nell'identificazione delle piante di Piazza Savelli, consentendo un'analisi approfondita della flora locale e contribuendo significativamente alla valutazione della biodiversità dell'area esaminata.

2.2 Metodi

In questo paragrafo verranno illustrate e discusse le modalità di elaborazione e analisi dei dati ottenuti attraverso rilevazioni mobili a terra, effettuate tramite sessioni di misurazioni con sniffer bike e dispositivi per il mobile mapping. Inoltre, viene descritto il lavoro di catalogazione delle piante mediante la creazione di un erbario.

2.2.1 Inquadramento geografico del percorso di studio

Per l'acquisizione dei dati è stato scelto un unico areale di studio definito a partire da un percorso specifico, al fine di garantire l'omogeneità dei dati georeferenziati raccolti sia a livello del suolo sia tramite i satelliti Landsat. Questo approccio ha consentito di confrontare in modo efficace i due set di dati, mantenendo la coerenza spaziale e permettendo un'analisi approfondita all'interno dello stesso areale.

I rilievi sono stati effettuati principalmente tra le 12:00 e le 16:00 per garantire la coerenza temporale dei dati. Inoltre, nei giorni di passaggio dei satelliti Landsat 8 e 9, le misurazioni tramite mobile mapping sono state anticipate alle ore 12:00 (ora del passaggio del satellite) per assicurare una maggiore omogeneità tra i set di dati.

Il percorso, misurato mediante l'uso di Google Earth Pro, risulta essere lungo circa 10 km ed inizia dalla stazione e prosegue verso la zona Fiera. Dopo aver attraversato Parco Europa, il tragitto si collega a Via Venezia, che si estende dal Piazzale della Stanga fino al negozio Decathlon, e risulta essere una delle aree più trafficate di Padova insieme alla zona industriale e commerciale nei pressi della Fiera di Padova. Il tragitto continua verso Piazza Savelli, raggiungendo il canale Piovego, dove si segue una pista ciclabile che costeggia il fiume e attraversa varie aree verdi. Il percorso termina nella zona dei Navigli, per poi concludersi definitivamente presso il Parco Tito Livio, integrando così aree di intenso traffico con spazi verdi e semi-naturali. Questa scelta permette di attraversare diverse tipologie di uso del suolo, consentendo un confronto più dettagliato. Un'analisi approfondita della copertura del suolo è trattata nel capitolo dedicato. La durata del percorso è di circa 43 minuti, visibile in Figura 10 (in blu), alla velocità media di 14 km/h secondo il dispositivo MeteoTracker©.



Figura 9 Percorso di studio: mobile mapping delle temperature

2.2.2 Mobile Mapping

Per le rilevazioni “dal basso” sono stati agganciati al manubrio della bicicletta i dispositivi per il mobile mapping. Il primo strumento è il MeteoTracker© ed è il dispositivo su cui faremo affidamento per questa tesi, il secondo è lo strumento sperimentale Air Pollution Monitoring Device Open-Seneca.

Di seguito sono riportate le specifiche adottate per condurre gli studi e le caratteristiche del percorso:

Tabella 2 Specifiche adottate per condurre gli studi e caratteristiche dei percorsi.

	Percorso MeteoTracker	Percorso Open-Seneca	Match Landsat e MeteoTracker
Periodo di campionamento	27/05/2024 - 02/09/2024	27/05/2024 - 02/09/2024	29/05/2024 - 06/06/2024 - 22/06/2024 - 08/07/2024 - 16/07/2024 - 09/08/2024 - 02/09/2024
Orario di campionamento	12:30 - 16:30	12:30 - 16:30	11:30 - 12:30
Rilevazioni effettuate	34	32	7
Mezzo utilizzato	Bicicletta	Bicicletta	Bicicletta
Durata media del percorso [min]	43	41	46
Km percorsi [Km]	340	320	70
Velocità media [Km/h]	14,3	14,7	13,4
Temperatura minima media [°C]	23	27,7	23
Temperatura massima media [°C]	35	42,1	32,3
Temperatura media estiva [°C]	31	36,5	28,8
Deviazione standard media [°C]	0,45	1,20	0,39

2.2.3 Elaborazione ed analisi dei dati

In questa sezione vengono riportate la descrizione e le procedure per la realizzazione delle varie analisi dei dati raccolti e le rispettive rappresentazioni. La tesi si propone di indagare la relazione tra il parametro LST e la temperatura registrata da MeteoTracker©. Inoltre, si è voluto esaminare il fenomeno delle UHI in relazione al consumo di suolo e all'indice di vegetazione NDVI, utilizzando le metodologie della GIScience di seguito descritte.

2.2.3.1 Stima delle caratteristiche dei percorsi

Per quanto riguarda l'analisi delle temperature ci si è ricavato la temperatura media per ogni giorno di rilevazione, con l'apposita formula su Excel (“MEDIA”); si è misurata la temperatura massima e minima giornaliera e poi si è svolta una media di queste, al fine di ottenere la temperatura minima e massima media estiva. Inoltre, è stata calcolata la

deviazione standard della temperatura per ogni percorso grazie alla funzione Excel “DEV.ST” e anche la deviazione standard media (sommando le varie deviazioni standard).

Invece, per il calcolo della durata media è stato usato un foglio di calcolo Excel in cui sono stati inseriti in una tabella la velocità media di percorrenza per ogni rilevamento, espressa in km/h, ovvero valori che sono stati ricavati dall’applicazione per smartphone e visibili nella dashboard di MeteoTracker©, e i chilometri percorsi [km], misurati grazie al programma Google Earth Pro. Successivamente è stata utilizzata la seguente equazione per stimare la durata dei percorsi durante ogni campionamento:

$$Durata [s] = \frac{\text{chilometri percorsi [km]}}{\text{velocità media } \left[\frac{\text{km}}{\text{h}} \right]} * 3600 [s/h]$$

In ciascuna tabella seguente (Tabella 3,4,5), la giornata con la temperatura media più elevata è evidenziata in arancione, mentre quella con la temperatura media più bassa è indicata in blu.

Tabella 3 Caratteristiche dei singoli rilevamenti con MeteoTracker

DATA	Tmedia [°C]	Tmax [°C]	Tmin [°C]	DEV.ST	Velocità [Km/h]	Durata [s]	Durata [min]
27/05/2024	26,6	28,4	25,8	0,49	14	2571	43
29/05/2024	24,1	25,6	22,9	0,54	15	2400	40
04/06/2024	25,2	27,9	24,1	0,76	14	2571	43
06/06/2024	26,8	27,8	25,6	0,36	13	2769	46
14/06/2024	23,0	23,8	22,0	0,35	14	2571	43
18/06/2024	30,0	31,3	28,9	0,47	15	2400	40
19/06/2024	30,9	32,5	29,8	0,47	17	2118	35
20/06/2024	29,8	30,3	29,0	0,26	17	2118	35
21/06/2024	29,3	30,5	27,9	0,67	14	2571	43
22/06/2024	28,2	29,3	26,9	0,41	15	2400	40
28/06/2024	30,4	31,9	29,2	0,59	12	3000	50
29/06/2024	31,7	32,7	30,3	0,51	14	2571	43
08/07/2024	29,7	30,7	28,6	0,41	14	2571	43
09/07/2024	32,8	34,1	31,8	0,42	15	2400	40
10/07/2024	34,2	36,2	32,2	0,95	14	2571	43
11/07/2024	35,0	36,3	33,7	0,4	13	2769	46
13/07/2024	32,5	33,7	31,4	0,44	15	2400	40
14/07/2024	32,7	33,8	31,6	0,41	14	2571	43
15/07/2024	33,6	34,8	32,7	0,45	14	2571	43
16/07/2024	32,3	33,6	31,4	0,37	13	2769	46
24/07/2024	31,2	32,1	30,3	0,39	13	2769	46
30/07/2024	31,2	32,2	30,0	0,39	14	2571	43
31/07/2024	33,8	34,9	32,8	0,33	13	2769	46
02/08/2024	31,3	32,9	29,9	0,48	13	2769	46
09/08/2024	31,4	32,6	30,2	0,45	9	4000	67
17/08/2024	30,3	31,1	29,5	0,33	14	2571	43
26/08/2024	32,7	34,1	31,5	0,44	16	2250	38
27/08/2024	32,3	33,2	31,2	0,43	17	2118	35
28/08/2024	32,3	33,5	31,2	0,52	15	2400	40
29/08/2024	34,8	35,6	33,7	0,35	15	2400	40
30/08/2024	34,7	35,4	33,9	0,32	17	2118	35
31/08/2024	34,8	35,7	33,8	0,39	16	2250	38
01/09/2024	33,8	34,9	32,9	0,38	14	2571	43
02/09/2024	31,1	32,1	30,2	0,30	14	2571	43
MEDIA	31,0	32,2	29,9	0,4	14,3	2553	43

Tabella 4 Caratteristiche dei singoli rilevamenti con Open-Seneca

DATA	Tmedia [°C]	Tmax [°C]	Tmin [°C]	DEV.ST	Velocità [Km/h]	Durata [s]	Durata [min]
27/05/2024	30,2	31,7	28,8	0,50	15,3	2360	39
29/05/2024	28,6	30,1	26,5	0,6	14,2	2529	42
04/06/2024	29,8	31,2	28,9	0,5	14,7	2453	41
06/06/2024	32,9	34,2	30,7	0,7	12,9	2799	47
14/06/2024	27,7	28,6	25,6	0,6	14,0	2576	43
18/06/2024	36,1	37,4	32,4	0,8	15,0	2403	40
19/06/2024	37,0	37,7	34,7	0,5	17,9	2012	34
20/06/2024	34,1	35,3	30,8	1,0	16,5	2187	36
22/06/2024	35,7	37	32,1	1,0	15,9	2266	38
28/06/2024	36,0	38,4	32,3	1,4	12,9	2788	46
29/06/2024	36,2	37,3	32,4	0,9	14,9	2419	40
09/07/2024	38,8	40,1	33,8	1,2	15,7	2297	38
10/07/2024	39,9	42,5	37,3	1,2	15,5	2323	39
11/07/2024	42,1	43,9	34,3	1,9	14,3	2517	42
13/07/2024	39,0	41,0	32,9	1,6	15,3	2358	39
14/07/2024	27,7	41,1	36,2	1,0	14,5	2486	41
15/07/2024	40,6	42,4	33,2	1,8	14,0	2571	43
16/07/2024	40,0	41,2	34,9	1,3	14,4	2498	42
24/07/2024	38,7	40,9	32,0	1,8	14,3	2521	42
30/07/2024	37,4	40,0	32,5	1,8	14,7	2455	41
31/07/2024	40,6	42,4	33,5	1,7	13,3	2702	45
02/08/2024	38,3	39,6	32,3	1,4	13,0	2761	46
09/08/2024	39,0	41,2	31,6	2,2	9,1	3972	66
17/08/2024	35,6	36,7	31,9	1,0	14,0	2565	43
26/08/2024	38,7	42,0	33,8	1,8	16,7	2150	36
27/08/2024	38,3	38,1	30,5	1,3	15,9	2265	38
28/08/2024	37,1	38,4	31,3	1,6	15,3	2357	39
29/08/2024	39,2	40,8	32,5	1,8	15,6	2305	38
30/08/2024	39,1	40,3	33,3	1,4	16,9	2130	36
31/08/2024	36,4	37,7	33,2	0,8	16,8	2146	36
01/09/2024	40,1	41,0	37,8	0,7	14,3	2524	42
02/09/2024	37,9	39,2	34,6	0,9	14,3	2513	42
MEDIA	36,5	38,4	32,5	1,2	14,7	2475	41

Tabella 5 Caratteristiche dei singoli rilevamenti con MeteTracker durante il match con il Landsat

DATA	Tmedia [°C]	Tmax [°C]	Tmin [°C]	DEV.ST	Velocità [Km/h]	Durata [s]	Durata [min]
29/05/2024	24,1	25,6	22,9	0,54	15	2400	40
06/06/2024	26,8	27,8	25,6	0,36	13	2769	46
14/06/2024	23,0	23,8	22,0	0,35	14	2571	43
22/06/2024	28,2	29,3	26,9	0,41	15	2400	40
08/07/2024	29,7	30,7	28,6	0,41	14	2571	43
16/07/2024	32,3	33,6	31,4	0,37	13	2769	46
24/07/2024	31,2	32,1	30,3	0,39	13	2769	46
09/08/2024	31,4	32,6	30,2	0,45	9	4000	67
17/08/2024	30,3	31,1	29,5	0,33	14	2571	43
02/09/2024	31,1	32,1	30,2	0,30	14	2571	43
MEDIA	28,8	29,9	27,8	0,39	13,4	2739	46

2.2.3.2 Il modello Ordinary Least Square

Ordinary Least Square (OLS) è un metodo impiegato nell'ambito della statistica per calcolare stime dei coefficienti di regressione all'interno di un modello di regressione lineare. Questo metodo è utilizzato per analizzare la relazione tra una variabile dipendente (variabile risposta) ed una o più variabili indipendenti (variabili predittive). In questo modo, il modello OLS è in grado di determinare la retta che minimizza la somma dei quadrati dei residui, ovvero la differenza tra i valori osservati e quelli previsti dal modello. In

particolare, per questo studio, è interessante osservare il risultato ottenuto in merito ad “R al quadrato”. Il coefficiente di determinazione R quadro è un valore statistico che permette di capire se un modello di regressione lineare può essere utilizzato al fine di compiere delle previsioni, esso valuta quanto le singole osservazioni si discostano dalla retta di regressione e, in generale, ad un coefficiente di determinazione maggiore corrisponde una minore discrepanza tra i valori osservati e quelli attesi (Pozzolo, 2020).

2.2.3.3 Processo di implementazione dati in QGIS

Nel seguente paragrafo, l'obiettivo è fornire un riassunto dei procedimenti coinvolti nell'analisi della relazione tra la temperatura rilevata tramite il dispositivo MeteoTracker© e i dati contenuti nella Carta di Consumo del Suolo e l'indice NDVI di vigore vegetativo. Di seguito vengono riassunti i passaggi del flusso di lavoro identificato alle Figure 10,11,12 e 13:

Andamento temperature e confronto tra i dispositivi Meteotracker e Open Seneca:

- 1 Caricamento su QGIS delle misurazioni MeteoTracker© e Open Seneca in formato CSV, la Carta di Copertura del Suolo (Corine Land Cover) del comune di Padova
- 2 Rappresentazione dei punti contenenti le temperature rilevate dai dispositivi MeteoTracker© e Open Seneca.
- 3 Per una più chiara visualizzazione del cambio di temperatura nel singolo percorso si è scelto di cambiare la simbologia della raffigurazione passando da una configurazione a “simbolo singolo” ad una graduata: la condizione termica rilevata in ogni punto del tragitto è stata quindi classificata in 10 categorie aventi range di valori della stessa ampiezza, ad ogni categoria corrisponde un colore differente che parte dal blu, per le temperature minori, fino ad arrivare al rosso passando per il bianco.
- 4 Tramite funzione “fondi vettori”, individuata tra gli strumenti di Processing di QGIS, si ottiene un unico shapefile comprendente tutti i punti di ogni rilevazione eseguita con il dispositivo Meteotracker. Si ripete il procedimento per il dispositivo Open Seneca.
- 5 Creazione di un reticolo, esteso all’area di studio, composto da esagoni aventi spaziatura orizzontale e verticale di 20 m.
- 6 Calcolo della temperatura media, utilizzando i dati MeteoTracker ricavati al punto 4, per ogni esagono appartenente al reticolo creato al punto 5, utilizzando la funzione “unisci attributi per posizione” individuata alla voce “statistiche di sintesi” tra gli strumenti di Processing di QGIS. Da quest’ultimo esito sono stati eliminati i valori nulli e gli esagoni con meno di 10 punti. Si ripete il procedimento per il dispositivo Open Seneca.
- 7 Per una più chiara visualizzazione del cambio di temperatura estiva media per ogni singolo esagono, si è scelto di cambiare la simbologia della raffigurazione passando da una configurazione a “simbolo singolo” ad una graduata: la condizione termica rilevata in ogni punto del tragitto è stata quindi classificata in 5 categorie aventi range di valori della stessa ampiezza, ad ogni categoria corrisponde un colore differente che parte dal blu, per le temperature minori, fino ad arrivare al rosso passando per il bianco.
- 8 Creazione di un grafico Box Plot a partire dalla media spaziale ricavata al punto 6, avente la temperatura dell’aria sull’asse delle ordinate e la distinzione dei dati ricavanti con Open Seneca e MeteoTracker sull’asse delle ascisse, tramite l’utilizzo del software Microsoft Excel.
- 9 Utilizzo della funzione “unisci attributi per posizione” per ottenere un’unione tra la temperatura dell’aria media per ogni esagono dei dati di MeteoTracker e Open-Seneca e l’uso del suolo prendendo in considerazione il file prodotto al punto 6 e lo shapefile prodotto a partire dal dataset CLC. In questo modo è stato associato ad ogni esagono della rilevazione il corrispondente uso del suolo.

- 10 Creazione di un grafico Box Plot a partire dalle unioni ricavate al punto 9, avente la temperatura dell'aria sull'asse delle ordinate e la distinzione dei dati ricavanti con Open Seneca e MeteoTracker in base alla classificazione dell'uso del suolo sull'asse delle ascisse, tramite l'utilizzo del software Microsoft Excel.
- 11 A partire dai dati ricavati al punto 2, si è scelto di considerare la singola giornata di rilevamento del 27 agosto 2024. I dati di entrambi i dispositivi sono stati raggruppati per intervalli di tempo di 20 secondi, e per ciascun intervallo è stata calcolata la temperatura media utilizzando Excel.
- 12 Calcolo della differenza di temperatura, utilizzando i dati del punto 12 e tramite Excel, tra le temperature medie per ogni intervallo di Open Seneca e MeteoTracker.
- 13 Creazione di un grafico a linee, in cui l'asse X rappresenta gli intervalli di tempo di 20 secondi, mentre l'asse Y mostra la temperatura media calcolata per ciascun intervallo dei due dispositivi, ricavata nel punto 13.
- 14 Creazione di un grafico a linee, in cui l'asse X rappresenta gli intervalli di tempo di 20 secondi, mentre l'asse Y mostra la differenza di temperatura calcolata per ciascun intervallo dei due dispositivi, ricavata nel punto 13.

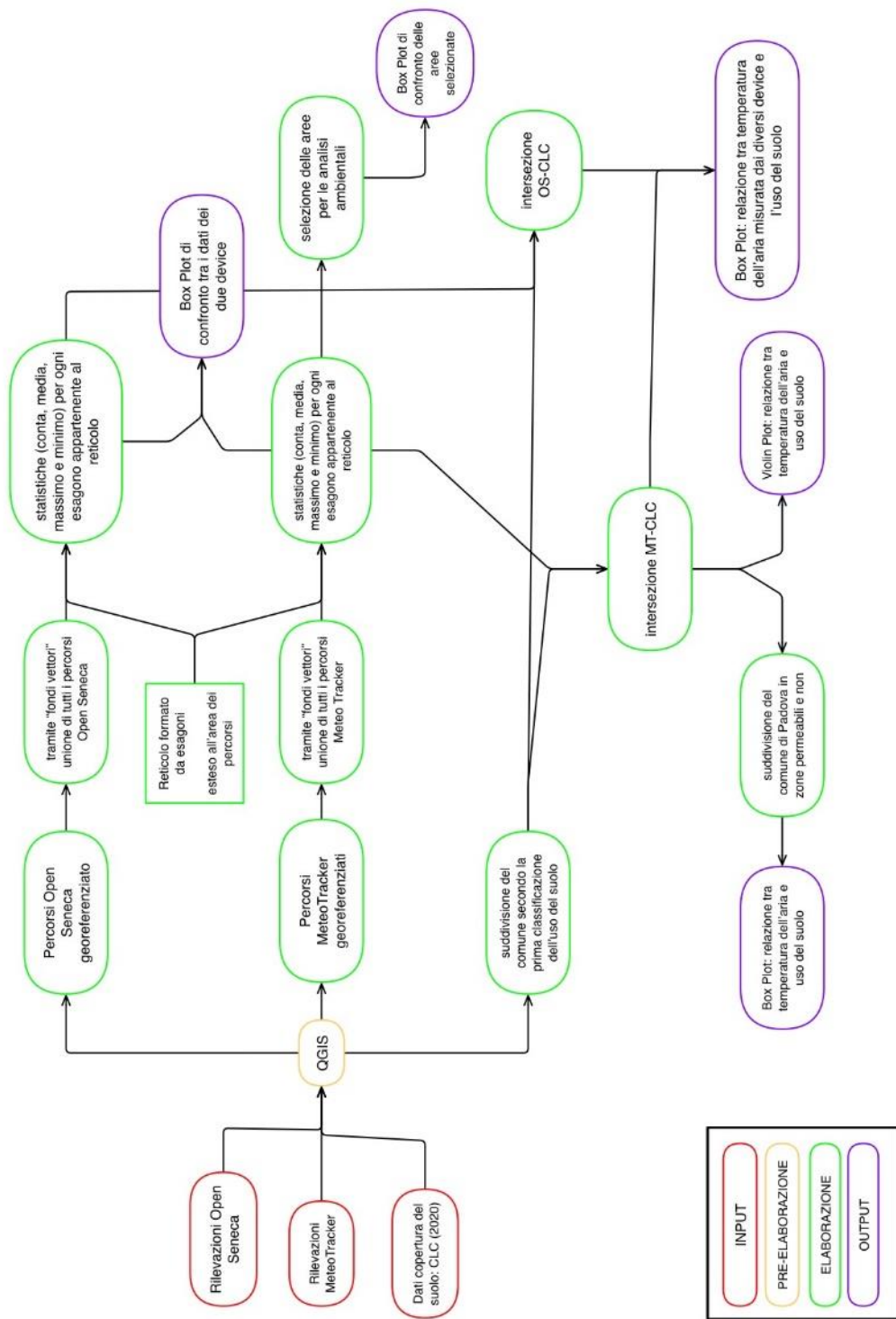


Figura 10 Diagramma di flusso per l'elaborazione e il confronto dei dati di MeteoTracker e Open Seneca e la loro relazione con la copertura del suolo.

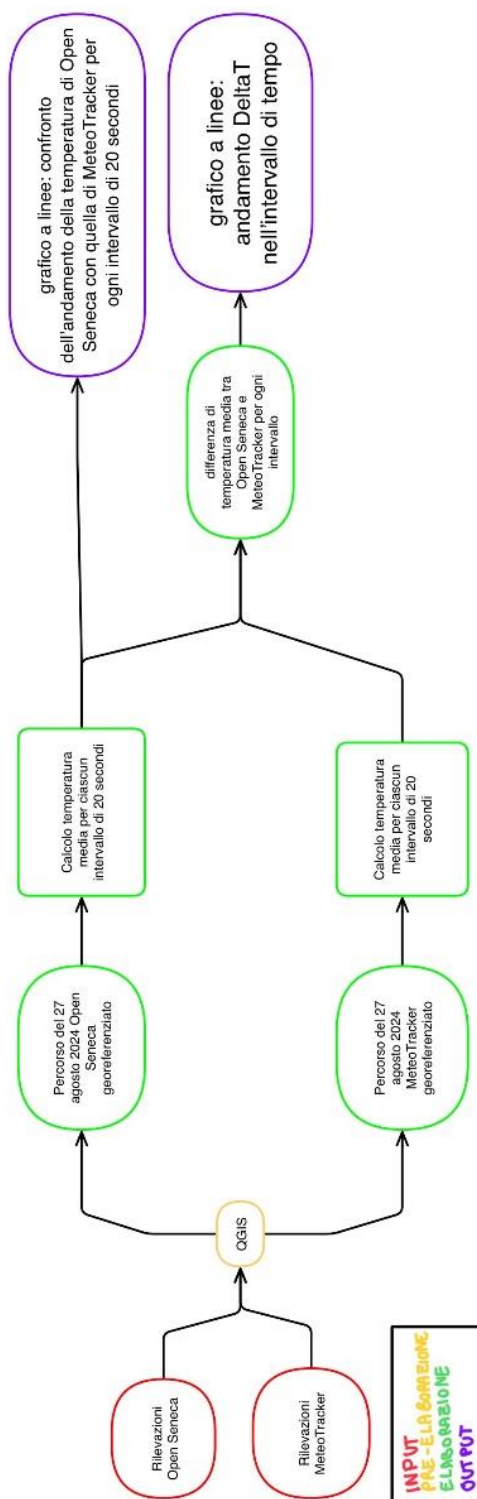


Figura 11 Diagramma di flusso per l'elaborazione dei dati relativi al confronto tra i due device

Analisi Land Surface Temperature e Normalized Difference Vegetation Index:

- 15 Caricamento su QGIS dei file raster grezzi delle bande 4, 5 e 10 relativi al passaggio del satellite Landsat 8 e 9 per tutte le 7 giornate di rilevamento.
- 16 Ritaglio delle bande 4, 5 e 10 con un buffer di 15 km dal centroide del comune di Padova.

- 17 Calcolo del parametro LST tramite il procedimento individuato da Zanetti et al. (2023) utilizzando i dati satellitari ritagliati al punto 17.
- 18 Per una più chiara distinzione del cambio di temperatura legato al parametro LST, si è scelto di cambiare la simbologia della rappresentazione passando da una visualizzazione “banda singola grigia” ad una “banda singola falso colore”. La condizione termica è stata quindi suddivisa in 10 classi basate sui valori dei quantili, ad ogni categoria corrisponde un colore differente che parte dal blu, per un valore di LST minore, fino ad arrivare al rosso passando per il bianco.
- 19 Rappresentazione dei punti contenenti le temperature rilevate dal dispositivo MeteoTracker©.
- 20 Per una più chiara visualizzazione del cambio di temperatura nel singolo percorso si è scelto di cambiare la simbologia della raffigurazione passando da una configurazione a “simbolo singolo” ad una graduata: la condizione termica rilevata in ogni punto del tragitto è stata quindi classificata in 10 categorie aventi range di valori della stessa ampiezza, ad ogni categoria corrisponde un colore differente che parte dal blu, per le temperature minori, fino ad arrivare al rosso passando per il bianco.
- 21 Intersezione tra la temperatura dell’aria e il parametro LST, il quale rappresenta la temperatura del suolo. Le temperature sono associate in base alla posizione in cui sono state misurate. È importante ricordare che il sensore termico dei satelliti Landsat ha risoluzione spaziale di 100 m, di conseguenza il valore di temperatura ottenuto è una media calcolata su un pixel di 100x100m
- 22 Creazione di un grafico Scatter Plot a partire dall’intersezione ricavata al punto 22 per ogni singola giornata, avente il parametro LST sull’asse delle ordinate e la temperatura dell’aria sull’asse delle ascisse, tramite l’utilizzo del software Microsoft Excel.
- 23 Creazione di uno Scatter Plot, con i dati suddivisi per singola giornata di rilevamento, a partire dall’intersezione ricavata al punto 22 per ogni singola giornata, avente il parametro LST sull’asse delle ordinate e la temperatura dell’aria sull’asse delle ascisse. Ogni colore rappresenta una giornata differente, permettendo una visione d’insieme delle variazioni di temperatura tra le giornate di rilevamento.
- 24 Creazione di un modello OLS, a partire dall’intersezione ricavata al punto 22 tramite l’utilizzo dello strumento di analisi dei dati denominato “regressione” fornito dal software Microsoft Excel.
- 25 Si eseguono i passaggi da 17 a 21 con l’NDVI al posto dell’LST
- 26 Creazione di uno Scatter Plot, con i dati suddivisi per singola giornata di rilevamento, a partire dall’intersezione ricavata al punto 30 per ogni singola giornata, avente la temperatura dell’aria sull’asse delle ordinate e l’indice NDVI sull’asse delle ascisse. Ogni colore rappresenta una giornata differente.
- 27 Creazione di un modello OLS, a partire dall’intersezione ricavata al punto 30 tramite l’utilizzo dello strumento di analisi dei dati denominato “regressione” fornito dal software Microsoft Excel.

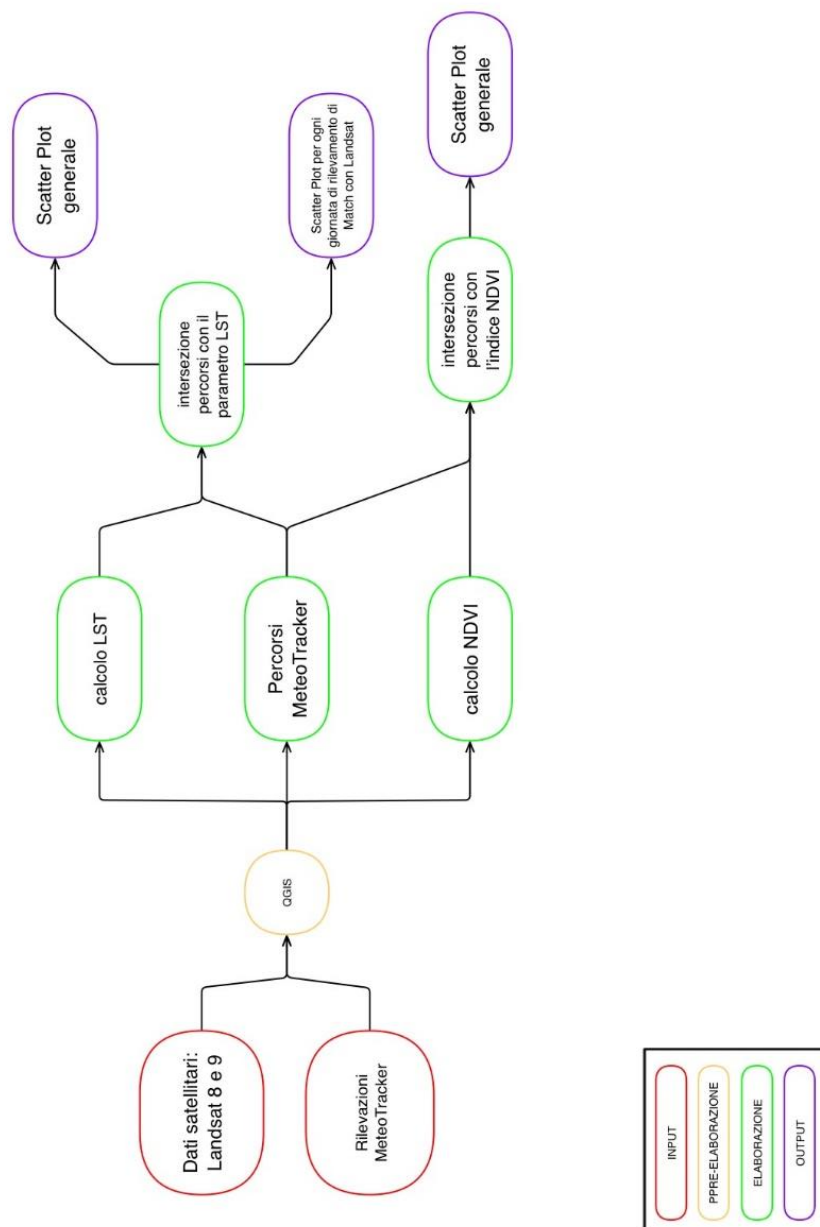


Figura 12 Diagramma di flusso per l'elaborazione dei dati relativi al match con il passaggio dei satelliti Landsat e al calcolo dell'NDVI

Analisi copertura del suolo:

- 28 Intersezione tra la temperatura dell'aria estiva media per ogni esagono e l'uso del suolo, prendendo in considerazione i dati relativi al dispositivo MeteoTracker ricavati al punto 6 e lo shapefile prodotto a partire dal dataset CLC. In questo modo è stato associato ad ogni punto della rilevazione il corrispondente uso del suolo.
- 29 Creazione di un Violin Plot a partire dall'intersezione ricavata al punto 33, utilizzando il Plugin di QGIS DataPloty.
- 30 Ulteriore raggruppamento delle classi della copertura del suolo: suolo impermeabile e suolo permeabile. La categoria impermeabile corrisponde alla classe 1, mentre le altre classi (2, 3, 4 e 5) sono state riunite sotto la categoria di suolo permeabile.

- 31 Creazione di un Box Plot a partire dall'intersezione ricavata al punto 33, avente la temperatura dell'aria sull'asse delle ordinate e la classificazione tra suolo impermeabile ed impermeabile sull'asse delle ascisse (distinzione ricavata la punto 35), tramite l'utilizzo del software Microsoft Excel.

Analisi impatto condizioni Metereologiche sulle temperature:

- 32 Dai dati ottenuti al punto 2, considerando solo le misurazioni di MeteoTracker, si sono suddivise le giornate secondo due criteri: bel tempo e brutto tempo, in base alla nuvolosità.
- 33 Tramite funzione "fondi vettori", individuata tra gli strumenti di Processing di QGIS, si ottiene un unico shapefile comprendente tutti i punti di ogni rilevazione in cui si è verificato "bel tempo" secondo la classifica effettuata al punto 37
- 34 Tramite funzione "fondi vettori", individuata tra gli strumenti di Processing di QGIS, si ottiene un unico shapefile comprendente tutti i punti di ogni rilevazione in cui si è verificato "brutto tempo" secondo la classifica effettuata al punto 37
- 35 Creazione di un reticolo, esteso all'area di studio, composto da esagoni aventi spaziatura orizzontale e verticale di venti metri
- 36 Calcolo della temperatura media, utilizzando i dati ricavati al punto 38, per ogni esagono appartenente al reticolo creato al punto 40, utilizzando la funzione "unisci attributi per posizione" individuata alla voce "statistiche di sintesi" tra gli strumenti di Processing di QGIS. Da quest'ultimo esito sono stati eliminati i valori nulli e gli esagoni con meno di 10 dati.
- 37 Calcolo della temperatura media, utilizzando i dati ricavati al punto 39, per ogni esagono appartenente al reticolo creato al punto 40, utilizzando la funzione "unisci attributi per posizione" individuata alla voce "statistiche di sintesi" tra gli strumenti di Processing di QGIS. Da quest'ultimo esito sono stati eliminati i valori nulli e gli esagoni con meno di 10 dati.
- 38 Utilizzando la funzione "Unione" presente alla voce "vettori – strumenti di Geoprocessing" in QGIS, è stato generato un unico shapefile in cui, per ogni esagono, è presente la temperatura media sia per i giorni di bel tempo (ottenuta al punto 41) sia per quelli di brutto tempo (ottenuta al punto 42).
- 39 È stato calcolato l'NDVI medio a partire dai raster del punto 26, tramite la funzione "calcolatore raster" presente su Qgis.
- 40 Calcolo dell'indice NDVI medio per ogni esagono appartenente al reticolo utilizzando la funzione "statistiche zonali" individuata alla voce "analisi raster" tra gli strumenti di Processing di QGIS. Questa funzione permette di ottenere l'intersezione tra il raster ottenuto al punto 44 e l'unione delle temperature medie di ogni esagono per le giornate di brutto e bel tempo (ottenute al punto 43).
- 41 Calcolo del ΔT per ogni esagono, in Excel a partire dal punto 45, tra le giornate di bel tempo e brutto tempo, questo permette di poter confrontare successivamente il ΔT con la media dell'NDVI.
- 42 Creazione di un grafico Scatter Plot la differenza di temperatura sull'asse delle ordinate e la media NDVI sull'asse delle ascisse, tramite l'utilizzo del software Microsoft Excel.

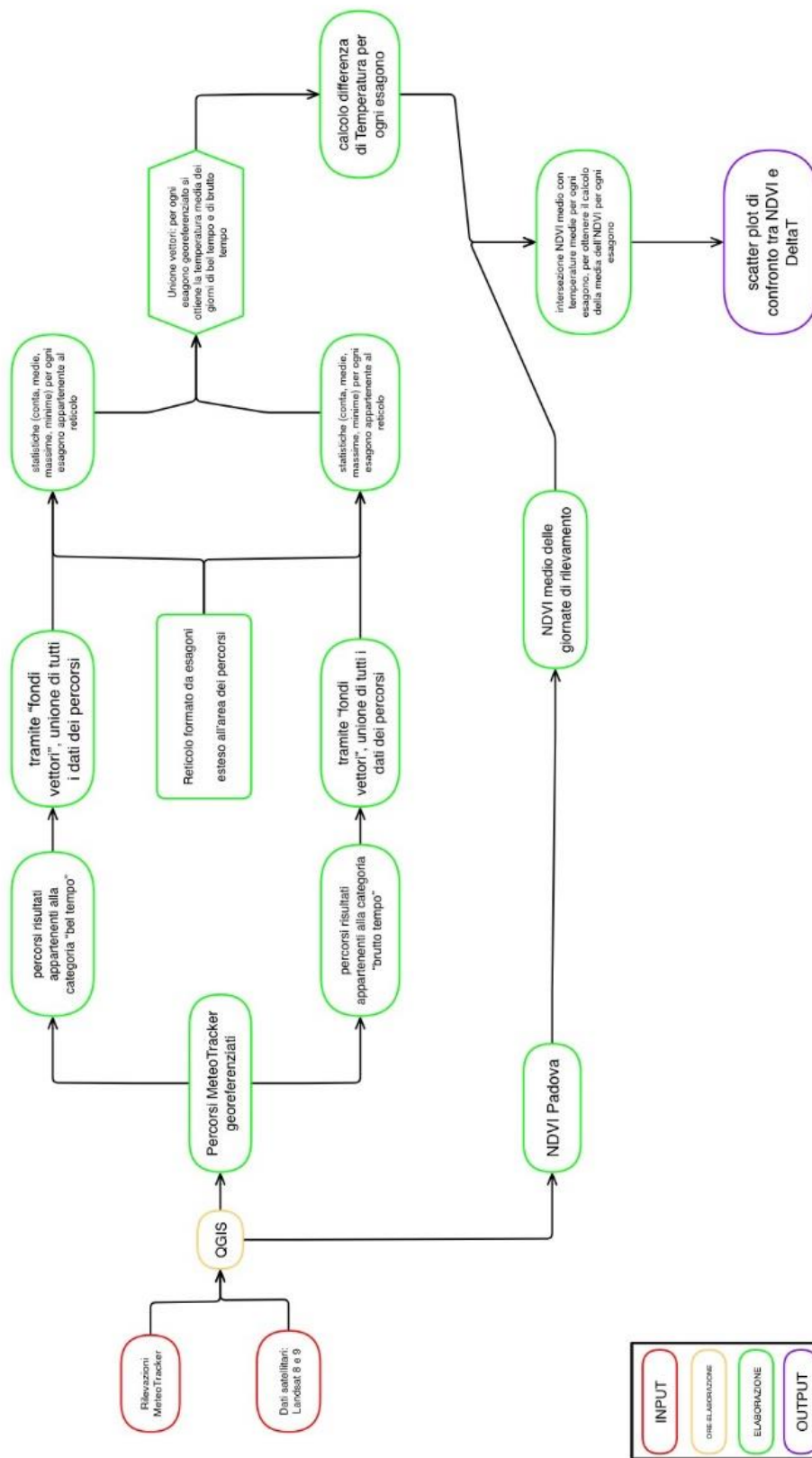


Figura 13 Diagramma di flusso per l'elaborazione dei dati relativi alle diverse condizioni meteorologiche durante l'estate

Elaborazione e analisi dati ambientali:

- 43 Dai dati ottenuti dal punto 6, si sono selezionate le aree di interesse per le analisi.
- 44 Tramite il software Microsoft Excel si sono elaborati i dati creando delle tabelle utili per le elaborazioni successive (Tabella 6 e 7)
- 45 Tramite il software Microsoft Excel si sono elaborati i dati per la creazione dei Box Plot e grafici a linee di confronto tra le diverse aree

Tabella 6 Dati ottenuti tramite elaborazione con Microsoft Excel della zona Piazza Savelli e limitrofe

DATA	PARCHEGGIO PIAZZA SAVELLI	FUORI DAL PARCHEGGIO	DELTA T (fuori- dentro)
18/06/24	30,70	31,10	0,4
19/06/24	30,50	30,50	0,0
20/06/24	29,90	29,85	0,0
21/06/24	29,69	29,71	0,0
22/06/24	28,00	28,03	0,0
28/06/24	30,16	30,66	0,5
29/06/24	32,09	32,18	0,1
08/07/24	29,28	29,37	0,1
09/07/24	32,53	32,74	0,2
10/07/24	35,37	35,52	0,1
11/07/24	35,14	35,14	0,0
13/07/24	32,75	33,12	0,4
14/07/24	32,97	32,94	0,0
15/07/24	33,63	33,90	0,3
16/07/24	31,95	32,25	0,3
24/07/24	31,57	31,66	0,1
30/07/24	31,03	31,32	0,3
31/07/24	33,91	34,11	0,2
02/08/24	30,68	31,24	0,6
09/08/24	31,56	31,42	-0,1
17/08/24	30,72	30,72	0,0
26/08/24	32,71	32,79	0,1
27/08/24	32,18	32,21	0,0
28/08/24	32,19	31,75	-0,4
29/08/24	34,98	34,64	-0,3
30/08/24	34,52	34,86	0,3
31/08/24	34,75	34,75	0,0
01/09/24	33,41	33,82	0,4
02/09/24	31,47	31,28	-0,2

Tabella 7 Dati ottenuti tramite elaborazione con Microsoft Excel per il confronto tra zona Fiera e Parco Europa di Padova

DATA	PARCO EUROPA	FIERA	DELTA T (Fiera - Parco Europa)
29/05/24	23,9	24,5	0,5
04/06/24	24,8	25,1	0,3
06/06/24	26,7	27,0	0,3
14/06/24	22,7	23,1	0,4
18/06/24	29,5	30,5	1,0
19/06/24	30,7	31,6	0,9
20/06/24	29,5	30,0	0,5
21/06/24	29,3	30,1	0,8
22/06/24	28,2	28,5	0,3
28/06/24	31,0	30,7	-0,3
29/06/24	31,6	32,1	0,6
08/07/24	29,7	30	0,3
09/07/24	32,5	33,4	0,9
10/07/24	34,3	35,0	0,7
11/07/24	34,8	35,5	0,7
13/07/24	32,2	32,6	0,4
14/07/24	32,7	33,0	0,2
15/07/24	33,9	33,8	-0,1
16/07/24	32,3	32,5	0,2
24/07/24	31,2	31,1	-0,1
30/07/24	31,1	31,4	0,3
31/07/24	33,9	34,1	0,2
02/08/24	30,8	31,7	0,9
09/08/24	31,3	31,5	0,2
17/08/24	30,3	30,6	0,3
26/08/24	32,3	32,9	0,6
27/08/24	32,2	32,6	0,4
28/08/24	32,2	32,7	0,6
29/08/24	34,8	35,0	0,2
30/08/24	35,0	34,9	0,0
31/08/24	34,2	34,8	0,6
01/09/24	33,6	34,3	0,7
02/09/24	31,1	31,1	0,0

2.2.4 Catalogazione della flora

La catalogazione della flora e la preparazione dell'erbario sono state organizzate in una serie di fasi metodiche, fondamentali per garantire una documentazione accurata e duratura delle specie raccolte. Questo processo ha seguito un percorso che va dalla raccolta dei campioni sul campo fino alla loro conservazione finale su fogli d'erbario, come descritto di seguito:

1. **Raccolta:** Dopo aver individuato l'area di interesse (in questo studio il parcheggio di Piazza Savelli), è stato prelevato un esemplare per ciascuna pianta. Per garantire un'identificazione completa, è stata data preferenza a piante in stato di salute, ovvero senza foglie secche. Inoltre, essendo la raccolta avvenuta nel mese di settembre, gli esemplari sono stati raccolti privi degli elementi essenziali come fiori e frutti.
2. **Preparazione ed essiccazione:** Per le piante con fogliame denso è stato eseguito un leggero sfoltoimento. Ogni esemplare è stato posto all'interno di una "camicia" (un foglio di giornale che non verrà sostituito durante l'essiccazione) e pressato insieme a "cuscini" di 5-10 fogli di giornale, per assorbire l'umidità. Dopo un giorno, i cuscini umidi sono stati sostituiti con altri asciutti, e le piante sono state nuovamente pressate con una leggera pressione aggiuntiva.

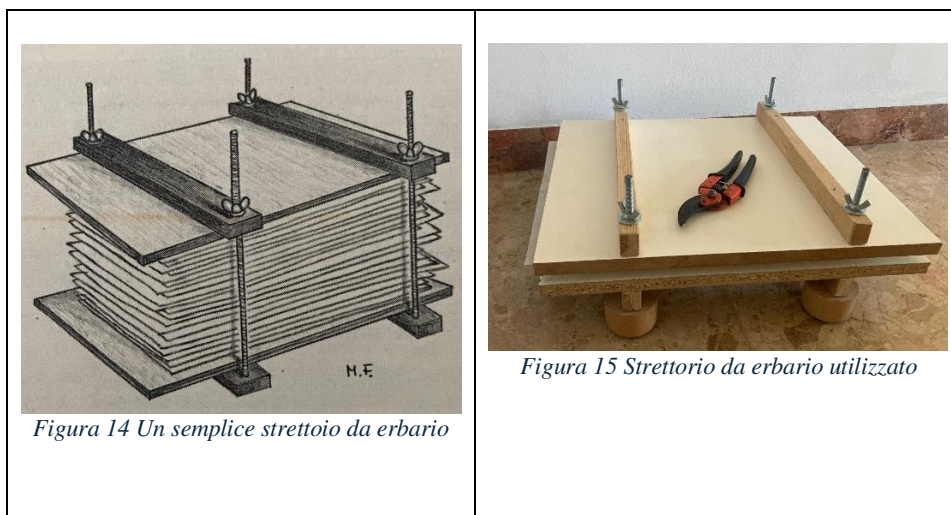


Figura 14 Un semplice strettoio da erbario

Figura 15 Strettorio da erbario utilizzato

3. Determinazione: A ciascun campione è stato attribuito il nome scientifico, basandosi sui caratteri diagnostici. La determinazione è stata eseguita utilizzando il testo Flora d'Italia, che offre chiavi dicotomiche per l'identificazione attraverso una sequenza di domande sugli attributi della pianta.
4. Montaggio: Le piante essiccate sono state montate su fogli A3 di carta bianca, utilizzando una tecnica di fissaggio con strisce adesive, per una disposizione sicura e ordinata.

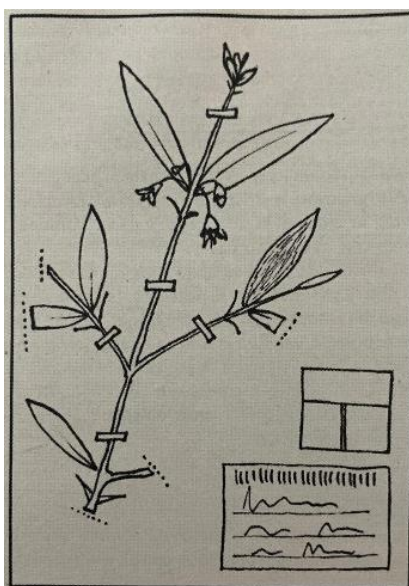


Figura 16 Un campione correttamente montato su foglio

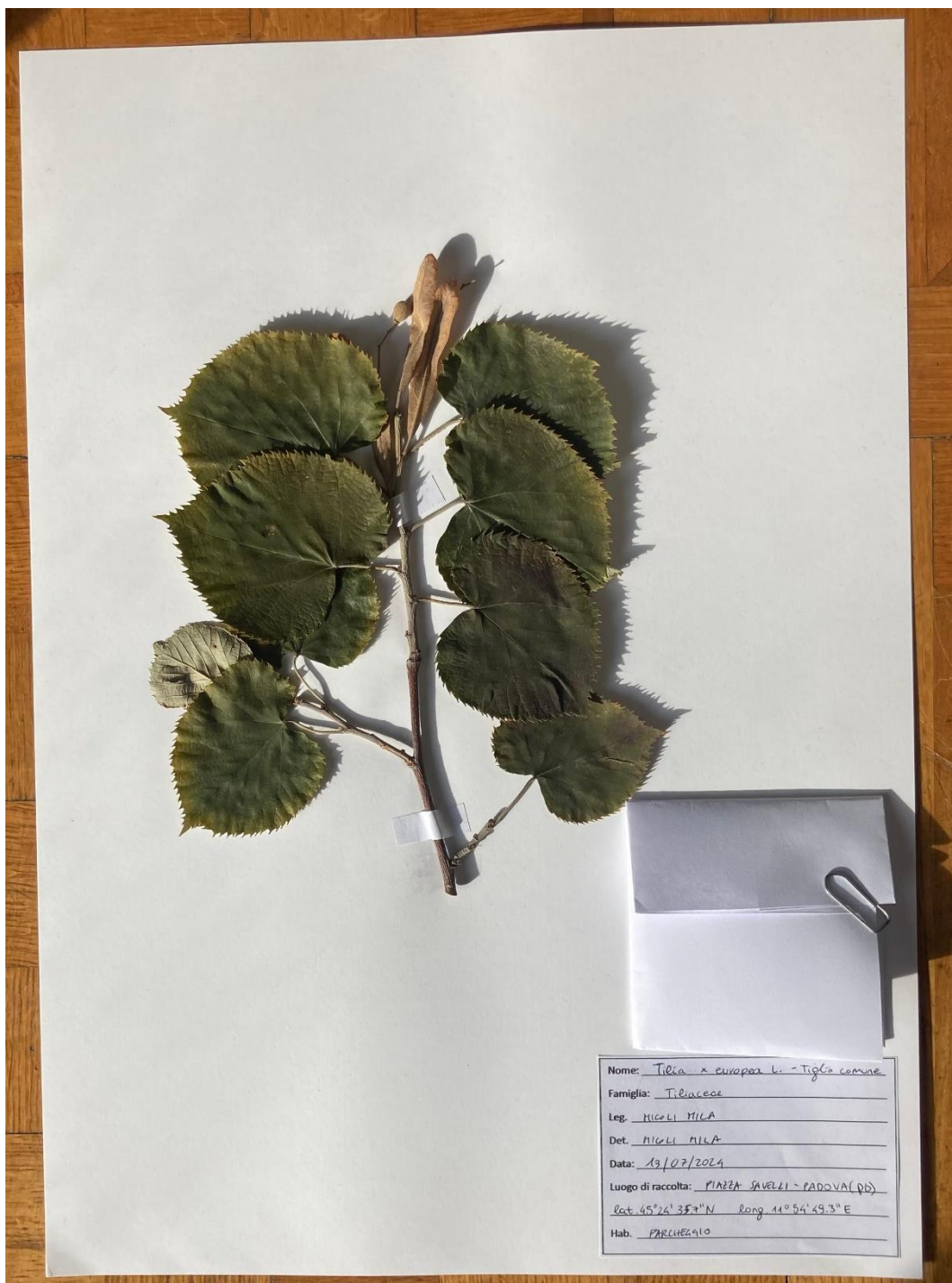


Figura 17 Esempio di campione eseguito

4 Risultati e discussione

4.1 Andamento delle temperature registrate da *MeteoTracker*©

Dalle misure compiute a partire dalle analisi sul campo è emersa una crescita graduale delle temperature nel corso del periodo di rilevamento, con picchi che raggiungono valori superiori ai 35 °C. Inoltre, nel grafico 1, si osservano alcune giornate che mostrano variazioni rispetto alla media, intorno a 31 °C (indicata in viola), come un evidente calo all'inizio del periodo. Tali discostamenti potrebbero essere dovuti a condizioni meteorologiche particolari, come giornate più fresche o perturbazioni che hanno interrotto il verificarsi di ondate di calore, oppure a specifiche caratteristiche locali delle aree urbane campionate.

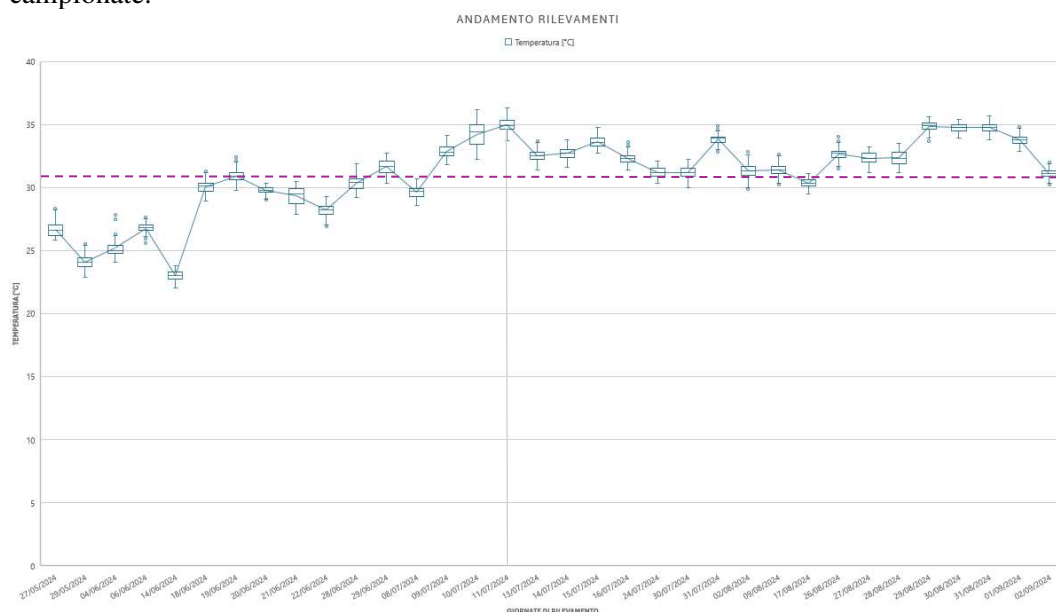


Grafico 1 Box plot delle temperature giornaliere registrate nell'estate 2024 (*MeteoTracker*©). La media è rappresentata in viola

Osservando la Figura 18, relativa alle misurazioni con il *MeteoTracker*©, si nota che la temperatura media giornaliera più alta è di 35°C registrata l'11 luglio 2024. Inoltre, si può notare che nella stessa data è stato misurato il picco più alto di tutte le temperature misurate (36,3 °C). La differenza tra la temperatura più alta e la più bassa è di 2,9°C, la temperatura minima è stata di 33,70°C in zona Navigli lungo il canale Piovego, con una deviazione standard totale di 0,45°C. A fronte di tutto ciò, La giornata dell'11 luglio risulta essere una giornata eccezionalmente calda, con temperature decisamente sopra la media rispetto agli altri giorni.

Le condizioni meteorologiche, osservabili in Figura 19 tra il 14 e il 20 luglio, sono state caratterizzate da temperature compatibili con un'ondata di calore secondo i dati di *Wetterzentrale*, un portale meteorologico Europeo. Tuttavia, la temperatura media più alta si è registrata l'11 luglio il che suggerisce che anche questa giornata possa essere considerata parte dell'evento di ondata di calore che si protrae fino alla giornata 20 luglio. Inoltre, prendendo in considerazione la Figura 20 risultano essere sopra la media storica (linea rossa).

La rilevazione invece con la temperatura massima più bassa registrata è stata quella della giornata 14 giugno con $[22 \pm 0,35]$ °C.

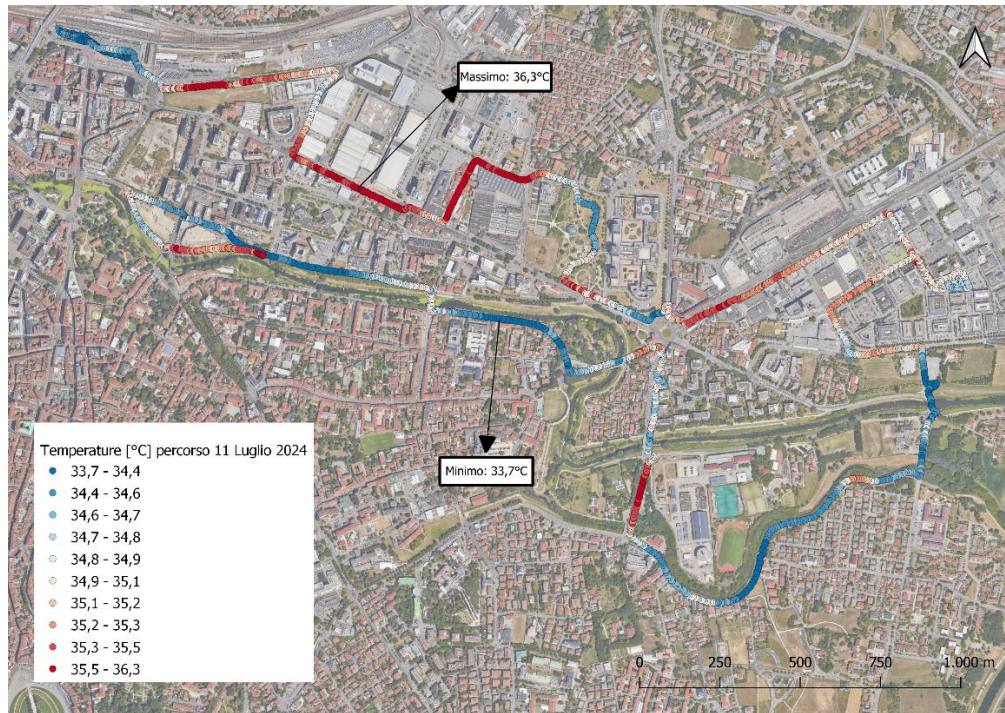


Figura 18 Percorso 11/07/2024, valori di temperatura dell'aria [°C] (MeteoTracker©).

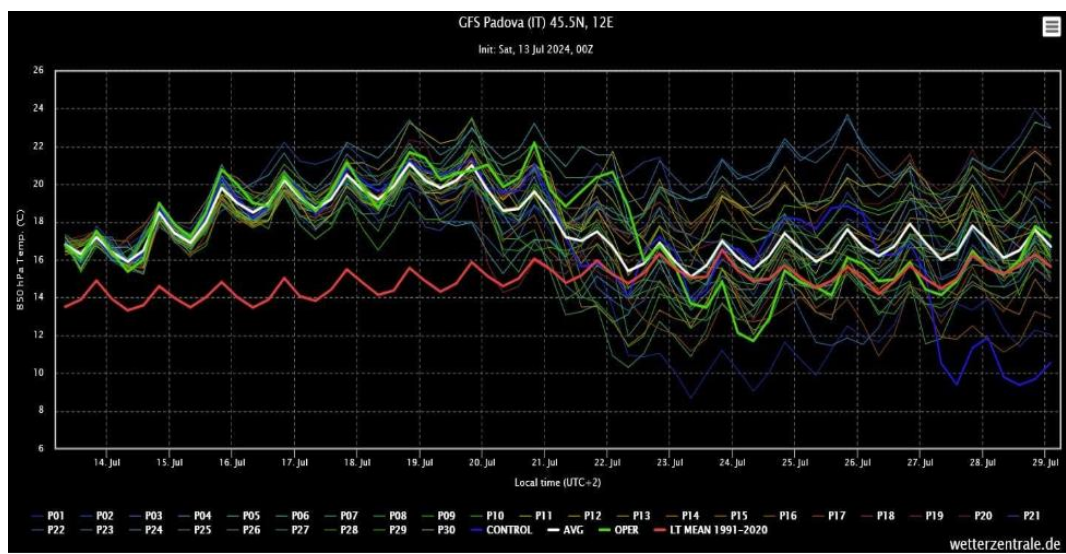


Figura 19 Condizioni meteorologiche a Padova tra il 14 e 29 luglio (<https://www.wetterzentrale.de>).

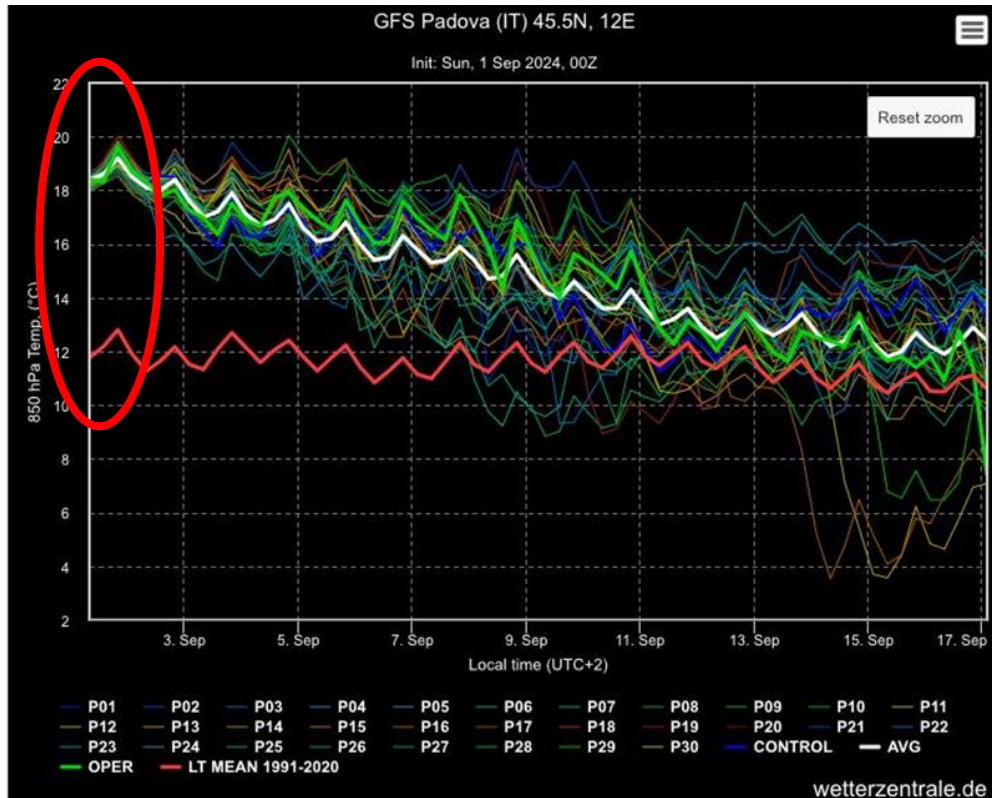


Figura 20 Condizioni metereologiche a Padova tra il 2 e 17 settembre (<https://www.wetterzentrale.de>).

Per quanto riguarda l'analisi distributiva delle temperature medie dell'estate, è stato costruito un Box Plot (Grafico 2) che illustra la distribuzione delle temperature medie registrate durante l'estate 2024. La rappresentazione tramite esagoni, visibile in Figura 21, consente di visualizzare la distribuzione termica spaziale, identificando le aree con temperature medie più elevate o più contenute.

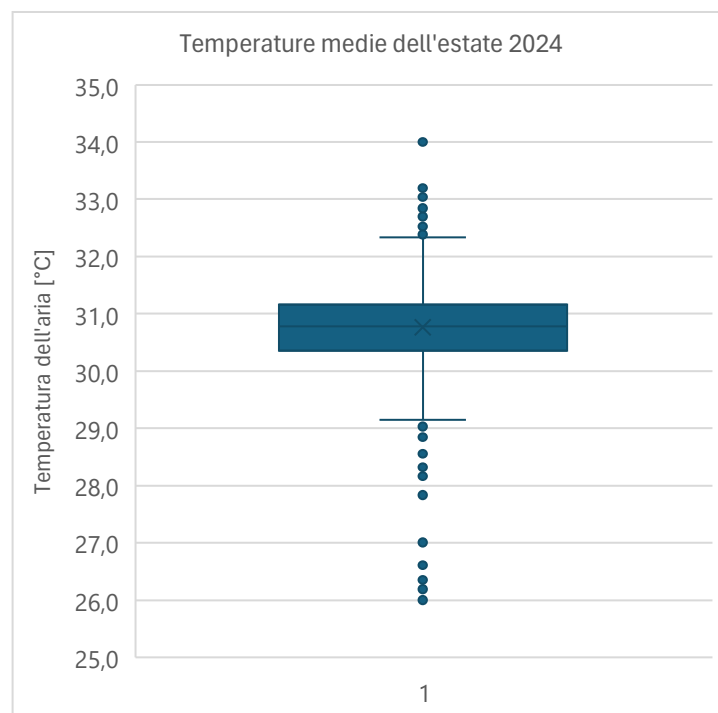


Grafico 2 Box Plot: valori medi di temperatura dell'aria [°C] (MeteoTracker©).

La mediana è circa 30,8 °C, i valori di temperatura che si discostano maggiormente dal corpo centrale sono 34 e 26°C. Questi punti estremi ragionevolmente possono rappresentare aree particolarmente calde o fresche all'interno della città, potenzialmente associate a diverse tipologie di copertura del suolo o a specifiche condizioni microclimatiche. Con un'analisi approfondita si evince che la temperatura massima è stata rilevata in zona Fiera, luogo in cui, come precedentemente emerso dalla Figura 18, si è registrato il picco più alto dell'estate 2024; mentre la temperatura minima è stata registrata ai Navigli di Padova. La distanza dalle due zone è di circa 0,5 km in linea d'aria.

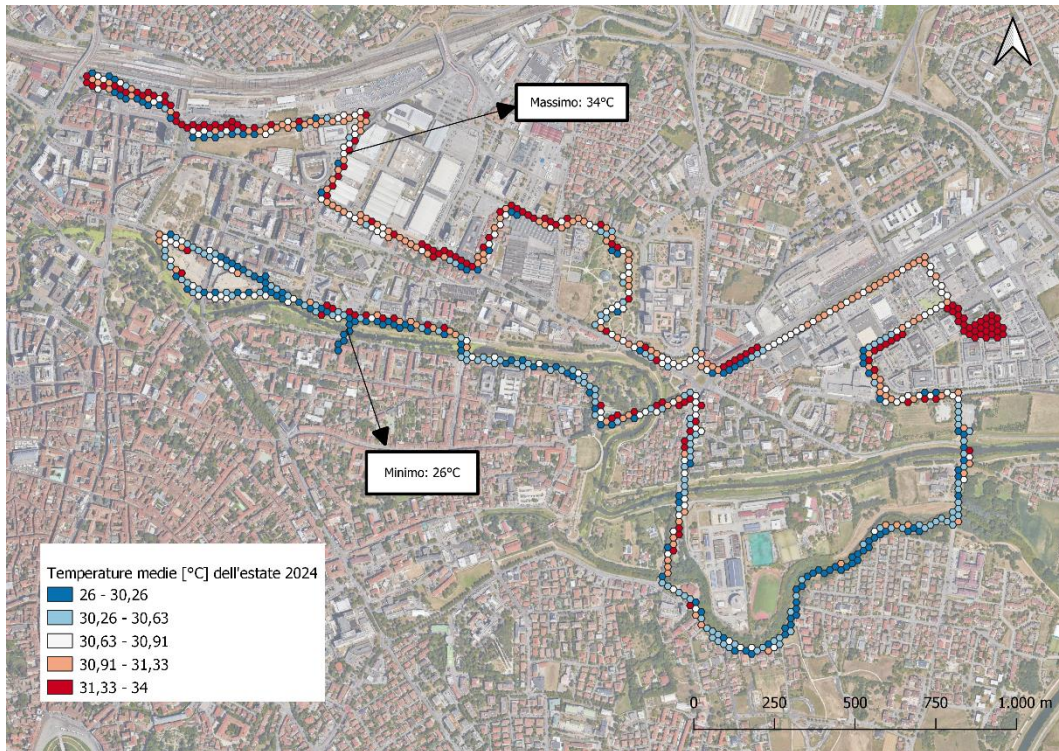


Figura 21 Valori medi di temperatura dell'aria [°C] dell'estate 2024 (MeteoTracker©).

4.2 Confronto tra i dispositivi *Meteotracker*© e Open Seneca

Anche per il dispositivo OpenSeneca, l'11 luglio 2024 risulta essere la giornata più calda dell'estate, con una temperatura media giornaliera di circa $[42,1 \pm 1,9]$ °C. Questo dato indica una coerenza tra i due dispositivi nel rilevare la giornata più calda; tuttavia, si osservano differenze nei valori massimi e minimi registrati. Come illustrato nella Figura 24, OpenSeneca ha rilevato una temperatura massima giornaliera di 43,9°C in Via della Croce Rossa, un'area che, secondo i dati di Meteotracker, presenta comunque temperature elevate, sebbene più contenute, intorno ai 35,3°C. Tale discrepanza nelle misurazioni ha motivato la creazione di un box plot di confronto (Grafico 3) utilizzando le temperature medie per ogni esagono rilevate nell'estate 2024 e osservabili alle Figure 22 e 23.

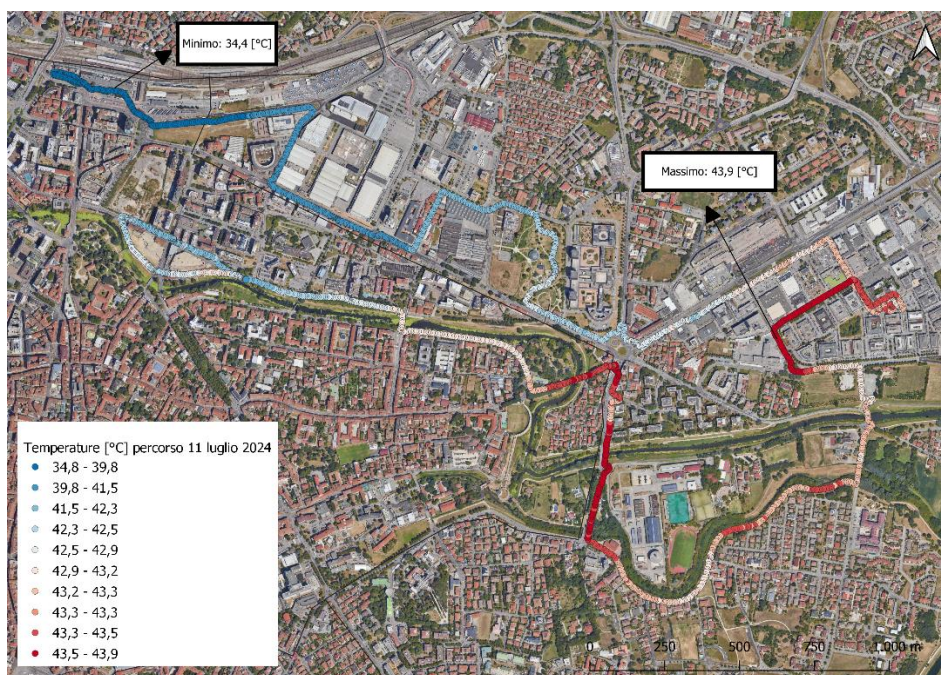


Figura 22 Percorso 11/07/2024, valori di temperatura dell'aria [°C] (Open Seneca).

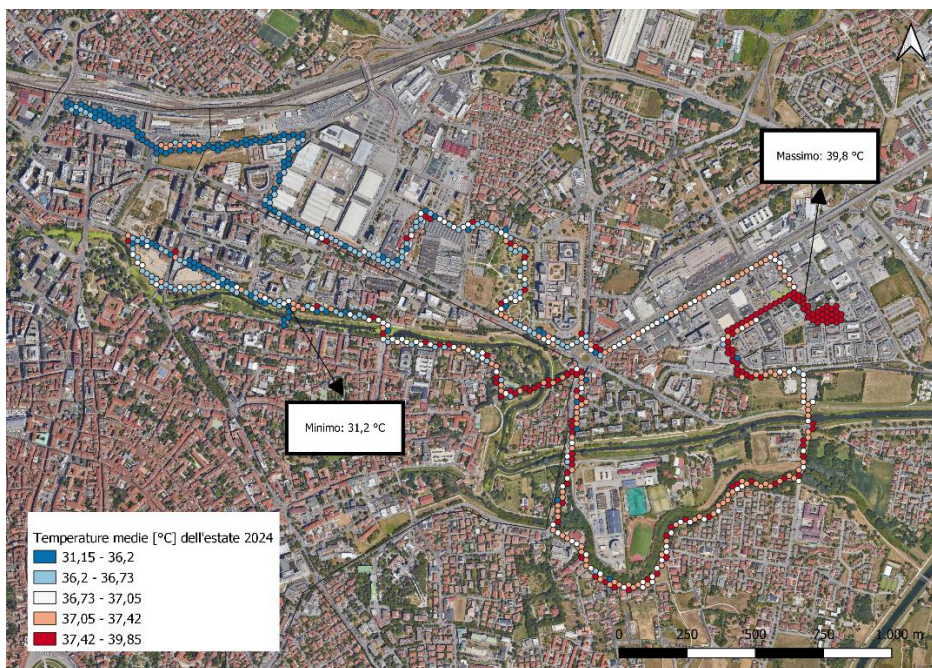


Figura 23 Valori medi di temperatura dell'aria [°C] dell'estate 2024 (Open Seneca).

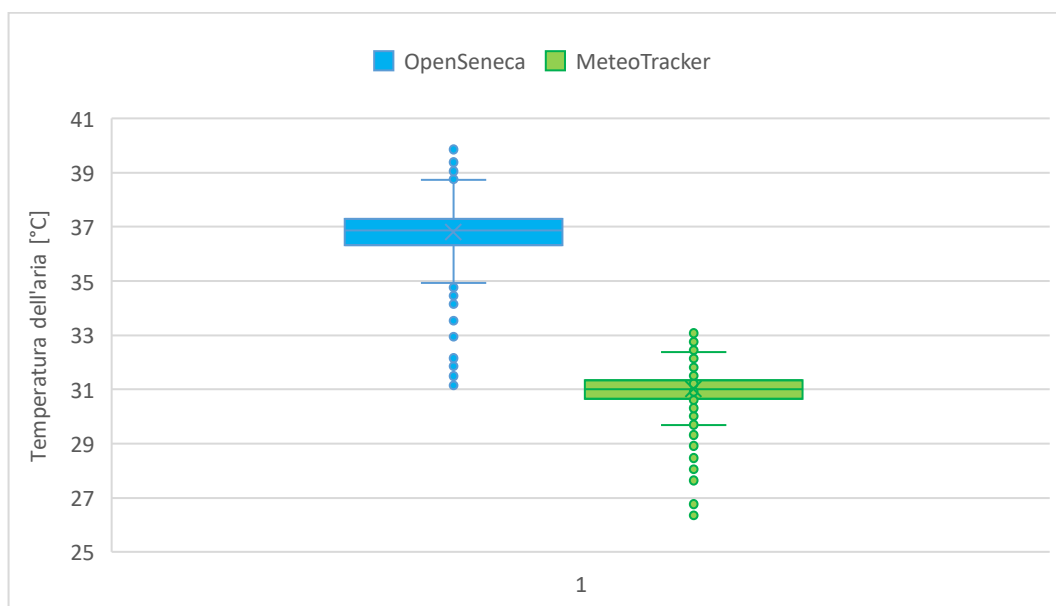


Grafico 3 Box plot di confronto delle temperature medie estive rilevate tra i due dispositivi (Open Seneca e MeteoTracker©).

Come si può osservare dal grafico 3, che mostra la distribuzione delle temperature medie registrate durante l'estate, il dispositivo OpenSeneca riporta valori più elevati, con una media di $36,8 \pm 1,0$ °C, mentre MeteoTracker presenta una mediana inferiore, intorno a $31 \pm 0,8$ °C. Questa differenza nei valori mediani suggerisce una diversa sensibilità dei due dispositivi alle condizioni ambientali locali, con OpenSeneca che sovrastima le temperature rispetto a MeteoTracker.

L'analisi dell'andamento della temperatura media registrata nelle diverse giornate di rilevamento (Grafico 4) evidenzia fluttuazioni tra le temperature misurate dai due dispositivi. OpenSeneca mostra variazioni più marcate rispetto a MeteoTracker, che, al contrario, registra un andamento più regolare. Questa differenza è confermata anche

dall'andamento delle temperature registrate, ogni intervallo di 20 secondi, dai due dispositivi nella singola giornata di rilevamento del 27 agosto 2024 (Grafico 5). Nonostante queste oscillazioni, entrambe le serie di dati suggeriscono una tendenza all'incremento graduale delle temperature medie giornaliere.

L'improvviso calo delle temperature registrato da OpenSeneca nel mese di luglio, visibile al Grafico 4, potrebbe essere attribuito a condizioni meteorologiche avverse, a possibili problemi di calibrazione del dispositivo o all'influenza di aree verdi attraversate durante il rilevamento, che potrebbero aver ridotto la media delle temperature rilevate.

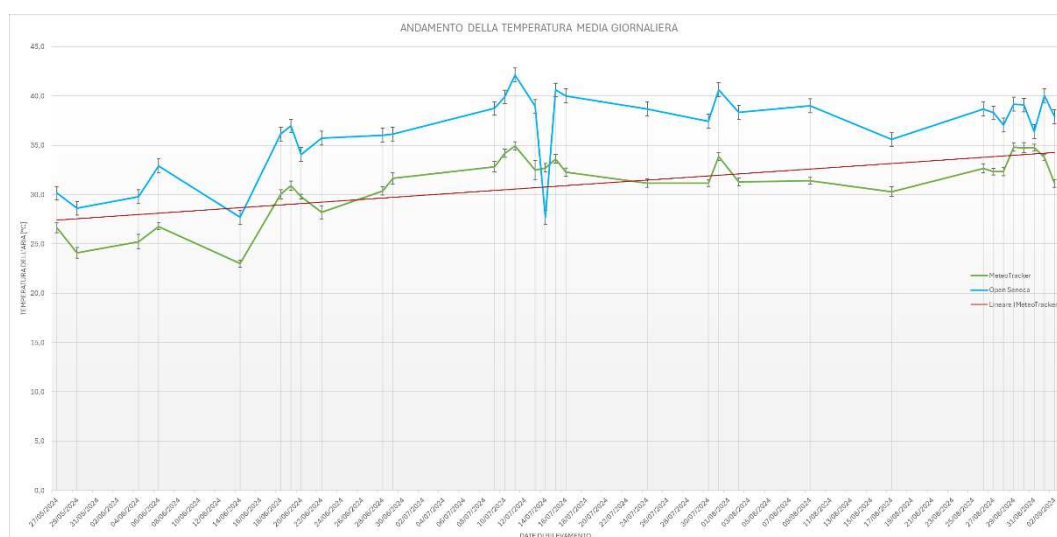


Grafico 4 Confronto delle temperature medie giornaliere registrate da OpenSeneca e MeteoTracker©

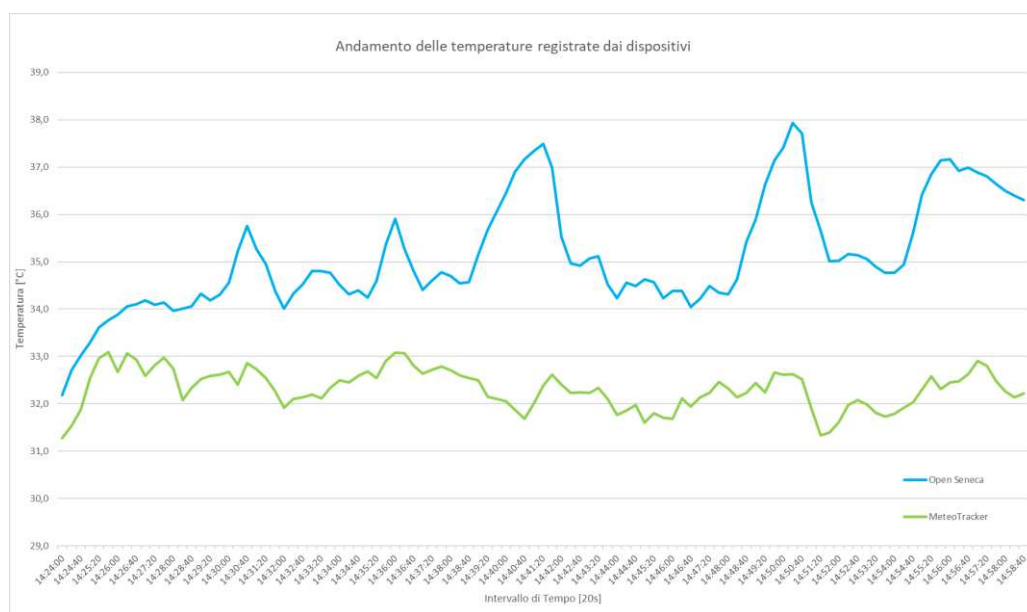


Grafico 5 Andamento comparativo delle temperature registrate da OpenSeneca e MeteoTracker© il 27 agosto 2024

Dal Grafico 6, si comprende che c'è una differenza sistematica tra le due serie di dati, indipendentemente dal tipo di copertura del suolo suddiviso secondo il primo livello di classificazione (serie 1 = superfici artificiali; serie 2 = superfici agricole utilizzate). La differenza potrebbe, invece, essere legata alla calibrazione, al posizionamento o alla sensibilità dei dispositivi.

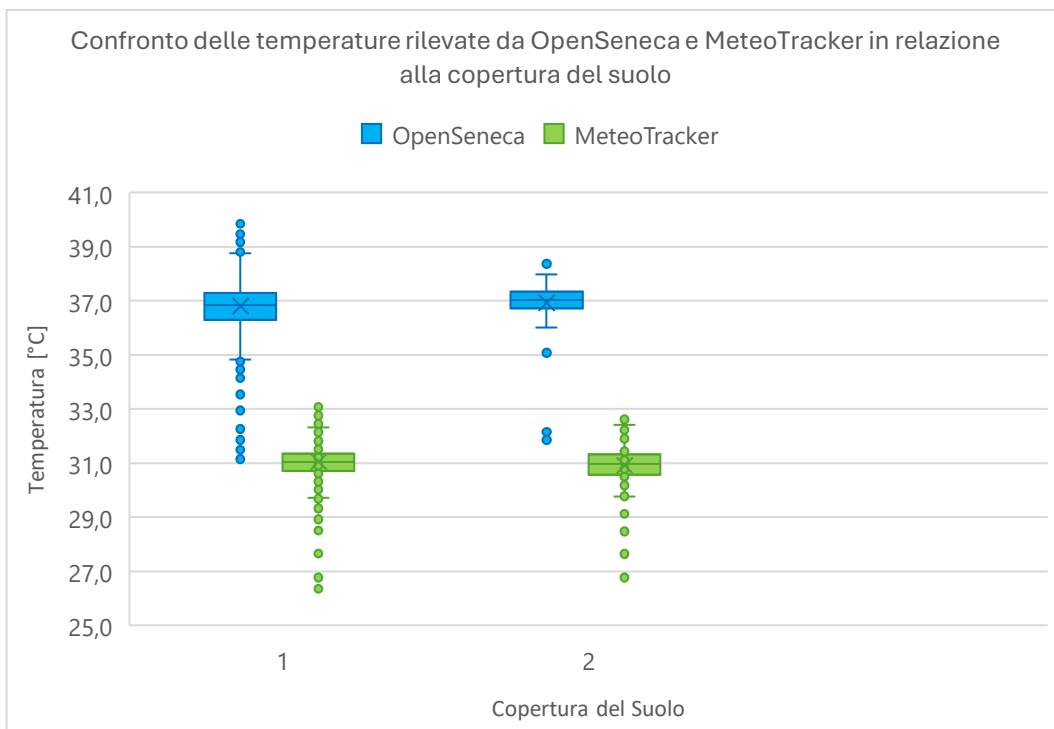


Grafico 6 Box plot di confronto della distribuzione delle temperature rilevate da Open Seneca e MeteoTracker© in relazione alla copertura del suolo secondo il primo livello di classificazione

Più in particolare la media delle differenze di temperature misurate tra Open Seneca e MeteoTracker il giorno 27 agosto 2024 è risultata pari a $[2,8 \pm 1,2]$ °C. Il valore medio di ΔT , rappresentato in blu al Grafico 7, si mantiene stabile nell'intervallo compreso tra 1,6 °C e 4 °C, rispettivamente indicati dalle linee gialla e rossa. Nonostante le oscillazioni all'interno di tale intervallo, il ΔT presenta una variabilità limitata e prevedibile attorno al valore medio.

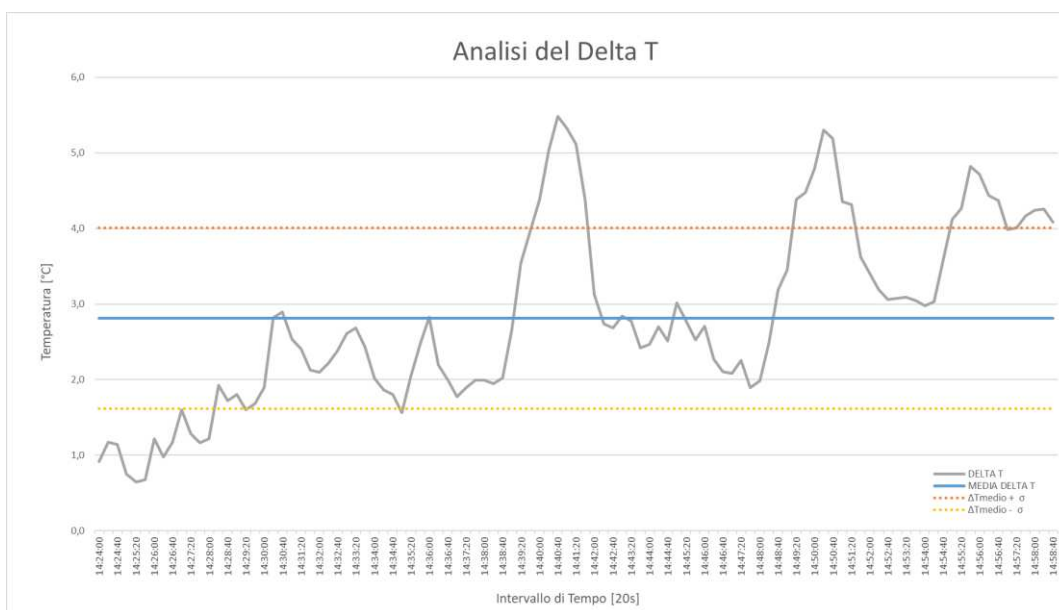


Grafico 7 Rappresentazione della differenza di temperatura tra i dispositivi Open Seneca e MeteoTracker©

4.3 Mappatura delle isole di calore urbano

Per quanto riguarda le rilevazioni svolte in concomitanza con il passaggio del satellite Landsat 8 e 9, sono state prese in considerazione le sessioni svolte il 22 giugno e il 16 luglio 2024 in quanto, nelle altre giornate utili al confronto, le condizioni meteorologiche hanno comportato una copertura nuvolosa superiore al 20% (dato dell'USGS), rendendo i dati acquisiti meno affidabili.

Dalle prime rappresentazioni cartografiche (Figure 24 e 25) si può notare che le zone più calde, aventi range 28,8 – 29,3 °C il 22 giugno e 32,8 – 33,6 °C il 16 luglio, sono, anche in questo caso, quelle relative alla zona Fiera, area industriale della città e al Piazzale della Stanga; mentre le zone più miti sono quelle nell'immediata vicinanza del canale Piovego e delle zone verdi come i Navigli e il Parco Europa, in queste zone le temperature sono scese fino a 26,9 °C a giugno e fino a 31,4 °C a luglio.

Nel parco Tito Livio si riscontra una marcata discrepanza nelle temperature registrate; infatti, il 22 giugno, le rilevazioni indicano un intervallo di temperatura compreso tra 27 °C e 28 °C. Al contrario, il 16 luglio si osserva un significativo aumento dell'escursione termica, con valori che vanno da 31,9 °C fino a un massimo di 33,6 °C.

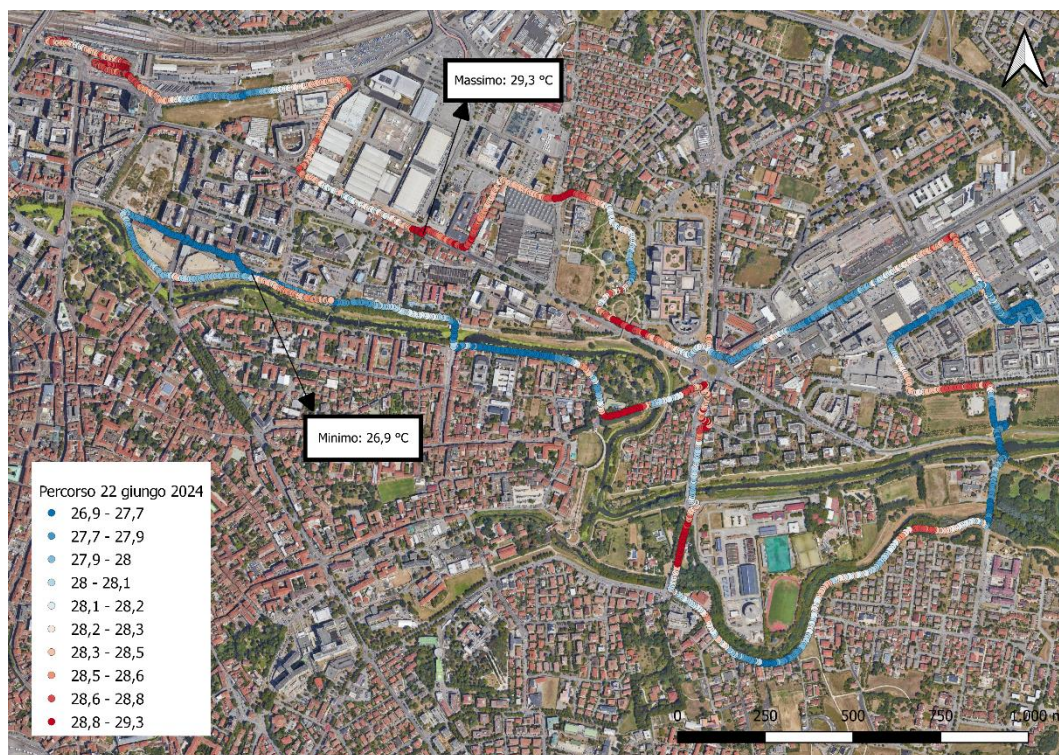


Figura 24 22 giugno 2024, i valori di temperatura dell'aria [°C]



Figura 25 16 luglio 2024, i valori di temperatura dell'aria [°C]

Successivamente è stato analizzato il confronto tra le temperature rilevate sul campo e le temperature misurate dal satellite per verificare se ci fosse una corrispondenza tra i due risultati. Visivamente (Figure 26 e 27) è possibile affermare che effettivamente, in alcune parti del tracciato, a temperature del suolo superiori corrispondono anche temperature dell'aria superiori.

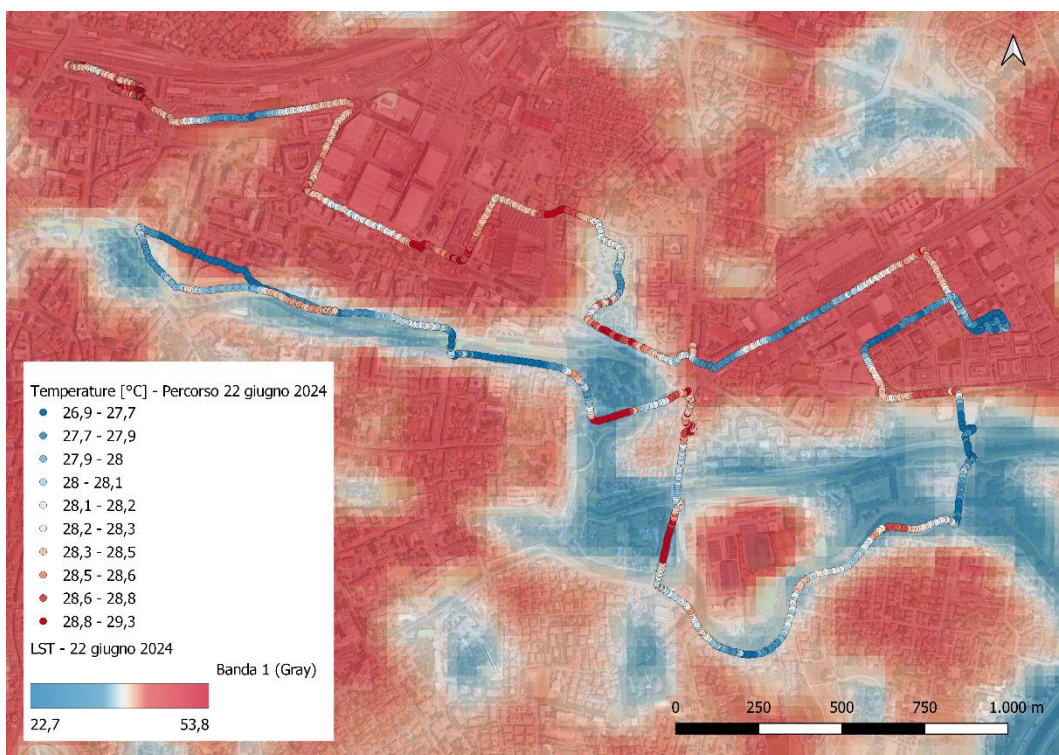


Figura 26 22 giugno 2024, i valori di temperatura dell'aria [°C] a confronto con il parametro LST

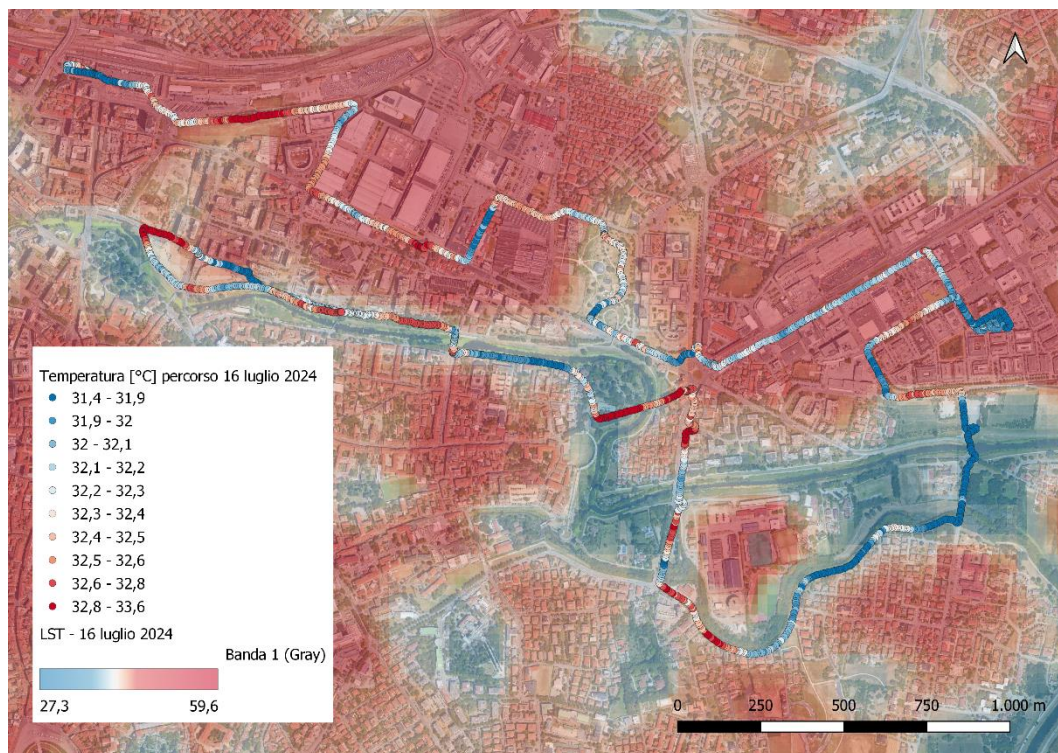


Figura 27 16 luglio 2024, i valori di temperatura dell'aria [°C] a confronto con il valore LST.

I grafici 8 e 9 rappresentano gli Scatter Plot relativi alle sessioni del 22 giugno e 16 luglio. In particolare, nel rilevamento del 22 giugno, si può notare un andamento crescente della temperatura dell'aria, rilevata puntualmente dal *device* MeteoTracker©, all'aumentare della temperatura del suolo, rappresentata dal valore LST (*Land Surface Temperature*); tuttavia, si osserva una grande dispersione dei risultati rispetto alla linea di tendenza. Questa differenza tra i due risultati è legata a vari motivi, partendo dal fatto che stiamo misurando due grandezze distinte:

- Il dispositivo MeteoTracker© rileva puntualmente la temperatura dell'aria;
- il valore LST è una stima della temperatura superficiale della terra e, per determinare questa grandezza, sono necessari opportuni sensori sensibili alla radiazione termica infrarossa in grado di eseguire misure di radianza correlabili alla LST. Considerando il fatto che il sensore termico del satellite Landsat 8 ha risoluzione spaziale di 100 m, il valore di temperatura ottenuto è una media calcolata su un pixel di 100x100m;
- Le sessioni con il *device* mobile sono distribuite nel tempo, circa 15 minuti prima e 15 minuti dopo l'acquisizione satellitare;
- Le immagini satellitari sono acquisite istantaneamente.

Per quanto il 16 luglio, si osserva un andamento opposto (Grafico 9). Questo cambiamento potrebbe riflettere un aumento dell'intensità del calore e le condizioni ambientali, come l'umidità e l'evaporazione, che possono condizionano diversamente la temperatura dell'aria rispetto a quella del suolo. La diversa risposta a queste due grandezze evidenzia quindi la natura distinta delle misurazioni e la loro sensibilità a fattori ambientali specifici e complessi.

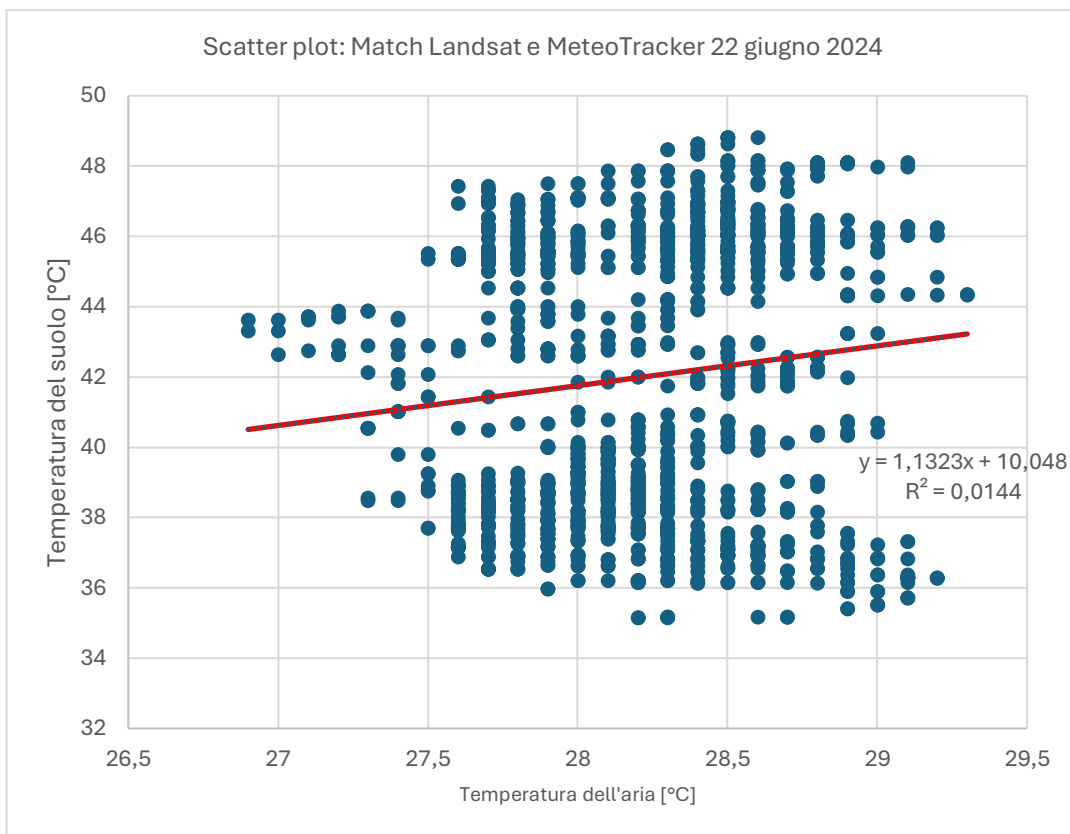


Grafico 8 Scatter Plot 22/06/2024, confronto tra temperatura dell'aria [°C] e parametro LST con linea di tendenza.

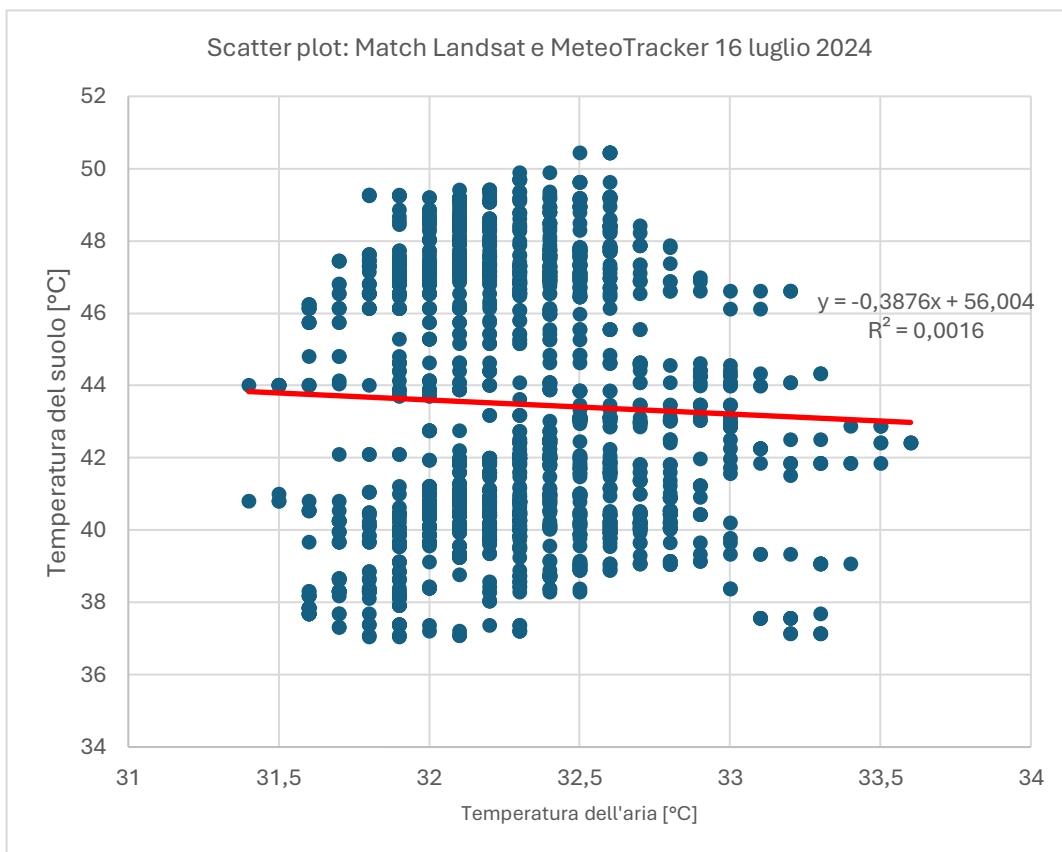


Grafico 9 Scatter Plot 16/07/2024, confronto tra temperatura dell'aria [°C] e parametro LST con linea di tendenza.

Analizziamo i dati tramite il modello OLS: per il giorno 22 giugno è stato ottenuto il valore di R^2 uguale a 0,0144, mentre per il 16 luglio l' R^2 risulta 0,0016. I risultati possono essere considerati poco rilevanti, poiché entrambi i valori di R^2 sono molto piccoli. Infatti, valori tendenti a zero del coefficiente di determinazione indicano che vi è una scarsa informazione nella relazione tra la variabile indipendente e la variabile dipendente. Tuttavia, bisogna considerare che la variabile dipendente analizzata (temperatura dell'aria) può dipendere da molti fattori, non solo dalla temperatura al suolo.

Osservando, invece, i coefficienti delle rette di regressione (β), notiamo che per il 22 giugno il coefficiente è 1,1323, mentre per il 16 luglio è -0,3876. Questo significa che, per ogni unità di incremento della temperatura dell'aria misurata da MeteoTracker© il modello prevede un aumento della temperatura del suolo di circa 1,13 °C per il 22 giugno, mentre per il 16 luglio si osserva una leggera diminuzione di circa 0,39 °C. Questo suggerisce che, in media, la temperatura del suolo aumenta rispetto alla temperatura dell'aria il 22 giugno, mentre il 16 luglio si osserva una tendenza opposta, con la temperatura del suolo che diminuisce leggermente al crescere della temperatura dell'aria.

Dopo aver condotto analisi approfondite per le relative giornate 22 giugno e 16 luglio 2024, si è ritenuto opportuno eseguire un'analisi generale che includesse i dati relativi alle giornate in cui si è registrato il passaggio dei satelliti Landsat 8 e 9, limitando il campione a quelle con una copertura nuvolosa inferiore al 43% su tutta l'area di Padova. Dal Grafico 10, la temperatura superficiale varia con valori che oscillano tra circa 15°C e 50°C, mentre la temperatura dell'aria ha un intervallo minore (tra 22°C e 35°C). Questo suggerisce che la temperatura della superficie terrestre, rilevata da Landsat, è soggetta a maggiori fluttuazioni rispetto alla temperatura dell'aria registrata da MeteoTracker.

Come illustrato al Grafico 10, emerge una lieve correlazione tra le temperature dell'aria e quelle del suolo: come evidenziato nelle analisi precedenti relative alla giornata 22 giugno 2024, a temperature dell'aria più elevate corrispondono temperature superficiali maggiori. Alcune giornate, come il 6 giugno 2024 (rappresentata in arancione), mostrano un intervallo di temperature del suolo più basse, comprese tra circa 15°C e 42°C, con temperature dell'aria comprese tra circa 25°C e 30°C. Questo suggerisce che, in tale giornata, lungo il percorso effettuato fosse presente della copertura nuvolosa. Al contrario, altre giornate, come il 9 agosto 2024 (indicata in verde), presentano temperature dell'aria e superficiali molto elevate, indicando condizioni più calde in generale.

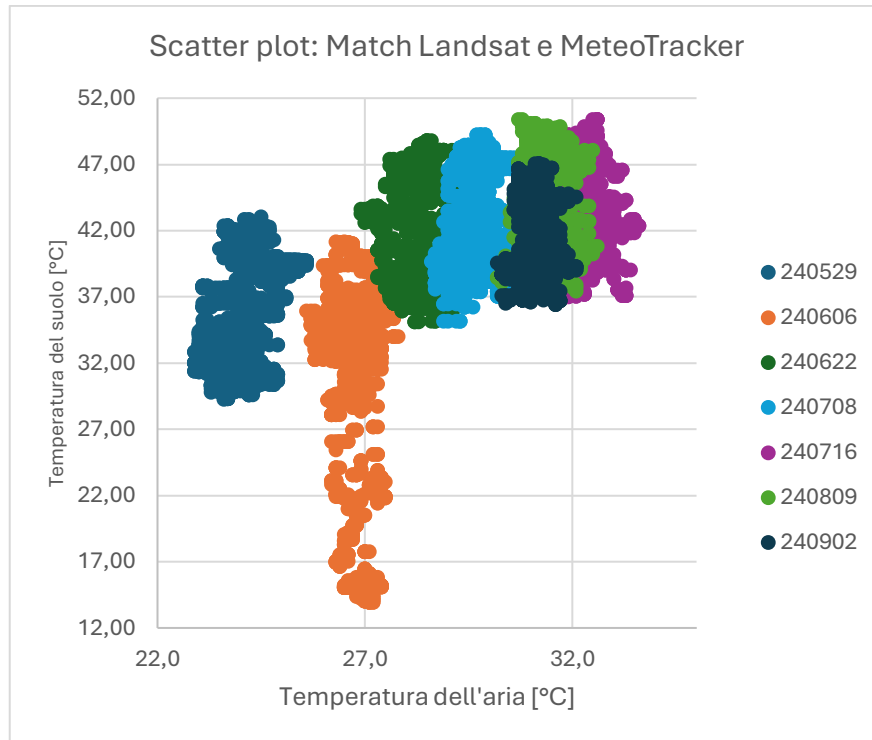


Grafico 10 Scatter plot che confronta la temperatura dell'aria (MeteoTracker) e quella del suolo (Landsat 8 e 9) per diverse date di rilevamento, con ogni colore che rappresenta una giornata specifica.

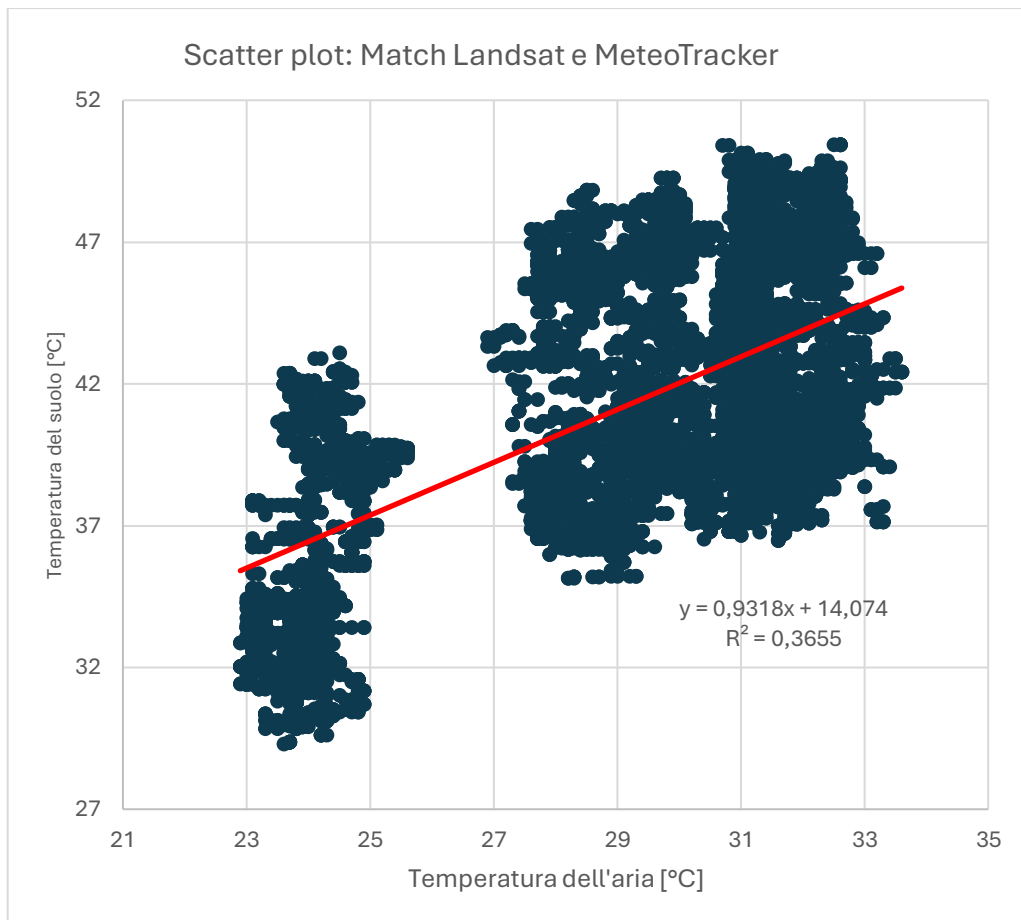


Grafico 11 Scatter plot che mostra la relazione tra la temperatura dell'aria e quella del suolo, evidenziando la retta di regressione e un coefficiente di determinazione $R^2=0,3655$.

Per quanto riguarda il modello OLS, che consente di valutare il risultato ottenuto in merito al coefficiente di determinazione R^2 , è possibile fare le seguenti considerazioni: in questo caso, il valore R^2 ottenuto è pari a 0,4 (Grafico 11); il che indica una relazione moderata tra la temperatura dell'aria e la temperatura del suolo, sebbene non molto forte in termini statistici. Tuttavia, come già spiegato precedentemente, la variabile dipendente (temperatura dell'aria) può essere influenzata da molti fattori, oltre alla temperatura del suolo, il che può spiegare il valore relativamente basso di R^2 .

Il coefficiente di regressione relativo alla temperatura dell'aria, uguale a 0,93; suggerisce che per ogni aumento di 1 °C nella temperatura dell'aria, si prevede un aumento di circa 0,93 °C nella temperatura del suolo. Questo valore indica una relazione positiva tra le due variabili, con un incremento della temperatura del suolo che segue quello della temperatura dell'aria.

Di seguito, si è svolta un'analisi basandosi sull'indice NDVI: visibilmente in Figura 28, che rispecchia la giornata del 16 giugno 2024, è possibile osservare che le zone aventi una copertura vegetale meno rigogliosa, ovvero le zone colorate di rosa (zona Fiera, dopo Parco Europa), presentano una condizione termica superiore, viceversa ad aree più densamente vegetate corrisponde una condizione termica con valori inferiori.

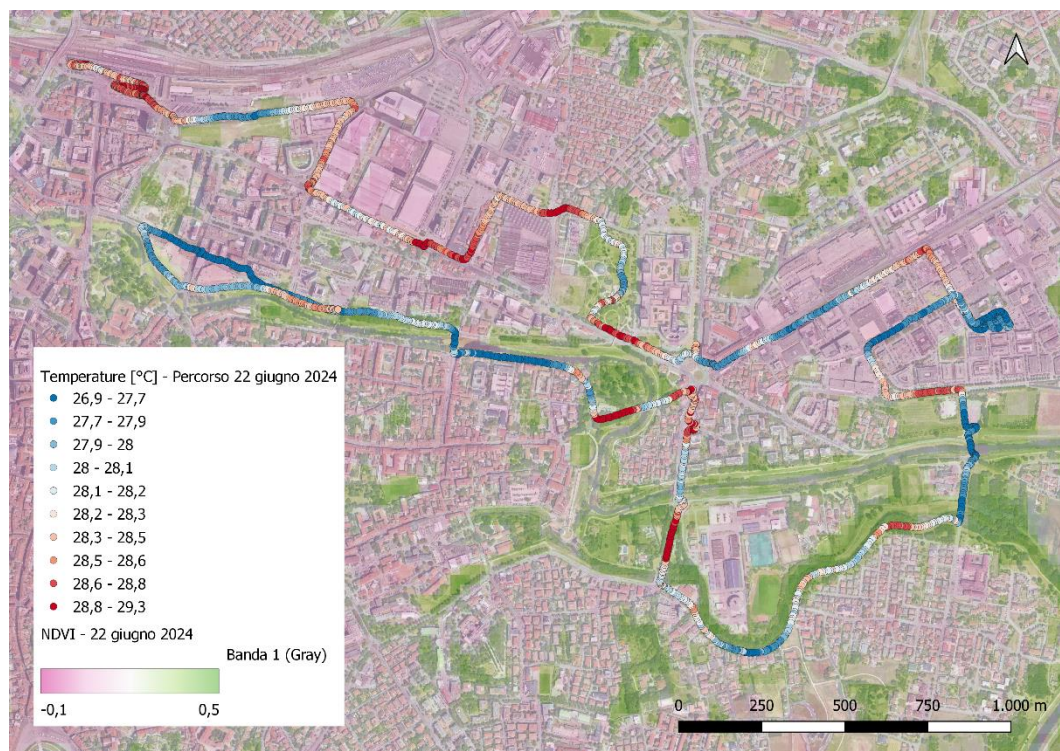


Figura 28 22 giugno 2024, i valori di temperatura dell'aria [°C] a confronto con l'indice NDVI

Svolgendo un'analisi generale, che includesse i dati relativi alle giornate in cui si è registrato il passaggio dei satelliti Landsat 8 e 9, si è creato uno Scatter Plot (Grafico 12) che relazionasse le temperature dell'aria con l'indice NDVI per ogni giornata di rilevamento. L'obiettivo è quello di valutare l'effetto della vegetazione urbana sulle temperature, verificando se l'NDVI, che riflette la densità di vegetazione, può essere correlato con una diminuzione delle temperature rilevate.

Secondo il Grafico 12, è possibile distinguere i dati in base alla data di rilevazione secondo i diversi colori assegnati ai punti; inoltre, osservando la distribuzione dei punti, si nota lievemente che le temperature più alte tendono a concentrarsi in corrispondenza di NDVI più bassi (livello di vigoria basso o aree non vegetate), mentre le temperature diminuiscono con l'aumentare dell'NDVI.

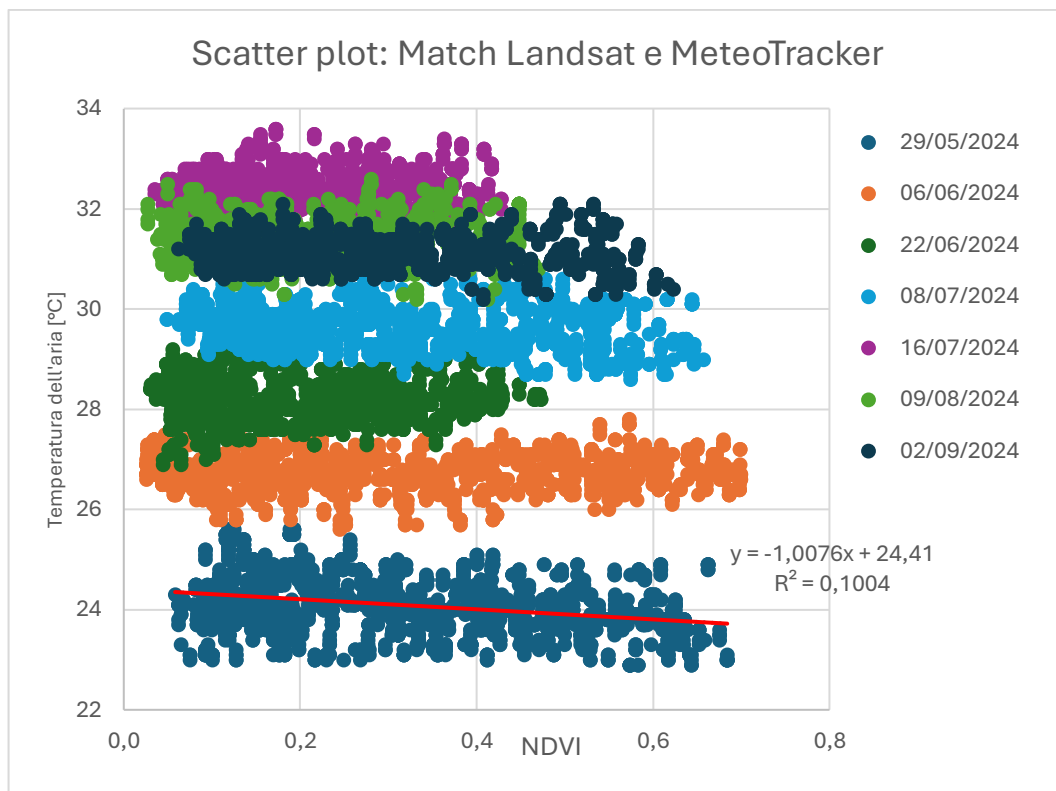


Grafico 12 Scatter Plot che evidenzia la relazione tra indice NDVI e temperatura dell'aria nelle giornate di passaggio dei satelliti Landsat

Per quanto riguarda il modello OLS, si è scelto di analizzare la giornata del 29 maggio, che visibilmente presentava una pendenza maggiore. In questo caso, il valore R^2 ottenuto è pari a 0,1 (Grafico 12), indicando una relazione moderata tra la temperatura dell'aria e l'indice NDVI, sebbene non particolarmente forte dal punto di vista statistico.

Il coefficiente di regressione relativo alla temperatura dell'aria, pari a -1, suggerisce che per ogni aumento di una unità dell'indice NDVI si prevede una diminuzione di circa 1°C nella temperatura dell'aria. Questo suggerisce una correlazione negativa relativamente bassa, tra la densità di vegetazione e la temperatura dell'aria, coerente con l'ipotesi che le aree più verdi abbiano un effetto mitigante sulle temperature.

4.4 *Analisi della copertura del suolo e delle temperature*

Dal confronto tra la temperatura dell'aria media estiva e l'uso del suolo sono stati ottenuti una rappresentazione cartografica (Figura 29 e 30), un Box Plot (Grafico 13) ed un Violin Plot (Grafico 14).

Considerando la rappresentazione cartografica di Figura 29, Le zone appartenenti alla seconda e terza classe di uso del suolo (superfici a prato permanente e forestale) sono associate a temperature più basse nell'intervallo di temperatura 26-30,6°C. D'altra parte, le aree come il Parcheggio di Piazza Savelli e la zona che parte dalla stazione fino alla Fiera di Padova, con superfici artificiali, rappresentate in grigio, mostrano temperature più elevate comprese tra 30,9 e 34°C, riflettendo l'effetto negativo delle superfici impermeabili che contribuiscono al surriscaldamento urbano.

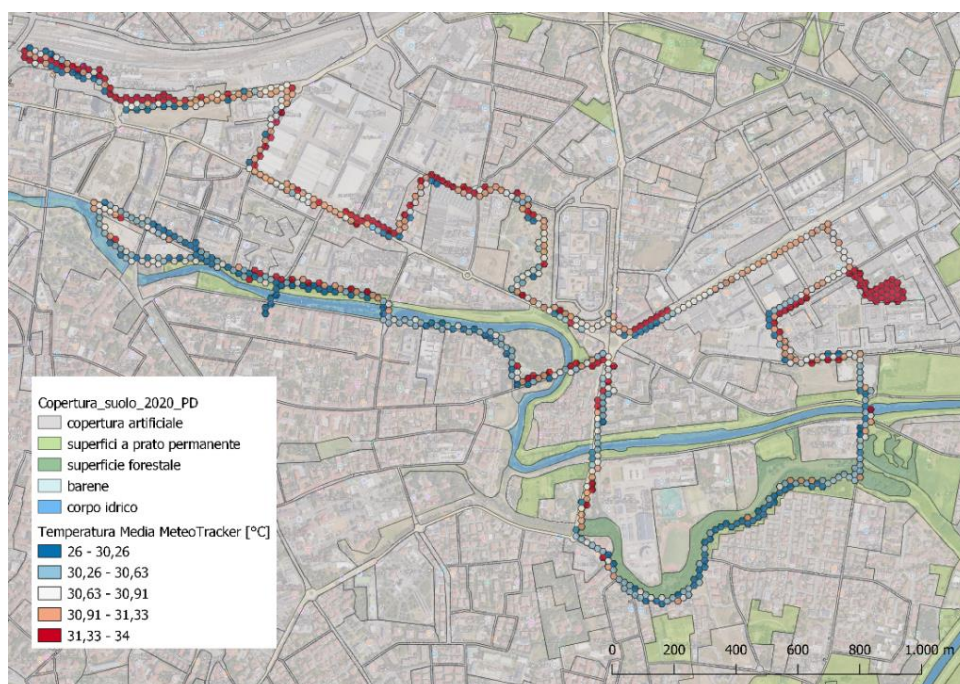


Figura 29 Valori di temperatura dell'aria media per ogni esagono [°C] a confronto con la Carta di Consumo del Suolo secondo il primo livello di classificazione.

Sempre dalla Figura 29 è osservabile però la presenza di valori termici bassi anche in corrispondenza delle aree impermeabili (come in Stazione Padova), questa anomalia è dovuta probabilmente alla presenza di viali alberati e di zone verdi in prossimità delle strade percorse, non segnalati nella carta del consumo di suolo, in grado di abbassare la temperatura dell'aria. Un ulteriore elemento da considerare è il possibile ritardo temporale nella misura effettuata dal dispositivo MeteoTracker.

Per facilitare la lettura dei dati si sono raggruppate le classi di copertura del suolo, appartenenti al primo livello di classificazione, 2 (ambienti semi-naturali), 3 (territori boscati), 4 (barene), 5 (zone umide e corpo idrico) come zone permeabili. Dal Box Plot (Grafico 13) creato successivamente alla semplificazione, è possibile distinguere i range di temperatura medi per ogni esagono relativi al "suolo impermeabile" ed al "suolo permeabile": per quanto riguarda la prima zona l'intervallo è compreso tra 29,4 °C e 32,2°C, mentre il secondo dato ha range compreso tra 29,5°C e 31,4 °C. Considerando i valori medi, la media di temperatura relativa alla zona non permeabile è di 30,8 °C, mentre quella relativa all'area permeabile è di 30,4 °C, circa mezzo grado inferiore. Inoltre, si osserva che le superfici impermeabili mostrano una maggiore variabilità di temperature, con outliers che raggiungono temperature anche di 34°C, indicando zone particolarmente

calde. Al contrario, le superfici permeabili presentano una distribuzione più concentrata, con meno outliers verso l'alto e temperature che non superano i 33°C.

È da considerare che il box plot è stato generato utilizzando i dati del primo livello di classificazione della copertura del suolo. In questa classificazione, alcune aree, come il Parco Europa, vengono considerate come "copertura artificiale," nonostante siano definite "zone verdi artificiali" nel secondo livello di classificazione (vedi Figura 30). Di conseguenza, alcuni valori anomali inferiori alla mediana nel box plot potrebbero rappresentare aree verdi, anche se classificate come "copertura artificiale" secondo il primo livello di classificazione.

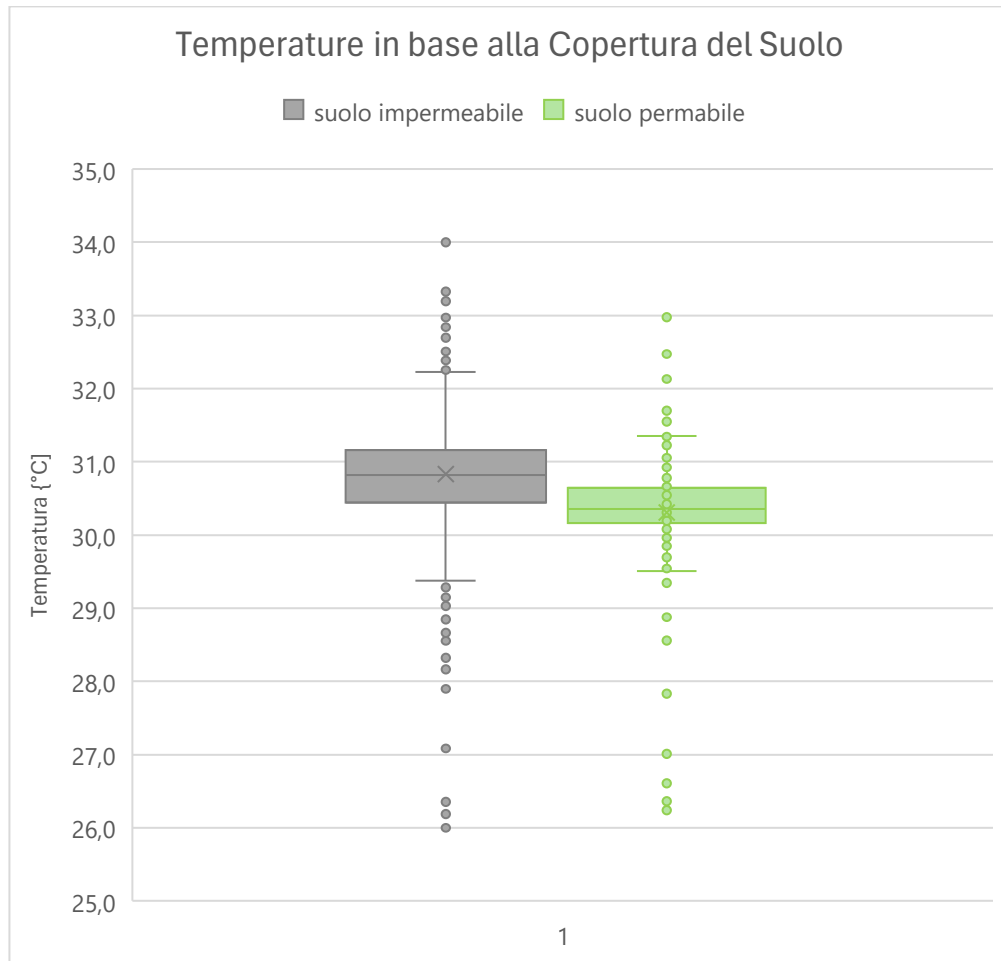


Grafico 13 Box Plot di confronto: distribuzione delle temperature in base alla copertura del suolo

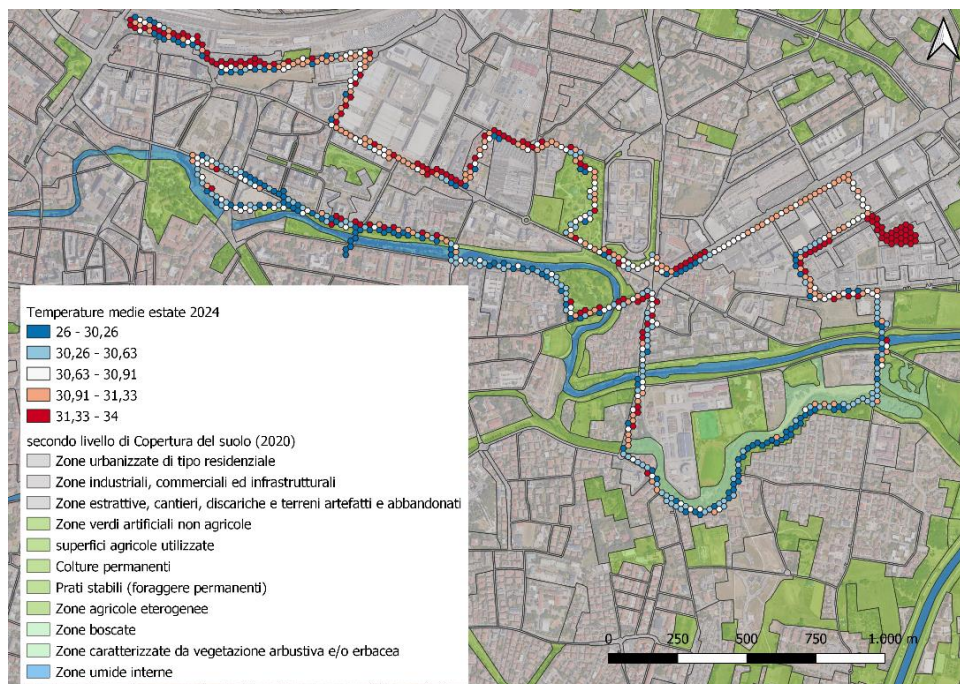


Figura 30 Valori di temperatura dell'aria media per ogni esagono [°C] a confronto con la Carta di Consumo del Suolo (secondo livello di classificazione).

Attuando un'analisi più approfondita, tramite il Violin Plot (Grafico 14) relativo alla misurazione delle temperature medie estive per ogni esagono; permette la visualizzazione dettagliata della distribuzione delle temperature nelle diverse categorie, secondo il primo livello di classificazione della copertura del suolo, evidenziando la densità delle misurazioni e la loro variabilità.

In tale grafico, oltre a quanto è stato già osservato in merito al Grafico 13, si nota che le zone impermeabili (classe 1) è presente un valore ricorrente intorno ai 30,9°C, risultante dal "gonfiore" del violino. Tuttavia, la forma del violino appare più allungata rispetto a quella delle zone permeabili, le cui misurazioni più frequenti variano tra i 30,2°C e i 30,6°C.

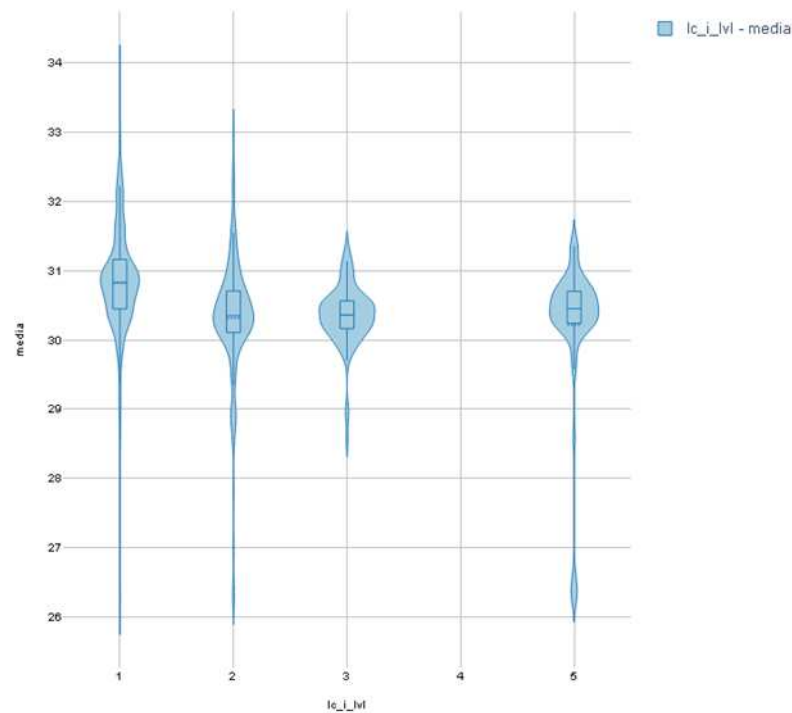


Grafico 14 Violin Plot, confronto tra uso del suolo (suolo impermeabile (1) e suolo permeabile (2,3,5)) e temperatura dell'aria [°C].

In generale è possibile affermare che entrambi i grafici, Box Plot e Violin Plot, individuano le temperature maggiori in corrispondenza del suolo impermeabile (classe 1), mentre i valori inferiori sono stati misurati in corrispondenza del suolo permeabile (classe 2,3,5). Per quanto riguarda gli intervalli di temperatura, è possibile osservare che la rappresentazione relativa alle zone impermeabili copre un range più ampio, questo è probabilmente dovuto all'effetto di mitigazione legato alla presenza di vegetazione in prossimità delle aree impermeabilizzate. Un'altra considerazione generale che si può fare riguarda il grafico a violino: si può notare che, nelle aree permeabili soprattutto della classe 3 e 5, il grafico risulta più panciuto in corrispondenza del valore medio. Questa caratteristica evidenzia che per i territori permeabili le condizioni termiche sono più concentrate attorno ad uno stesso valore, mentre per quelli impermeabili, anche se presente un valore ricorrente superiore rispetto a quello delle zone permeabili, le temperature sono più variabili.

4.5 *Impatto delle condizioni meteorologiche sulle temperature*

Per distinguere l'effetto delle condizioni meteorologiche sulle temperature rilevate, sono stati separati i giorni soleggiati da quelli caratterizzati da condizioni meteorologiche variabili (nuvolosi o parzialmente nuvolosi). Per ciascun esagono della griglia di monitoraggio, è stata calcolata la media delle temperature rilevate nei giorni di bel tempo e, separatamente, la media delle temperature nei giorni di brutto tempo. Successivamente, è stata determinata la differenza tra queste due medie, generando il valore di ΔT per ciascun esagono, che riflette la variazione termica media tra le due condizioni meteorologiche. La Figura 31 mostra la distribuzione spaziale del ΔT ottenuto, utilizzando il colore per rappresentare le differenze: Gli esagoni colorati in rosso ($3,54 - 8,81^{\circ}\text{C}$) rappresentano un ΔT positivo, indicando che le temperature medie erano superiori durante le giornate soleggiate. Al contrario, gli esagoni in blu mostrano un ΔT negativo, evidenziando temperature medie più alte nei giorni con condizioni meteorologiche avverse. Questa distribuzione suggerisce che le aree in blu possiedano una maggiore stabilità termica, mantenendo temperature elevate indipendentemente dalle condizioni atmosferiche.

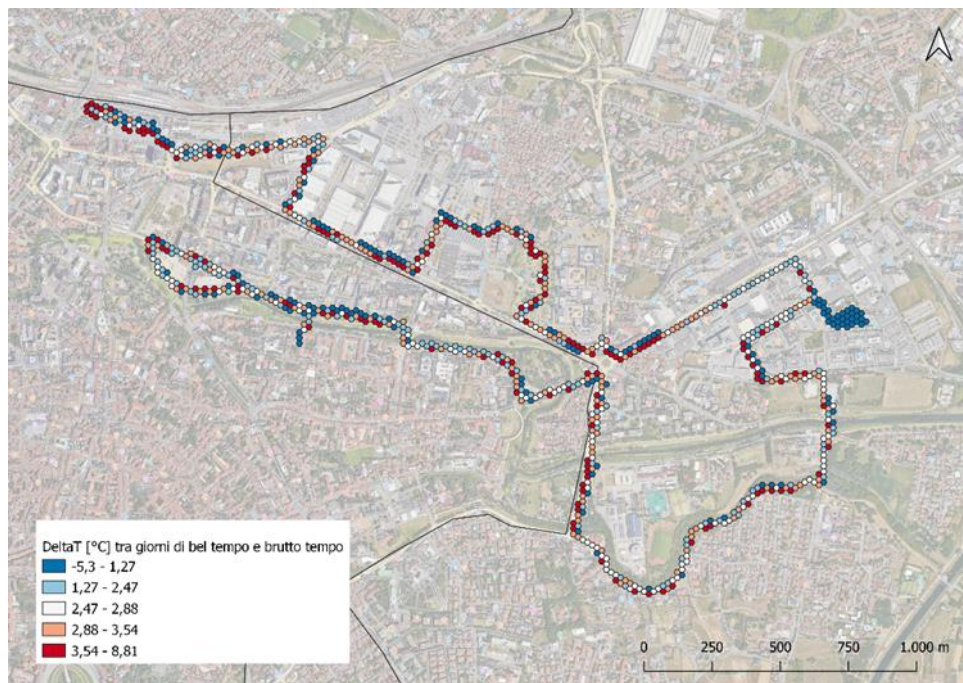


Figura 31 Valori di differenza di temperatura tra giorni con differenti condizioni meteorologiche

È stata condotta un'analisi per valutare la possibile correlazione tra ΔT e l'NDVI medio, calcolato a partire dalle giornate di rilevamento del passaggio Landsat. Dalla rappresentazione grafica, in Figura 32, emerge che i valori di ΔT sono piuttosto variabili; tuttavia, l'area del parcheggio di Piazza Savelli mostra principalmente esagoni colorati in blu, con valori di ΔT compresi tra $-5,3$ e $1,27$, associati a un basso indice NDVI. Anche nella zona della Fiera si osservano, seppur in misura minore, alcuni esagoni con valori negativi di ΔT , anch'essi indicati dalla colorazione blu.

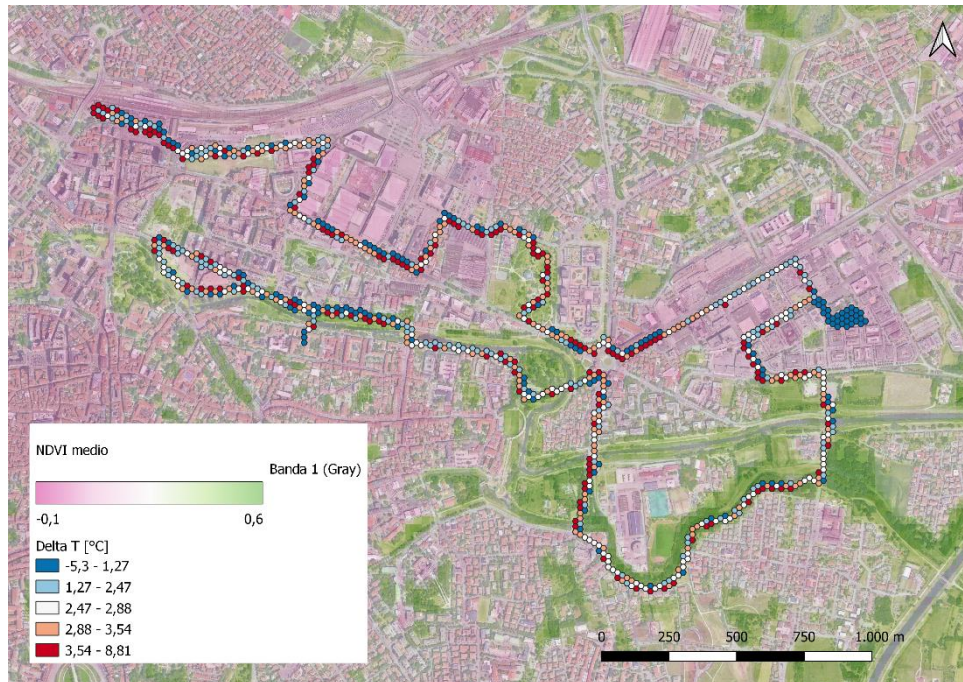


Figura 32 Valori di differenza di temperatura dell'aria media per ogni esagono [°C] a confronto con l'indice NDVI medio.

La creazione dello Scatter Plot (Grafico 15) è stata realizzata attraverso vari passaggi. In primo luogo, per ciascun esagono contenente la differenza di temperatura (ΔT), è stato associato l'indice NDVI medio, calcolato come media dei valori NDVI rilevati nei giorni di monitoraggio tramite dati Landsat. Questo processo ha permesso di ottenere, per ogni esagono, sia il valore di ΔT che il relativo valore NDVI medio, come illustrato in Figura 33.

A partire da questi dati, è stato possibile costruire lo Scatter Plot (Grafico 15), che mette a confronto la differenza di temperatura tra le diverse condizioni meteorologiche e l'indice di vigoria della vegetazione.

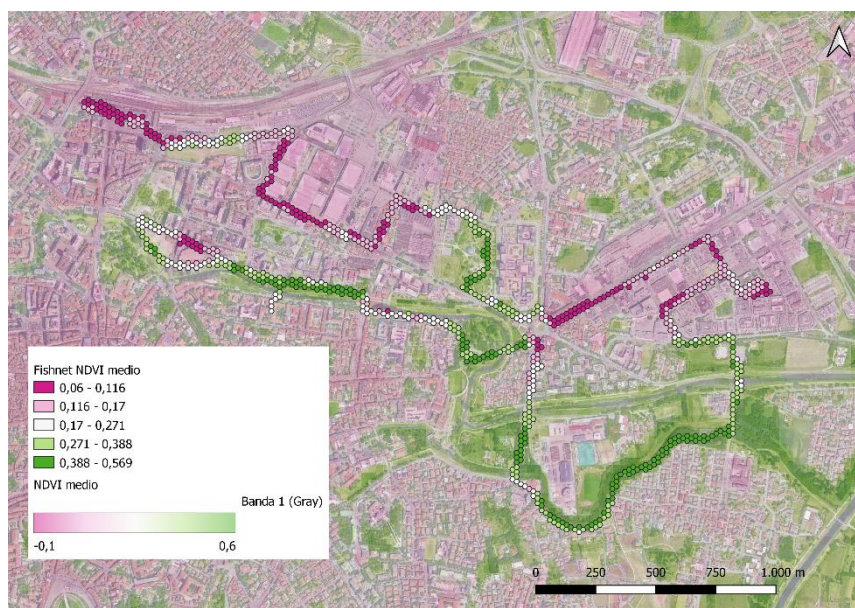


Figura 33 Fishnet contenente l'indice NDVI medio per ogni esagono ottenuta dal confronto tra la fishnet del delta T e l'NDVI medio

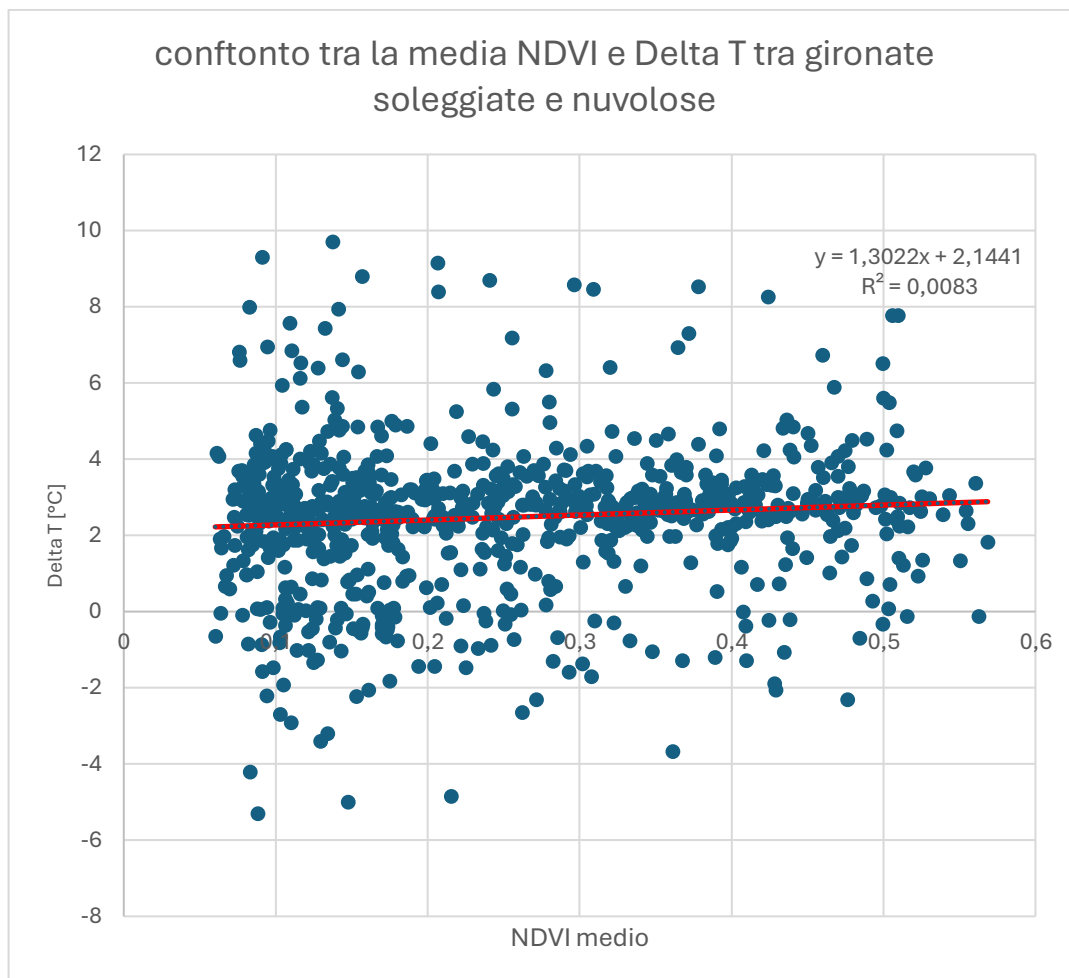


Grafico 15 Scatter Plot: Relazione tra la differenza di temperatura nelle diverse condizioni meteorologiche e l'indice NDVI medio.

L'analisi tramite il modello di regressione lineare semplice (OLS) mostra che la retta di regressione ha una pendenza ridotta, con un valore di R^2 è circa 0,01. Questo valore di R^2 indica che l'NDVI spiega solo una minima parte della variabilità del ΔT , suggerendo una correlazione molto debole tra l'NDVI medio e la differenza di temperatura tra le giornate soleggiate e nuvolose.

Osservando, invece, il coefficiente della retta di regressione (β), notiamo che è 1,3. Questo implica che, per ogni incremento unitario dell'NDVI medio (0,1), il modello prevede un aumento di 1,3°C nella differenza di temperatura tra le diverse condizioni meteorologiche. Questo suggerisce una correlazione positiva: all'aumentare dell'NDVI, la differenza di temperatura tende ad aumentare. Sebbene il risultato non sia statisticamente significativo, è possibile affermare che l'NDVI contribuisce parzialmente a spiegare la variabilità del ΔT . Tuttavia, è probabile che altri fattori ambientali o urbani influenzino anch'essi il fenomeno, rendendo l'NDVI solo uno dei diversi elementi che incidono sulla differenza di temperatura tra giornate soleggiate e nuvolose.

4.6 *Elaborazione e analisi dati ambientali*

Per comprendere l'influenza della vegetazione e delle superfici artificiali sulle temperature urbane estive, sono state condotte due analisi mirate. Il primo confronto ha riguardato la zona Fiera e il vicino Parco Europa, selezionati per valutare l'effetto della copertura verde sulla riduzione del calore. Il secondo ha interessato il parcheggio di Piazza Savelli e le aree limitrofe, per indagare se la scarsa presenza di vegetazione nel nuovo parcheggio abbia un'influenza sulla mitigazione termica. Questi due casi permettono di osservare come differenti caratteristiche ambientali possano incidere sul microclima urbano e offrire spunti per strategie di gestione del calore nelle aree cittadine.

ANALISI PARCO EUROPA:

Facendo riferimento Figura 25, che rappresenta il percorso completo con le temperature medie per ogni esagono dell'estate 2024, filtrati per garantire che ogni esagono contenesse almeno dieci punti di rilevamento, si è scelto di concentrare l'analisi sulla zona Fiera e sul Parco Europa, poiché questi due ambiti presentavano visivamente valori di temperatura differenti. La rappresentazione grafica (Figura 36) mostra chiaramente che, nel Parco Europa, sono presenti temperature mediamente più basse, con un intervallo predominante tra 30,7 e 30,9 °C. Questo contrasto visivo e quantitativo suggerisce che l'area del Parco Europa, grazie alla presenza di vegetazione e superfici permeabili, mantenga condizioni termiche più fresche rispetto alla zona Fiera, caratterizzata da superfici artificiali che tendono ad accumulare maggiormente il calore, come è possibile osservare dalla relazione con la copertura del suolo (secondo livello di classificazione).

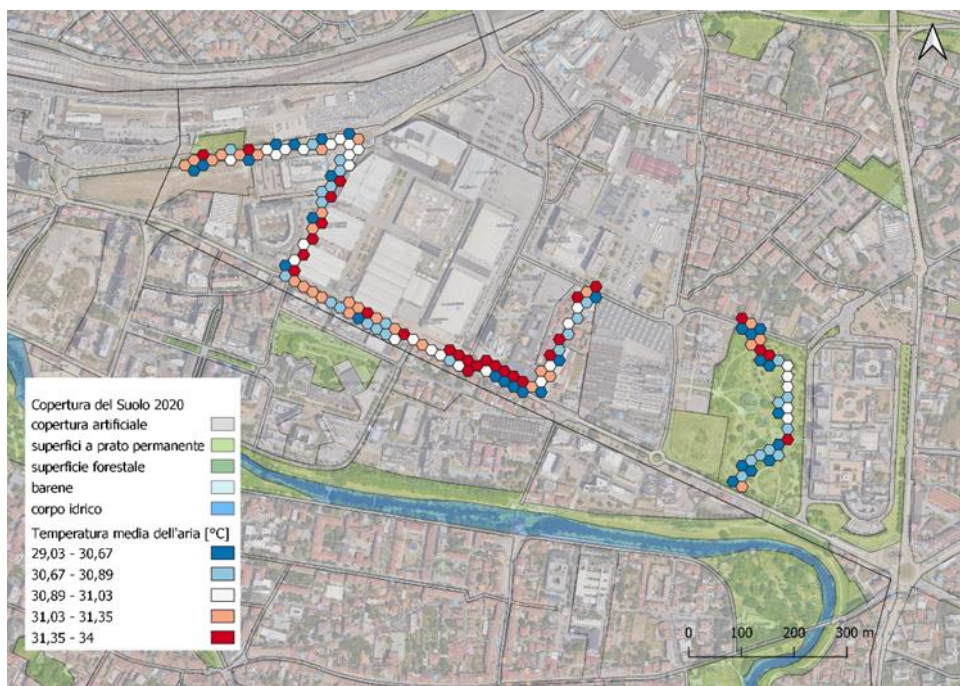


Figura 34 Valori della temperatura media dell'aria [°C] in relazione alla copertura del suolo (secondo livello di classificazione)

Successivamente è stato creato un Box Plot (Grafico 16) che confrontasse le due aree urbane distinte: la zona Fiera (in rosso) e il Parco Europa (in verde). La mediana per la zona Fiera è 31°C, leggermente più alta rispetto al Parco Europa che è appena sotto i 30,8°C. La differenza di Temperatura tra le due zone è di circa $[0,2 \pm 0,09]$ °C.

Le temperature massime registrate, come outliers, in Fiera raggiungono i 34°C, indicando giornate particolarmente calde. Parco Europa, invece, ha temperature massime che non

superano i 32,8°C. Questo evidenzia come l'area della Fiera presenti temperature mediamente più alte e con una maggiore variabilità rispetto a Parco Europa, che sembra beneficiare di condizioni più stabili e temperature più moderate con un intervallo compreso tra 30,5°C e 31°C, probabilmente grazie alla presenza di vegetazione e superfici permeabili.

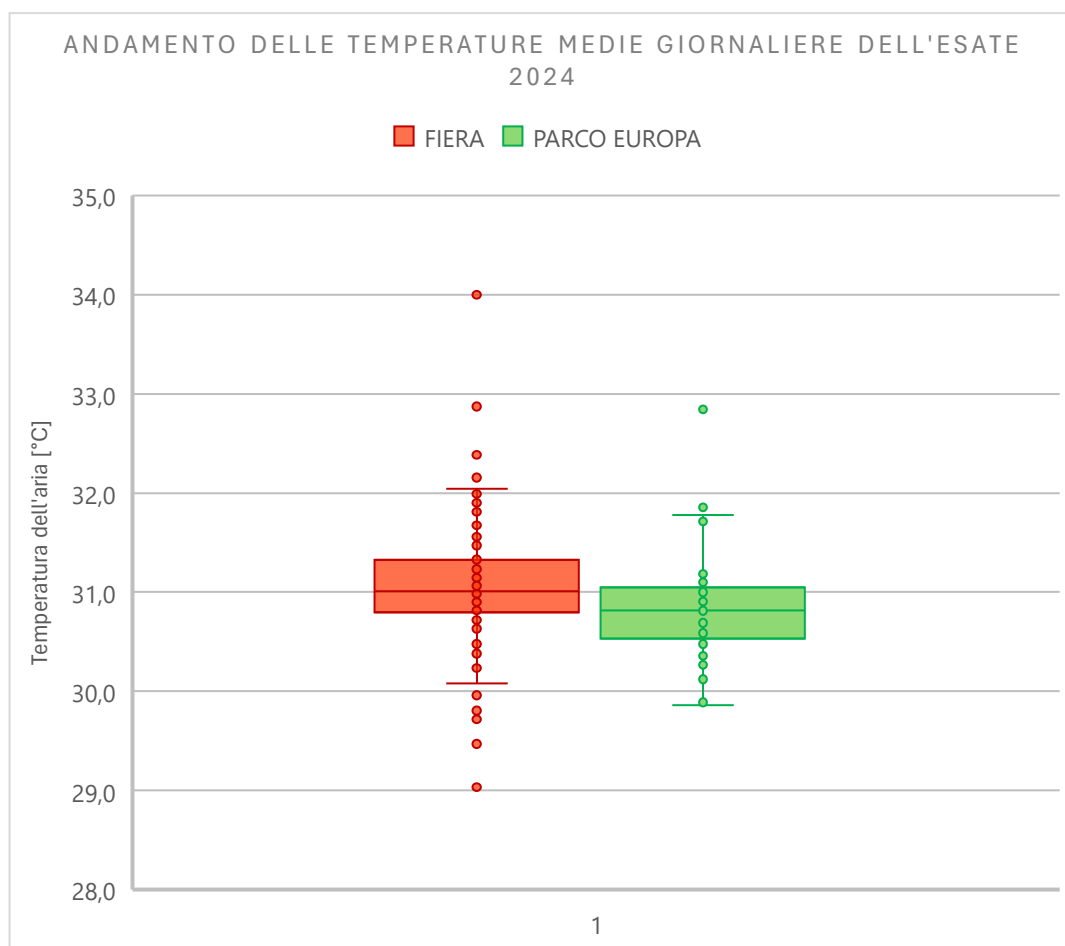


Grafico 16 Confronto dell'andamento delle temperature medie tra Parco Europa e Fiera durante il periodo di rilevamento estivo

Per fornire una visione complessiva dell'andamento delle temperature medie giornaliere nelle aree di Parco Europa e Fiera, è stato creato un grafico a linee (Grafico 17). Questo grafico consente di visualizzare chiaramente l'andamento giornaliero e le differenze di temperatura tra le due zone.

Le due curve mostrano un andamento simile, suggerendo che entrambe le aree rispondono in modo parallelo alle condizioni meteorologiche generali. Tuttavia, la linea rappresentante la zona Fiera (in rosso) tende a posizionarsi leggermente più in alto rispetto a quella del Parco Europa (in verde), specialmente nei giorni con temperature più elevate. Un esempio significativo è l'11 luglio 2024, la giornata più calda registrata durante i rilevamenti, in cui la curva della Fiera si discosta maggiormente da quella del Parco Europa, con una differenza di 0,7 °C tra le due aree. Una possibile spiegazione è che l'area della Fiera tenda ad accumulare più calore rispetto al Parco Europa nelle giornate più calde. Questo comportamento conferma che la zona Fiera, con superfici impermeabili e scarsa vegetazione, registra temperature mediamente più elevate rispetto al Parco Europa, che beneficia della presenza di un'ampia copertura verde capace di moderare l'aumento termico.

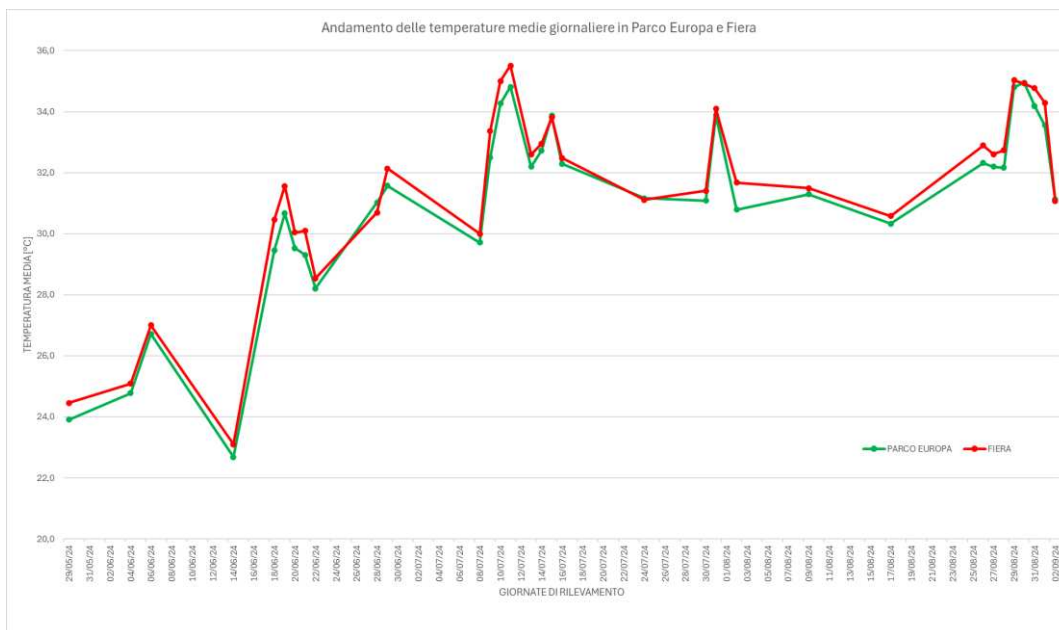


Gráfico 17 Distribuzione delle temperature medie giornaliera nelle diverse aree durante l'estate 2024

ANALISI PIAZZA SAVELLI:

Piazza Savelli, secondo la rete civica del Comune di Padova, rappresenta un significativo intervento di riqualificazione urbana, concepito per ridurre l'effetto dell'isola di calore e attenuare gli impatti di eventi climatici estremi. Questo progetto integra soluzioni innovative per migliorare il microclima urbano. L'analisi di questa area, quindi, consente di valutare l'efficacia delle strategie applicate, evidenziando i vantaggi o svantaggi in termini di abbassamento della temperatura.



Figura 35 Progetto di riqualificazione urbana di Piazza Savelli (inaugurazione tenuta il 9 aprile 2024)

Per quanto riguarda la rappresentazione cartografica, in Figura 38, del caso relativo a Piazza Savelli, area cerchiata in rosso, si può notare che già all'interno del parcheggio l'intervallo si attende dai 31,3°C fino al massimo di 32,8°C; nelle vie laterali (Via Giovanni Savelli e Via della Croce Rossa) invece la temperatura media registrate nell'estate 2024 risulta essere inferiore in un intervallo che si aggira dai 28,7 a 31,3°C, con dei picchi di circa 32°C alla Fine di via della Croce Rossa. Questa analisi è stata condotta all'interno della stessa classe di copertura del suolo, appartenente alla copertura artificiale, come osservabile in Figura 38.

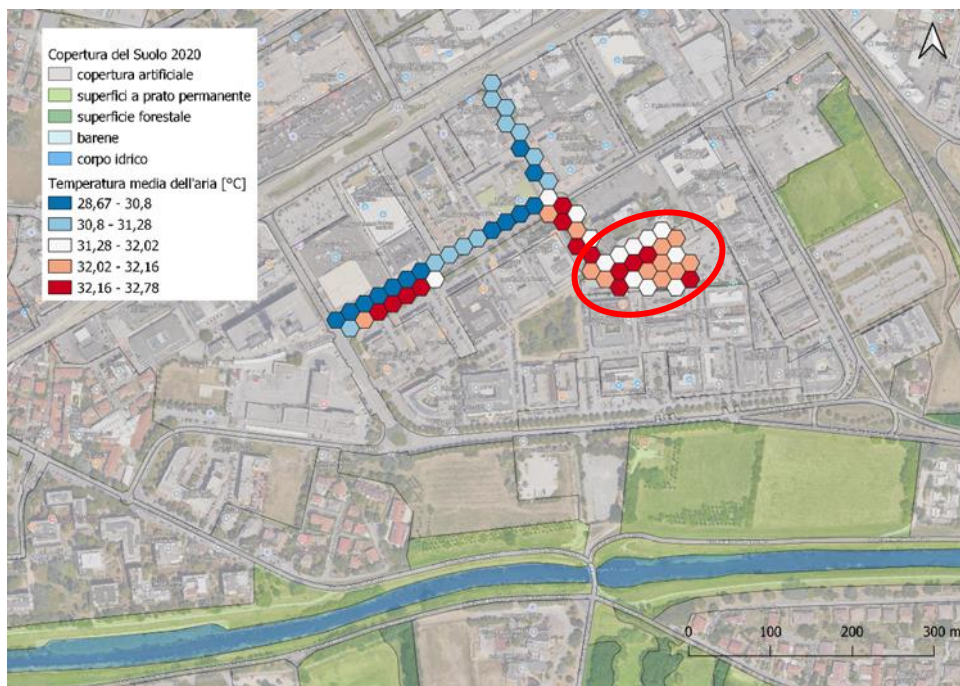


Figura 36 Valori della temperatura media dell'aria [°C] in relazione alla copertura del suolo (primo livello di classificazione)

A partire dalla rappresentazione grafica della Figura 38, è stata effettuata la creazione del Box Plot (Grafico 18), dal quale emerge che le temperature registrate nel Parcheggio Piazza Savelli sono distribuite su un intervallo ristretto, compreso tra 31,5°C e 32,5°C, con una mediana attorno a $[32,0 \pm 0,3]$ °C.

Al contrario, l'area esterna a Piazza Savelli mostra una distribuzione più ampia, che varia da circa 30,3°C a 32,8°C (intervallo di 4,11°C), con una mediana inferiore, pari a $[31,2 \pm 0,8]$ °C. La differenza tra le mediane delle due aree risulta quindi di quasi 1 grado (0,7°C). Si osserva anche un outlier a 28,9°C, probabilmente attribuibile a condizioni meteorologiche particolari al momento della rilevazione, come ventilazione elevata o nuvolosità, che potrebbero aver temporaneamente abbassato la temperatura rispetto alla media delle altre giornate.

I dati evidenziano che nonostante le misure adottate, le temperature rimangono elevate e costanti all'interno del parcheggio Piazza Savelli, probabilmente a causa delle superfici che lo caratterizzano, suggerendo che il parcheggio non stia raggiungendo pienamente gli obiettivi di sostenibilità in termini di riduzione del calore urbano.

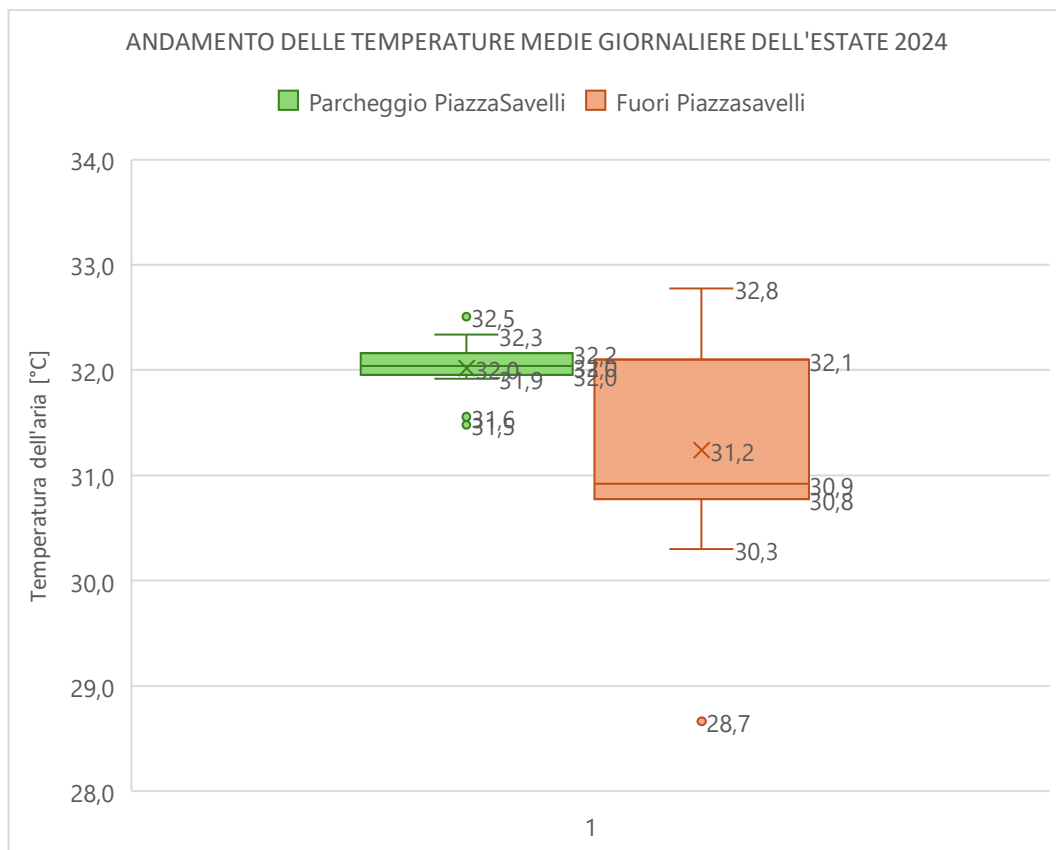


Grafico 18 Confronto dell'andamento delle temperature medie tra il parcheggio Piazza Savelli e le zone limitrofe durante il periodo di rilevamento estivo

Per fornire una visione complessiva dell'andamento delle temperature medie giornaliere in quest'area di studio, è stato elaborato un grafico a linee (Grafico 19). Questo grafico permette di visualizzare l'andamento giornaliero e le differenze di temperatura tra il parcheggio di Piazza Savelli (in verde) e le aree esterne (in arancione), comprendenti Via Giovanni Savelli e Via della Croce Rossa.

In generale, si osserva che le temperature rilevate all'esterno del parcheggio tendono a essere superiori rispetto a quelle interne, suggerendo un potenziale effetto di mitigazione delle temperature nel parcheggio, contrariamente a quanto emerso dal Box Plot (Grafico 18). Tuttavia, in alcune giornate, indicate in viola nel Grafico 19, le temperature all'interno di Piazza Savelli risultano più elevate, raggiungendo una differenza di temperatura massima di $-0,4^{\circ}\text{C}$ il 28 agosto. Inoltre, si nota che le differenze medie di temperatura tra le due aree sono contenute, intorno a $0,1^{\circ}\text{C}$, indicando quindi variazioni minime.

In sintesi, il parcheggio mantiene temperature elevate e stabili, senza ridurle in modo significativo rispetto alle aree circostanti. I picchi di temperatura rilevati in alcune giornate, attribuibili a condizioni meteorologiche particolari, si manifestano sia all'interno che all'esterno del parcheggio, evidenziando un riscaldamento in entrambe le aree durante specifiche giornate.

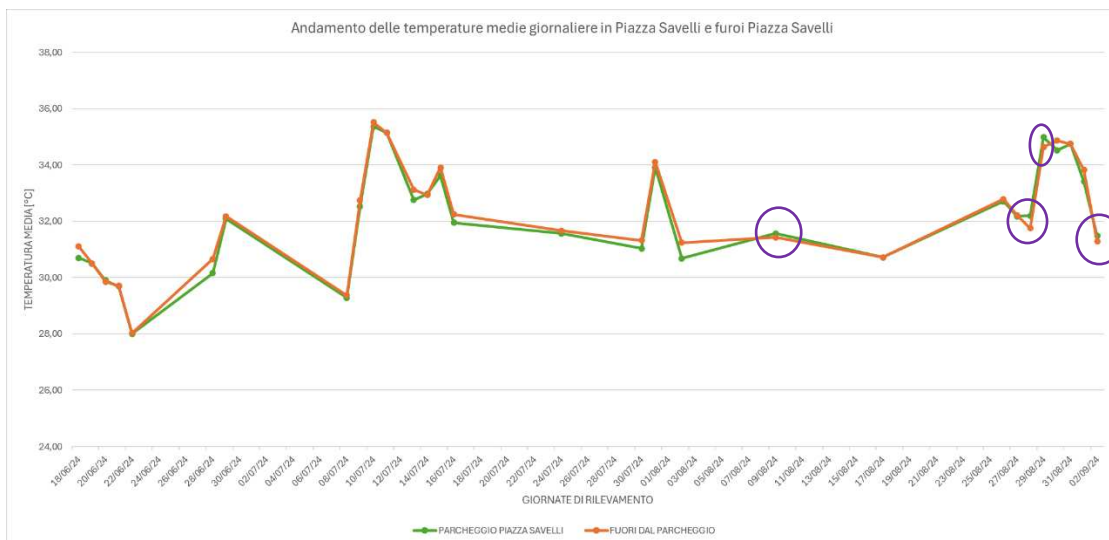


Grafico 19 Distribuzione delle temperature medie giornaliere nelle diverse aree durante l'estate 2024

4.7 Il ruolo delle aree verdi nella mitigazione del calore urbano

In questo paragrafo, vengono confrontate diverse tipologie di aree verdi lungo il percorso di monitoraggio per valutare l'impatto del verde sul raffrescamento urbano, con particolare attenzione alle differenze di temperatura tra le aree urbane non verdi e le zone verdi caratterizzate da un basso livello di urbanizzazione. Sono state analizzate tre aree: un parco (Parco Europa), un prato (Prato Tito Livio) e un parcheggio "sostenibile" (Piazza Savelli), con l'obiettivo di evidenziare come le temperature siano influenzate dal tipo di copertura.

La Figura 39 illustra le aree prese in esame lungo il percorso di monitoraggio, includendo Via Gattamelata e la zona dei Navigli, caratterizzate da una significativa presenza di vegetazione arborea. Le temperature rilevate in queste aree sono confrontate con quelle dell'intero percorso, che si estende attraverso diverse tipologie di copertura del suolo.

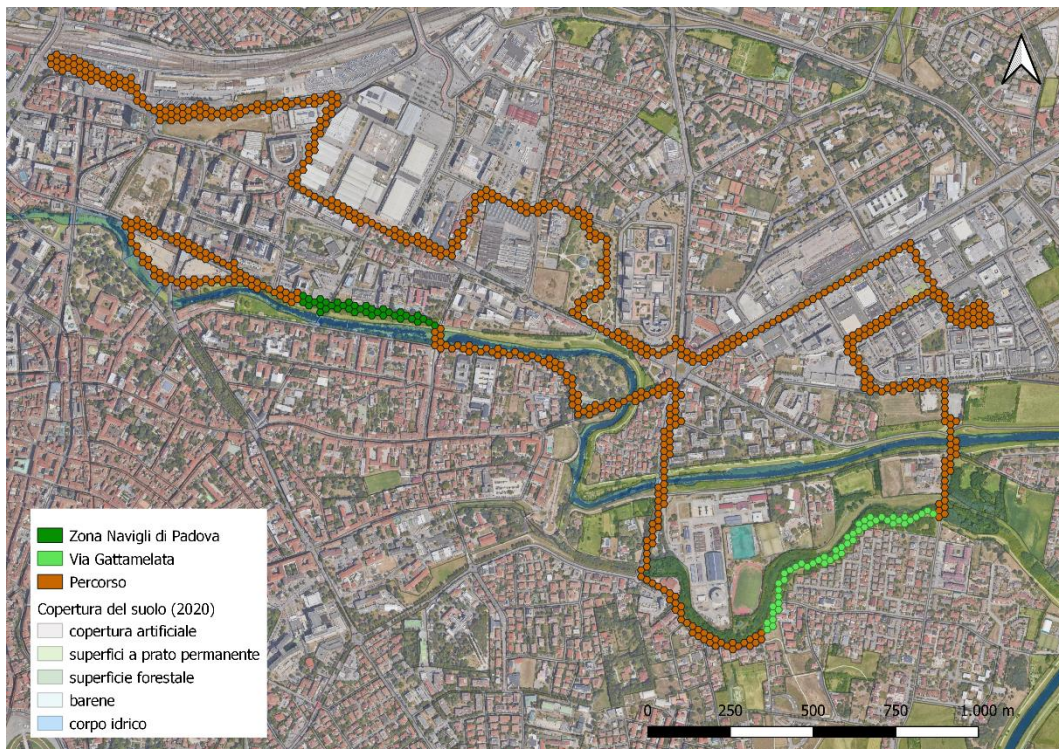


Figura 37 Percorso di rilevamento a Padova, evidenziando le aree verdi di Via Gattamelata e della zona dei Navigli, con classificazione della copertura del suolo secondo il Corine Land Cover (2020).

I dati sono stati sintetizzati attraverso un Box Plot (Grafico 20), che rappresenta le temperature medie, per ogni esagono, registrate nelle diverse aree durante i mesi estivi. Nel grafico, le aree verdi (Via Gattamelata e Navigli) sono indicate rispettivamente in verde chiaro e verde scuro, mentre il percorso completo è rappresentato in arancione.

Dal grafico 20 si osserva che la distribuzione delle temperature lungo l'intero percorso presenta una maggiore variabilità rispetto a Via Gattamelata. La mediana delle temperature rilevate sull'intero percorso è pari a $[30,9 \pm 3]$ °C, con un intervallo di valori più ampio rispetto alle aree verdi considerate. Questa maggiore variabilità può essere attribuita alla presenza di superfici eterogenee lungo il percorso, che includono sia coperture artificiali sia aree verdi.

In particolare, la mediana delle temperature di Via Gattamelata, pari a $[30,2 \pm 3]$ °C, risulta inferiore di 0,6 °C rispetto a quella dell'intero percorso. Questa differenza sottolinea il potenziale effetto mitigante della vegetazione e delle superfici permeabili presenti in quest'area, che favoriscono condizioni più stabili e moderate rispetto alle aree caratterizzate da coperture artificiali.

Analogamente, la zona dei Navigli, presenta una mediana di $[30,4 \pm 2,8]$ °C, con una differenza di 0,2 °C rispetto a Via Gattamelata. Entrambe le aree verdi mostrano una distribuzione delle temperature più concentrata rispetto all'intero percorso e valori limite inferiori, suggerendo una minore esposizione a temperature estreme.

Infine, Via Gattamelata evidenzia un intervallo di temperature compresa tra 28,6 e 31,3 °C, il che indica una maggiore stabilità termica rispetto sia alla zona dei Navigli (26,4 - 32,5 °C) sia all'intero percorso (26,4 - 34 °C). La distribuzione più ristretta e la minore presenza di valori estremi, confermano una maggiore stabilità termica in Via Gattamelata, suggerendo che la presenza di superfici vegetate e permeabili contribuisce non solo a ridurre la variabilità delle temperature, ma anche a limitare l'esposizione a valori estremi. Questi risultati supportano l'ipotesi che le aree verdi svolgano un ruolo mitigante nell'ambiente urbano, mantenendo condizioni termiche più miti.

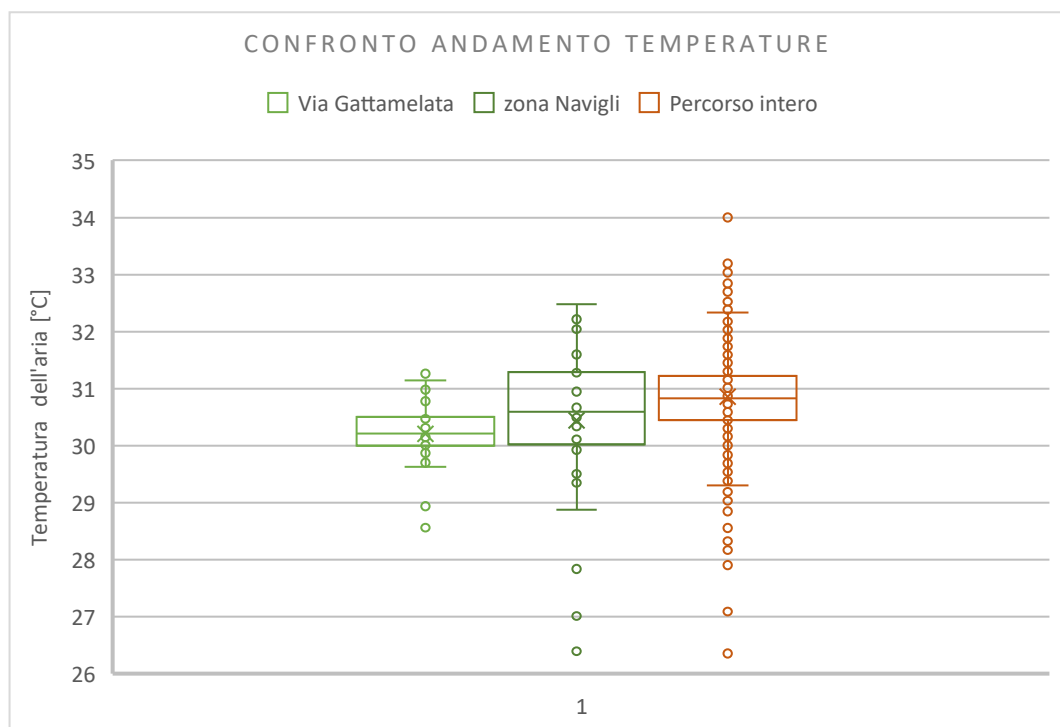


Grafico 20 Box Plot di confronto tra le temperature dell'aria registrate in Via Gattamelata, nella zona dei Navigli e lungo l'intero percorso.

L'analisi si è poi concentrata sul confronto tra le aree verdi antropizzate (parchi) e il parcheggio di Piazza Savelli. Come evidenziato nel Grafico 21, le mediane delle temperature nel Parco Tito Livio di $[30,5 \pm 3,2]$ °C e nel Parco Europa di $[30,9 \pm 3,2]$ °C risultano simili, con una differenza di 0,4. La mediana di Piazza Savelli, pari a $[32,0 \pm 1,8]$ °C, è invece nettamente più alta, di circa 2°C.

Nonostante la presenza di alcuni elementi verdi, Piazza Savelli è caratterizzata da ampie superfici impermeabili, che contribuiscono a temperature più elevate rispetto a quelle rilevate nei parchi Tito Livio ed Europa. Questi ultimi evidenziano una capacità superiore di mantenere temperature più basse, probabilmente grazie alla densità vegetativa superiore e alla presenza di superfici permeabili, tipiche delle aree progettate e utilizzate come parchi. Inoltre, osservando la variabilità dei dati, si nota che quella dei parchi è maggiore rispetto a quella del parcheggio, che presenta un intervallo stabile tra 31,9 e 32,5 °C.

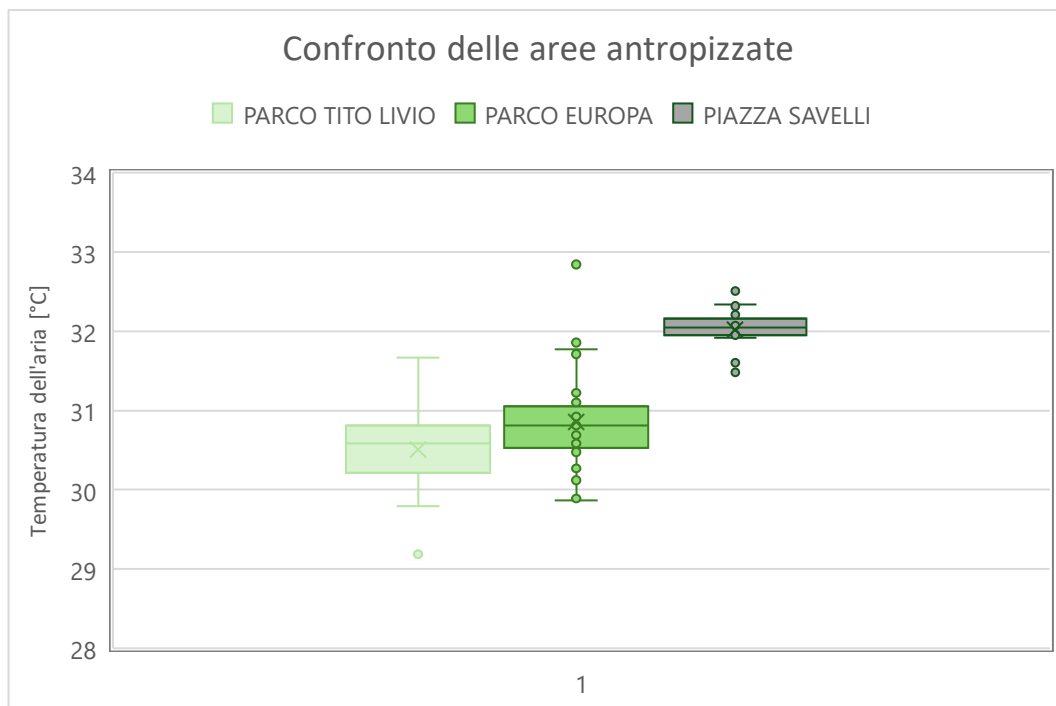


Grafico 21 Box Plot delle temperature dell'aria registrate in tre aree antropizzate: Parco Tito Livio, Parco Europa e Piazza Savelli.

Nel contesto dell'analisi delle aree verdi urbane di Padova, è stato condotto un ulteriore approfondimento attraverso lo studio delle specie vegetali raccolte e osservate all'interno del parcheggio di Piazza Savelli.

Nella seguente tabella 8 sono riportate le specie catalogate attraverso la raccolta e la creazione di un erbario, accompagnate dalle principali caratteristiche ecologiche e dalle necessità vitali. Questa analisi è fondamentale per comprendere il ruolo potenziale delle specie identificate nella mitigazione del calore urbano e per valutare la loro adattabilità alle condizioni ambientali locali.

Tabella 8 Specie appartenenti al parcheggio Piazza Savelli

	GENERE	SPECIE	NOME COMUNE	FAMIGLIA	DATA DI RACCOLTA
1	<i>Liriodendron</i>	<i>tulipifera</i>	Albero dei tulipani	Magnoliaceae	13/07/2024
2	<i>Quercus</i>	<i>ilex</i>	Leccio	Fagaceae	13/07/2024
3	<i>Tilia</i>	<i>x europaea L.</i>	Tiglio comune	Tiliaceae	13/07/2024

CARATTERISTICHE:

1. *Liriodendron tulipifera L.* - Albero dei tulipani

Noto anche come Albero dei Tulipani, è una specie originaria del Nord America appartenente alla famiglia delle Magnoliaceae. Può raggiungere altezze notevoli (fino a 50 metri) e viene apprezzato per la sua crescita rapida e la resistenza a parassiti. Presenta foglie ampie (lunghe anche 10-15 cm), alterne con quattro lobi distintivi.

È una specie che preferisce terreni ben drenati, leggermente acidi e ricchi di sostanze nutritive. Tollera sia il pieno sole sia l'ombra parziale e cresce bene in climi temperati, pur soffrendo in condizioni di siccità prolungata.



Figura 38 foto scattata il 20/09/2024, esempio di *Liriodendron tulipifera* L. in Piazza Savelli

2. *Quercus ilex* L. – Leccio

Comunemente chiamata Leccio, è una quercia sempreverde mediterranea della famiglia delle Fagaceae, diffusa in ambienti mediterranei aridi. Ha una crescita lenta ma una lunga durata di vita e una grande tolleranza a suoli poveri. Un esempio di Leccio presente nell'area di studio si può osservare in Figura 41; presenta foglie alterne, dentato-spinose e di colore verde scuro sulla pagina superiore, con un tomento bianco inferiore. Si tratta di un adattamento della pianta alle condizioni aride, che contribuisce a limitare la perdita d'acqua.

Si adatta a vari tipi di suolo, ma preferisce terreni ben drenati e tollera bene la siccità grazie al suo apparato radicale profondo. Una volta sviluppata, la quercia tollera temperature elevate e periodi di siccità, risultando ben adattata a climi mediterranei.



Figura 39 foto scattata il 20/09/2024, esempio di *Quercus ilex L.* in Piazza Savelli

3. *Tilia x europaea L.* – Tiglio Comune

È largamente utilizzato per l'ombreggiamento urbano grazie alla sua adattabilità. Appartenente alla famiglia delle Tiliaceae, può crescere fino a 30 metri, con una chioma espansa. Un esempio di Tiglio presente nell'area di studio si può osservare in Figura 42; presenta foglie larghe cuoriformi e dentate, con una caratteristica colorazione verde scuro sopra e più chiara sotto. I frutti, ancora presenti nell'esemplare, sono arrotondati e pendenti.

Predilige terreni profondi e ben drenati, e prospera in posizioni soleggiate o parzialmente ombreggiate. Necessita di un buon apporto idrico, soprattutto nei primi anni di vita. Tollera climi temperati e resiste in ambienti urbani, anche se soffre in caso di caldo eccessivo o inquinamento.



Figura 40 foto scattata il 20/09/2024, esempio di Tilia tomentosa in Piazza Savelli

Le caratteristiche della copertura delle chiome, determinate dalla forma degli alberi, suggeriscono che le specie selezionate per Piazza Savelli possano contribuire efficacemente all'ombreggiamento. Tuttavia, per svilupparsi adeguatamente e raggiungere la massima efficacia ecologica, necessitano di cure mirate: l'Albero dei Tulipani e il Tiglio richiedono un'irrigazione regolare durante i primi anni, mentre il Leccio, per natura più resistente, tollera meglio periodi di siccità.

Durante la fase di raccolta del 13 luglio 2024 e i successivi monitoraggi di settembre, molti alberi in Piazza Savelli sono apparsi visibilmente indeboliti, probabilmente a causa dell'eccessiva esposizione solare e dello stress idrico, come mostrato nelle Figure 43 e 44. La scarsa presenza di vegetazione, tipica di un parcheggio, insieme alla carenza di manutenzione regolare, che non previene segni evidenti di disseccamento, come mostrato nelle Figure 45 e 46, compromette la capacità della vegetazione di offrire i benefici ecologici a lungo termine previsti dal progetto.



Figura 41 Stato di disseccamento di un esemplare arboreo di Quercus ilex L. in Piazza Savelli, 20 settembre 2024.



Figura 42 Stato di disseccamento di un esemplare arboreo in Piazza Savelli, 20 settembre 2024.



Figura 43 Condizioni della vegetazione nel parcheggio di Piazza Savelli, 13 luglio 2024



Figura 44 Condizioni della vegetazione nel parcheggio di Piazza Savelli, 20 settembre 2024

5 Conclusioni

Concludendo questo percorso di ricerca, è possibile trarre alcune considerazioni finali in merito alle analisi effettuate sui dati rilevati tramite *Sniffer Bike*. A seguito delle osservazioni e delle valutazioni fatte, si può affermare che le temperature più elevate, misurate tramite i due dispositivi, ricadono sempre in aree analoghe. Le zone più calde sono in zona Fiera, in corrispondenza di via Carlo Goldoni e via Niccolò Tommaseo; Viale Venezia da Piazzale della Stanga e Il parcheggio di Piazza Savelli. Tutte queste aree sono considerate, basandosi sulla copertura del suolo della città di Padova, zone a copertura artificiale e quindi con un basso parametro di albedo.

Al contrario, le temperature più basse sono state misurate in corrispondenza delle aree più esterne, precisamente nei pressi dei Navigli (lungo il Piovego), nel Parco Europa, e in via Gatta Melata. Volendo entrare più nel dettaglio, le temperature elevate sono rilevate in aree piene di asfalto, con edifici alti capaci di trattenere calore, inquinamento atmosferico dovuto alle attività antropiche, e una bassa ventilazione naturale. Invece le temperature più basse corrispondono a zone che costeggiano corsi d'acqua, nei parchi con all'interno un grande quantitativo di vegetazione tra alberi, arbusti ed erba.

Per quanto riguarda l'analisi comparativa con la carta di consumo del suolo emerge che, nelle aree impermeabili e densamente urbanizzate, le temperature sono generalmente più alte. Nelle aree considerate permeabili, infatti, le temperature risultano inferiori, con una differenza media di 0,5°C misurata durante l'estate tramite il dispositivo *MeteoTracker*®. Le temperature medie rilevate nelle aree più verdi, come Via Gattamelata e la zona dei Navigli, confermano l'effetto mitigante della vegetazione, con valori inferiori rispetto al percorso complessivo e una variabilità termica più contenuta. La mediana delle temperature di Via Gattamelata, zona permeabile caratterizzata da una buona copertura vegetale, si attesta infatti sui 30,2°C, risultando inferiore di circa 0,6°C rispetto alla mediana del percorso totale, che include diverse tipologie di copertura del suolo, e con un intervallo di temperatura più stabile (28,6-31,3°C).

Approfondendo l'analisi di aree specifiche, è emerso che la copertura vegetale ha un impatto decisivo nella moderazione delle temperature urbane. Parco Europa, grazie alla sua ampia estensione verde, mantiene temperature più basse e stabili rispetto alla zona Fiera, contraddistinta da superfici impermeabili e scarsa vegetazione; la differenza di temperatura tra queste due aree è di 0,2°C su base estiva. Inoltre, il confronto tra Piazza Savelli, caratterizzato da superfici impermeabili e ridotta copertura vegetale, e Parco Europa evidenzia una differenza di temperatura fino a 2°C tra le due zone, mostrando come la copertura vegetale incida fortemente sulle temperature.

Un ulteriore divario si osserva tra il parcheggio di Piazza Savelli e le aree circostanti, dove la differenza di temperatura è prossima a 1°C, segnalando come l'assenza di manutenzione e la scarsità di vegetazione compromettano l'efficacia delle misure progettuali contro il calore. L'indagine sulle specie presenti nel parcheggio ha inoltre rivelato che alcune, come il Leccio, risultano più tolleranti alla siccità; tuttavia, l'assenza di irrigazione regolare limita l'efficacia ecologica delle piante più vulnerabili.

Il confronto tra i dispositivi *OpenSeneca* e *MeteoTracker* ha rivelato differenze rilevanti nelle misurazioni. Entrambi i dispositivi hanno concordato nell'individuare l'11 luglio 2024 come la giornata più calda dell'estate, con *OpenSeneca* che ha registrato una temperatura media di circa 42,1 °C. *MeteoTracker*, invece, ha rilevato temperature più contenute intorno a 35,3°C. I dati aggregati dell'estate mostrano che *OpenSeneca* ha riportato una mediana delle temperature intorno a 36,8°C, mentre *MeteoTracker* ha una mediana inferiore, di circa 31°C. Questa differenza suggerisce che *OpenSeneca* potrebbe avere una maggiore sensibilità alle condizioni ambientali locali, sovrastimando le temperature rispetto a *MeteoTracker*. Dal confronto tra il valore LST, che rappresenta la condizione termica del suolo misurato dai due satelliti *Landsat*, e la temperatura dell'aria, è emerso che le due temperature non corrispondono nei valori. Tuttavia, dall'analisi dei grafici osserviamo una relazione tra i due parametri; infatti, quando la temperatura del suolo

aumenta, abbiamo anche un incremento della temperatura dell'aria misurata dai due dispositivi.

È opportuno sottolineare che la misura della temperatura è influenzata da molteplici fattori, che possono condizionare i risultati. Un esempio è la rilevazione del 22 giugno, che ha mostrato un valore basso di R^2 ; inoltre, il 16 luglio si è osservata una tendenza opposta, con una lieve diminuzione della temperatura del suolo all'aumentare della temperatura dell'aria.

Dunque, è emerso che l'uso delle immagini satellitari presenta limitazioni, in quanto forniscono una rappresentazione della temperatura superficiale non indagando la temperatura dell'aria, e offrono solo istantanee temporanee, disponibili in assenza di copertura nuvolosa. Ciò significa che, sebbene sia possibile stimare l'intensità delle isole di calore, mancano ulteriori dati qualitativi per giugnere alla valutazione del rischio e l'effettiva esposizione della popolazione al calore (Voelkel et al., 2016).

Focalizzandosi invece sull'indice NDVI, si rileva che, dalle analisi svolte, ad aree con una bassa quantità di vegetazione, quindi con un basso valore di NDVI, corrispondono temperature più elevate. Per contro, a parametri alti dell'indice NDVI, quindi con una grande presenza di vegetazione, corrispondono temperature meno elevate. Sulla base di queste analisi, si può quindi affermare che in presenza di aree verdi, corsi d'acqua, campi e parchi, la temperatura si abbassa; questa evidenza consente di rilevare che l'indice NDVI risulti rilevante al fine di determinare i valori della temperatura.

Questa ricerca evidenzia come una pianificazione urbana attenta e sostenibile, insieme all'uso di dispositivi di mobile mapping, possa contribuire in modo significativo alla mitigazione delle isole di calore urbane. Il coinvolgimento attivo dei cittadini, oltre a potenziare la raccolta di dati climatici su scala locale, favorisce una maggiore consapevolezza collettiva sugli effetti delle ondate di calore. Promuovere una gestione efficace delle aree verdi e delle superfici impermeabili risulta essenziale per rendere le città più resilienti, dimostrando che affrontare questo fenomeno richiede una risposta concreta e condivisa per un futuro urbano più vivibile e sostenibile.

6 Ringraziamenti

Vorrei esprimere la mia più sincera gratitudine al Professor Salvatore Pappalardo per avermi dato la fiducia di intraprendere questo progetto di tesi. Un grazie speciale va anche a Carlo Zanetti per i preziosi consigli nella gestione dei dati e per avermi guidato passo dopo passo nell'analisi. Non dimenticherò mai il loro aiuto e le loro competenze, che sono stati fondamentali per la riuscita di questo lavoro.

Un ringraziamento speciale ai miei genitori, che mi hanno sostenuto in ogni fase del mio percorso universitario, specialmente in quest'ultimo periodo così intenso. Grazie anche ai miei amici, per essere sempre stati presenti nei momenti più difficili e per avermi costantemente incoraggiato. Un grazie di cuore va a mio fratello Elis, per la sua pazienza nei miei confronti, e a tutte le persone che hanno contribuito in modo significativo a questo progetto: in particolare Roberto e Pietro.

7 Bibliografia

- Akbari, H., Pomerantz, M., & Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70(3), 295–310. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00089-X)
- Antognelli, S. (2018, maggio 29). *Indici di vegetazione NDVI e NDMI: istruzioni per l'uso. Agricoltus*.
- Antoniciello, G. (s.d.). *MeteoTracker, piccola ma promettente stazione meteo portatile*.
- Ballester, J., Quijal-Zamorano, M., Méndez Turrubiates, R. F., Pegenaute, F., Herrmann, F. R., Robine, J. M., Basagaña, X., Tonne, C., Antó, J. M., & Achebak, H. (2023). Heat-related mortality in Europe during the summer of 2022. *Nature Medicine*, 29(7), 1857–1866. <https://doi.org/10.1038/s41591-023-02419-z>
- Blandino, G. (2022). *Monitorare le polveri sottili, grazie alle bici: Sensori low cost più bikesharing per ampliare le rilevazioni sull'inquinamento in città*. <https://www.eurac.edu/it/magazine/monitoraggio-ambientale-polveri-sottili-bici>
- Buchin, O., Hoelscher, M.-T., Meier, F., Nehls, T., & Ziegler, F. (2016). Evaluation of the health-risk reduction potential of countermeasures to urban heat islands. *Energy and Buildings*, 114, 27–37. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.038>
- Burkart, K., Meier, F., Schneider, A., Breitner, S., Canário, P., Alcoforado, M. J., Scherer, D., & Endlicher, W. (2016). Modification of Heat-Related Mortality in an Elderly Urban Population by Vegetation (Urban Green) and Proximity to Water (Urban Blue): Evidence from Lisbon, Portugal. *Environmental Health Perspectives*, 124(7), 927–934. <https://doi.org/10.1289/ehp.1409529>
- Clementi, M. (2014). *Guida pratica all'erbario di studio*. Este Edition Srl.
- Conrad, C. C., & Hilchey, K. G. (2011). A review of citizen science and community-based environmental monitoring: Issues and opportunities. *Environmental Monitoring and Assessment*, 176(1–4), 273–291. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1582-5>
- Costanzo, V., Evola, G., & Marletta, L. (2016). Energy savings in buildings or UHI mitigation? Comparison between green roofs and cool roofs. *Energy and Buildings*, 114, 247–255. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.053>
- Debbage, N., & Shepherd, J. M. (2015). The urban heat island effect and city contiguity. *Computers, Environment and Urban Systems*, 54, 181–194. <https://doi.org/10.1016/j.compenurbsys.2015.08.002>
- Dickinson, J. L., Zuckerberg, B., & Bonter, D. N. (2010). Citizen Science as an Ecological Research Tool: Challenges and Benefits. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 41(1), 149–172. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102209-144636>

- Donaldson, J. S. (2009). Botanic gardens science for conservation and global change. *Trends in Plant Science*, 14(11), 608–613. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.08.008>
- Downs, R. R., Ramapriyan, H. K., Peng, G., & Wei, Y. (2021). Perspectives on Citizen Science Data Quality. *Frontiers in Climate*, 3, 615032. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.615032>
- European Citizen Science Association, E. (2015). *Dieci principi di Citizen Science. 1° settembre 2015*. European Citizen Science Association. <https://eu-citizen.science/resource/88>.
- Feng, J., Gao, K., Khan, H., Ulpiani, G., Vasilakopoulou, K., Young Yun, G., & Santamouris, M. (2023). Overheating of Cities: Magnitude, Characteristics, Impact, Mitigation and Adaptation, and Future Challenges. *Annual Review of Environment and Resources*, 48(1), 651–679. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112321-093021>
- Fraisl, D., Hager, G., Bedessem, B., Gold, M., Hsing, P.-Y., Danielsen, F., Hitchcock, C. B., Hulbert, J. M., Piera, J., Spiers, H., Thiel, M., & Haklay, M. (2022). Citizen science in environmental and ecological sciences. *Nature Reviews Methods Primers*, 2(1), 64. <https://doi.org/10.1038/s43586-022-00144-4>
- Gorsevski, V., Taha, H., Quattrochi, D., & Luvall, J. (1998). *Air Pollution Prevention Through Urban Heat Island Mitigation: An Update on the Urban Heat Island Pilot Project*.
- Grimmond, S. (2007). Urbanization and global environmental change: Local effects of urban warming. *The Geographical Journal*, 173(1), 83–88. https://doi.org/10.1111/j.1475-4959.2007.232_3.x
- Gunawardena, K. R., Wells, M. J., & Kershaw, T. (2017). Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. *Science of The Total Environment*, 584–585, 1040–1055. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.158>
- Hajat, S., Vardoulakis, S., Heaviside, C., & Eggen, B. (2014). Climate change effects on human health: Projections of temperature-related mortality for the UK during the 2020s, 2050s and 2080s. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 68(7), 641–648. <https://doi.org/10.1136/jech-2013-202449>
- Hatvani-Kovacs, G., Belusko, M., Skinner, N., Pockett, J., & Boland, J. (2016). Heat stress risk and resilience in the urban environment. *Sustainable Cities and Society*, 26, 278–288. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.06.019>
- Heaviside, C., Macintyre, H., & Vardoulakis, S. (2017). The Urban Heat Island: Implications for Health in a Changing Environment. *Current Environmental Health Reports*, 4(3), 296–305. <https://doi.org/10.1007/s40572-017-0150-3>
- Hester, E. T., & Bauman, K. S. (2013). Stream and Retention Pond Thermal Response to Heated Summer Runoff From Urban Impervious Surfaces¹. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 49(2), 328–342. <https://doi.org/10.1111/jawr.12019>

- IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC: Londra, UK; New York, NY, USA, 2021.
- Kim, D. R. (s.d.). *Citizen science for environmental monitoring*.
- Kullenberg, C., & Kasperowski, D. (2016). What Is Citizen Science? – A Scientometric Meta-Analysis. *PLOS ONE*, *11*(1), e0147152. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0147152>
- Le Tertre, A., Lefranc, A., Eilstein, D., Declercq, C., Medina, S., Blanchard, M., Chardon, B., Fabre, P., Filleul, L., Jusot, J.-F., Pascal, L., Prouvost, H., Cassadou, S., & Ledrans, M. (2006). Impact of the 2003 Heatwave on All-Cause Mortality in 9 French Cities: *Epidemiology*, *17*(1), 75–79. <https://doi.org/10.1097/01.ede.0000187650.36636.1f>
- Li, D., & Bou-Zeid, E. (2013). Synergistic Interactions between Urban Heat Islands and Heat Waves: The Impact in Cities Is Larger than the Sum of Its Parts. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *52*(9), 2051–2064. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-13-02.1>
- Loglisci, N., Milelli, M., Iurato, J., Galia, T., Galizia, A., & Parodi, A. (2024). Validation of Citizen Science Meteorological Data: Can They Be Considered a Valid Help in Weather Understanding and Community Engagement? *Sensors*, *24*(14), 4598. <https://doi.org/10.3390/s24144598>
- Mitchell, D., Heaviside, C., Vardoulakis, S., Huntingford, C., Masato, G., P Guillod, B., Frumhoff, P., Bowery, A., Wallom, D., & Allen, M. (2016). Attributing human mortality during extreme heat waves to anthropogenic climate change. *Environmental Research Letters*, *11*(7), 074006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074006>
- Mohajerani, A., Bakaric, J., & Jeffrey-Bailey, T. (2017). The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *Journal of Environmental Management*, *197*, 522–538. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.095>
- Nakayama, T., & Fujita, T. (2010). Cooling effect of water-holding pavements made of new materials on water and heat budgets in urban areas. *Landscape and Urban Planning*, *96*(2), 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.02.003>
- Oke, T. R. (1973). *City size and the Urban Heat Island*. *7*, 769–779.
- Oke, T. R. (1981). *Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations*. *1*, 237–254.
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *108*(455), 1–24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
- Pastore, F., Tarantino, E., & Fratino, U. (2014). *Stima della Temperatura Superficiale Terrestre del territorio di Taranto da dati LANDSAT 8*.

- Patz, J. A., Campbell-Lendrum, D., Holloway, T., & Foley, J. A. (2005). Impact of regional climate change on human health. *Nature*, *438*(7066), 310–317. <https://doi.org/10.1038/nature04188>
- Phelan, P. E., Kaloush, K., Miner, M., Golden, J., Phelan, B., Silva, H., & Taylor, R. A. (2015). Urban Heat Island: Mechanisms, Implications, and Possible Remedies. *Annual Review of Environment and Resources*, *40*(1), 285–307. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102014-021155>
- Pignatti, S. (2017). *Flora d'Italia. Volume 1* (Seconda edizione in 4 volumi). Edagricole.
- Sailor, D., Shepherd, M., Sheridan, S., Stone, B., Kalkstein, L., Russell, A., Vargo, J., & Andersen, T. (2016). Improving Heat-Related Health Outcomes in an Urban Environment with Science-Based Policy. *Sustainability*, *8*(10), 1015. <https://doi.org/10.3390/su8101015>
- Santamouris, M. (2013). *Energy and climate in the urban built environment*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315073774>
- Smith, B., & Rodriguez, S. (2017). Spatial Analysis of High-Resolution Radar Rainfall and Citizen-Reported Flash Flood Data in Ultra-Urban New York City. *Water*, *9*(10), 736. <https://doi.org/10.3390/w9100736>
- Stone, B., Hess, J. J., & Frumkin, H. (2010). Urban Form and Extreme Heat Events: Are Sprawling Cities More Vulnerable to Climate Change Than Compact Cities? *Environmental Health Perspectives*, *118*(10), 1425–1428. <https://doi.org/10.1289/ehp.0901879>
- Stone Jr, B. (2012). *The city and the coming climate: Climate change in the places we live*. Takebayashi, H., & Moriyama, M. (2012). Study on Surface Heat Budget of Various Pavements for Urban Heat Island Mitigation. *Advances in Materials Science and Engineering*, *2012*, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2012/523051>
- Tan, C. L., Wong, N. H., Tan, P. Y., Jusuf, S. K., & Chiam, Z. Q. (2015). Impact of plant evapotranspiration rate and shrub albedo on temperature reduction in the tropical outdoor environment. *Building and Environment*, *94*, 206–217. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.08.001>
- Tong, S., Prior, J., McGregor, G., Shi, X., & Kinney, P. (2021). Urban heat: An increasing threat to global health. *BMJ*, n2467. <https://doi.org/10.1136/bmj.n2467>
- Vardoulakis, S., Dear, K., Hajat, S., Heaviside, C., Eggen, B., & McMichael, A. J. (2014). Comparative Assessment of the Effects of Climate Change on Heat- and Cold-Related Mortality in the United Kingdom and Australia. *Environmental Health Perspectives*, *122*(12), 1285–1292. <https://doi.org/10.1289/ehp.1307524>
- Voelkel, J., Shandas, V., & Haggerty, B. (2016). Developing High-Resolution Descriptions of Urban Heat Islands: A Public Health Imperative. *Preventing Chronic Disease*, *13*, 160099. <https://doi.org/10.5888/pcd13.160099>
- Xie, N., Akin, M., & Shi, X. (2019). Permeable concrete pavements: A review of environmental benefits and durability. *Journal of Cleaner Production*, *210*, 1605–1621. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.134>

- Xu, L.-Y., Yin, H., & Xie, X.-D. (2014). Health Risk Assessment of Inhalable Particulate Matter in Beijing Based on the Thermal Environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *11*(12), 12368–12388. <https://doi.org/10.3390/ijerph111212368>
- Yang, J., Wang, Z.-H., & Kaloush, K. E. (2015). Environmental impacts of reflective materials: Is high albedo a ‘silver bullet’ for mitigating urban heat island? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *47*, 830–843. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.092>
- Yavuzturk, C., Ksaibati, K., & Chiasson, A. D. (2005). Assessment of Temperature Fluctuations in Asphalt Pavements Due to Thermal Environmental Conditions Using a Two-Dimensional, Transient Finite-Difference Approach. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *17*(4), 465–475. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2005\)17:4\(465\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:4(465))
- Yenneti, K., Ding, L., Prasad, D., Ulpiani, G., Paolini, R., Haddad, S., & Santamouris, M. (2020). Urban Overheating and Cooling Potential in Australia: An Evidence-Based Review. *Climate*, *8*(11), 126. <https://doi.org/10.3390/cli8110126>
- Zanetti, C., Carraro, M., De Marchi, M., & Pappalardo, S. E. (2023). VOLUNTEERED GEOGRAPHIC INFORMATION FOR MAPPING URBAN CLIMATE AND AIR QUALITY: TESTING AND ASSESSING ‘SNIFFER BIKES’ WITH LOW-COST SENSORS. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XLVIII-1/W1-2023*, 555–561. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W1-2023-555-2023>

8 Sitografia

<https://climate.copernicus.eu/copernicus-summer-2024-hottest-record-globally-and-europe> (consultato il 08/09/2024)

https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_2.php (consultato il 24/10/2024)

<https://earthexplorer.usgs.gov/> (consultato il 20/10/2024)

<https://ichange-project.eu/open-air-laboratory-in-genoa/> (consultato il 24/09/2024)

<https://idt2.regione.veneto.it/portfolio/webgis-carta-copertura-del-suolo-regione-del-veneto/> (consultato il 02/10/2024)

<https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/> (consultato il 23/10/2024)

<https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/> (consultato il 23/10/2024)

<https://www.arpa.veneto.it/>

<https://www.gov.uk/government/collections/hot-weather-and-health-guidance-and-advice> (consultato il 31/10/2024)

<https://www.isprambiente.gov.it/files/legendacorine.pdf> (consultato il 02/10/2024)

<https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/suolo-e-territorio/suolo/copertura-del-suolo/corine-land-cover> (consultato il 02/10/2024)

<https://www.lamma.toscana.it/news/ondate-di-calore-qual-e-definizione> (consultato il 08/09/2024)

<https://www.open-seneca.org/air-quality-monitor> (consultato il 23/10/2024)

http://www.padovanet.it/bandigara/VER_2021_24_via_Savelli/ELAB_TECN_ESEC_via_Savelli_LLPP_VER_2021_24/A28-022-ESC_8.1-RGEN_signed.pdf (consultato il 03/11/2024)

<https://www.padovanet.it/informazione/progetto-di-riqualificazione-urbana-di-piazza-savelli> (consultato il 03/11/2024)

https://www.protezionecivileprovincialivorno.it/index.php?option=com_content&view=article&id=70&Itemid=236 (consultato il 02/10/2024)

<https://www.salute.gov.it/portale/caldo/dettaglioFaqCaldo.jsp?lingua=italiano&id=98> (consultato il 02/09/2024)

<https://wmo.int/topics/heatwave> (consultato il 02/09/2024)

<https://www.wetterzentrale.de> (consultato il 24/10/2024)

www.MeteoTracker.com (consultato il 23/10/2024)

9 Allegato 1

Erbario di riferimento per l'areale appartenente al parcheggio in Piazza Savelli Padova.

Di seguito sono riportati il link per accedere al documento Google contenente le foto e qualche approfondimento delle specie trattate:

https://drive.google.com/file/d/1pbN-vf7xebnAxYGU4fPt_eRocOzOUd/view?usp=sharing

<https://drive.google.com/file/d/10wW3-a3dYKk-P7WHMDQj6s4-KHMH7aMR/view?usp=sharing>