



**Politecnico
di Torino**

Corso di Laurea magistrale in
PIANIFICAZIONE TERRITORIALE, URBANISTICA E PAESAGGISTICO AMBIENTALE
A. A. 2025-26

Validazione del modello TARGET per la mappatura delle Isole di
Calore: un'analisi comparativa nel contesto di Torino

Relatore:

Prof. Andrea **Ajmar**

Co-relatore:

Prof. Luca **Staricco**

Candidata:

Laura **Nicolini** - s305424

Abstract

La crescente incidenza dei fenomeni di calore estremo all'interno dei contesti urbani è diventata, negli ultimi decenni, una problematica sanitaria, oltre che climatica, prioritaria. Per poter aiutare le amministrazioni nella programmazione di interventi mirati alla mitigazione del fenomeno delle isole di calore, sono necessari strumenti e metodi adeguati che permettano di prevederle e mapparle con un adeguato livello di dettaglio spaziale.

In quest'ottica, la presente tesi propone e analizza i risultati di una metodologia per la creazione di mappe delle isole di calore alla scala urbana. Il procedimento utilizza il software QGIS e si basa sull'impiego del modello TARGET (The Air-temperature Response to Green blue-infrastructure Evaluation Tool) implementato nel plug-in UMEP (The Urban Multi-scale Environmental Predictor). Questo è stato utilizzato in quanto caratterizzato dalla facile reperibilità dei dati di input (DTM, DSM, dati meteorologici) e da una rapidità maggiore per le elaborazioni alla scala urbana, rispetto ad altri software di modellazione climatica (come Envi-met o il framework microclimatico PALM-4U). La validazione del modello è stata condotta sul caso studio di Torino, confrontando i valori delle simulazioni di TARGET (griglia 150m) con quelli elaborati dal modello COSMO+TERRA_URB di ARPA Piemonte (risoluzione 300m), e con le temperature registrate dalle stazioni all'interno della città: le ondate di calore avvenute a giugno 2022, luglio 2022, luglio 2023 e agosto 2023, hanno costituito i casi studio di riferimento, dai quali è stata estratta la prima giornata di ogni periodo per ulteriori valutazioni quantitative.

L'utilizzo di una griglia con risoluzione adatta alla scala urbana ha restituito un dettaglio utile per individuare aree caratterizzate da comportamenti climatici specifici e per osservare variazioni termiche tra celle limitrofe, che altrimenti non sarebbero state apprezzabili.

Attraverso il Coefficiente di correlazione R, sono state dimostrate le potenzialità del modello implementato in UMEP: l'elaborato mostra infatti la buona capacità di TARGET di rappresentare fedelmente l'andamento della curva reale delle temperature ($R > 0,75$), con la singola eccezione per la notte di agosto 2023 ($R = 0,57$), a causa della difficoltà dello strumento di tenere in conto i fenomeni temporaleschi. L'analisi degli altri parametri statistici evidenzia, tuttavia, un costante scostamento dei valori predetti dal modello rispetto alle misurazioni reali delle stazioni meteorologiche, in particolare per le simulazioni notturne, caratterizzate da una sistematica sottostima (Mean Bias negativo fino a $-2,8^{\circ}\text{C}$). Nonostante ciò, è possibile affermare che la restituzione fornita dal modello sia qualitativamente valida ma quantitativamente limitata: grazie all'elevata affidabilità nel descrivere le dinamiche e i gradienti delle temperature all'interno della città, tali limiti quantitativi non precludono, però, le potenzialità e l'utilità dello strumento. Si ipotizza, inoltre, che per possibili applicazioni o scenari futuri, il modello, possa superare queste criticità attraverso una correzione lineare basata sul bias riscontrato.

In conclusione, l'utilizzo del modello TARGET rappresenta un'ottima alternativa per la rappresentazione spaziale del clima urbano, attraverso un'applicazione facile e più immediata rispetto ad altri simulatori climatici urbani e permette di ottenere una solida base conoscitiva per l'individuazione delle aree dove implementare azioni o strategie di mitigazione climatica.

Indice

1.	Introduzione.....	4
1.1.	Il fenomeno dell'Isola di Calore Urbano (UHI): dinamiche fisiche e impatti sulla salute 5	
1.1.1.	Cenni teorici storici.....	6
1.1.2.	Impatti sulla salute pubblica.....	6
1.1.3.	Inquadramento generale delle azioni di mitigazione per i contesti urbani.....	8
1.2.	Scopo dell'elaborato: Valutazione dell'UHI attraverso modelli deterministici.....	9
2.	Quadro Teorico e Metodologico.....	10
2.1.	Modellazione climatica urbana con UMEP e TARGET.....	10
2.2.	Il modulo TARGET: bilancio energetico superficiale e temperatura dell'aria.....	12
2.2.1.	Il bilancio energetico e l'applicazione nel modello TARGET.....	12
2.2.2.	Quantificazione dell'Isola di Calore Urbano.....	14
3.	Inquadramento del Caso Studio di Torino.....	15
3.1.	Inquadramento territoriale: morfologia urbana e copertura del suolo.....	15
3.2.	Caratterizzazione climatica: analisi storica delle ondate di calore a Torino.....	20
3.3.	Inquadramento morfologico tramite Local Climate Zones (LCZ) e rete di monitoraggio 23	
4.	Metodologia di Analisi e Simulazione.....	32
4.1.	Il dataset ARPA: stazioni di monitoraggio, metadati e temperature di riferimento. ...	32
4.2.	Il flusso di lavoro UMEP/TARGET:.....	36
4.2.1.	Introduzione al modello: dati di input e requisiti di base.....	37
4.2.2.	Il caso studio: definizione dell'area.....	37
4.2.3.	Dati di input.....	39
4.3.	Architettura del modello.....	46
5.	Analisi Comparativa.....	57
5.1.	Analisi spaziale: Mappe di temperatura prodotte da TARGET.....	57
5.2.	Casi studio: Correlazione tra i valori simulati e i valori mediati.....	85
5.3.	Confronto statistico.....	104
5.3.1.	Gli indicatori statistici.....	104
5.3.2.	Valutazione dei risultati.....	105
5.4.	Sintesi delle performance del modello e limiti metodologici.....	108
6.	Conclusioni.....	111
6.1.	Limiti della ricerca e sviluppi futuri.....	113
6.2.	Esito finale dell'elaborato.....	114
7.	Bibliografia.....	115
8.	ALLEGATO 1.....	119

1. Introduzione

La crescente incidenza dei fenomeni di calore estremo all'interno dei contesti urbani è diventata, negli ultimi decenni, una problematica sanitaria nonché climatica prioritaria (IPCC, 2022; Perkins-Kirkpatrick e Lewis, 2020). Il fenomeno per cui all'interno delle città le temperature risultano molto più alte rispetto al contesto che le circonda, prende il nome di Isola di Calore urbano, proprio per la sua caratteristica di essere un hotspot rispetto al contesto rurale. Esso è una conseguenza dell'alterazione del bilancio energetico locale, influenzato da caratteristiche morfologiche e materiche del contesto costruito, tra cui l'elevata impermeabilizzazione dei suoli, la carenza di coperture vegetali, l'impiego di materiali con alta capacità di assorbire e rilasciare il calore, insieme all'intrappolamento della radiazione solare all'interno dei canyon urbani. (Oke et al., 2017; Santamouris, 2015).

Risulta evidente la necessità per le amministrazioni locali, nonché per i pianificatori territoriali, di sviluppare strumenti operativi efficienti e di rapido utilizzo per indirizzare le strategie di mitigazione e adattamento climatico.

La mappatura e l'analisi delle isole di calore sono tradizionalmente una competenza prevalentemente attribuita ad enti di ricerca o ad agenzie ambientali specializzate. Esse, infatti, hanno a loro disposizione un'ampia rete in situ di monitoraggio e possiedono anche le capacità tecniche di elaborazione e i fondi necessari per metterle in atto (Voogt e Oke, 2003).

Per colmare questo divario operativo, all'interno del presente elaborato viene discussa una metodologia replicabile ed accessibile sia agli enti pubblici che agli utenti privati e ai ricercatori del settore, per l'ottenimento di mappe di isole di calore. La suddetta metodologia è pensata per supportare e guidare i processi decisionali e lo sviluppo di politiche e progetti di trasformazione urbana in un'ottica di mitigazione e adattamento ai fenomeni del cambiamento climatico.

Il lavoro utilizza il software open source QGIS e, in particolare, il modello TARGET (*The Air-temperature Response to Green/blue-infrastructure Evaluation Tool*), implementato all'interno del plug-in UMEP (*Urban Multi-scale Environmental Predictor*), per predire la temperatura dell'ambiente urbano tramite pochi elementi di input (Lindberg et al., 2018), costituiti da dati open-source di facile reperibilità, resi disponibili prevalentemente attraverso i geoportali istituzionali

Per validare l'affidabilità del modello, i risultati saranno confrontati con la metodologia e i dati elaborati da ARPA Piemonte (Agenzia Regionale per l'Ambiente) nel 2024 per la creazione di mappe di isole di calore per la città di Torino, gentilmente resi disponibili dall'ente per il presente studio.

Il processo di validazione prenderà in esame quattro periodi di ondate di calore, selezionati dall'ente come riferimento. Le simulazioni di questi saranno poi incrociate con i valori reali registrati dalle stazioni meteorologiche presenti all'interno della città di Torino.

In questo modo sarà possibile giudicare l'accuratezza complessiva del processo nonché di analizzare criticamente i limiti tecnici del plug-in, legati alle inevitabili semplificazioni che vengono applicate nel suo modello termodinamico.

TARGET, grazie alla sua applicazione semplificata rispetto ai modelli sviluppati dagli enti, è uno strumento che può rappresentare una risorsa fondamentale in ambito accademico e professionale per lo sviluppo di politiche e strategie urbane, innovative ed efficaci, per contrastare il fenomeno delle isole di calore, come, ad esempio, lo sviluppo di infrastrutture verdi e blu. Ciò risulta di fondamentale importanza nel contesto italiano considerando che "l'Italia è terza in Europa per numero di notti tropicali" e l'aumento costante delle temperature degli ultimi decenni (Castellani and Chiostrì, 2025).

1.1. Il fenomeno dell'Isola di Calore Urbano (UHI): dinamiche fisiche e impatti sulla salute

Con "Urban Heat Island" (UHI), o semplicemente Isola di Calore, si indica il fenomeno per cui le città sono più calde rispetto alle zone rurali circostanti.

Tale fenomeno microclimatico è descrivibile tramite l'immagine mentale in cui la città è rappresentata come un'"isola", con una temperatura maggiore, circondata da un "mare", con una temperatura minore.

L'UHI si configura, di fatto, come un'estremizzazione in contesto cittadino del fenomeno del riscaldamento globale. All'interno dell'ambiente urbano, infatti, la temperatura di base che aumenta non agisce in modo isolato, ma si somma sinergicamente al calore antropico e all'energia termica trattenuta e rilasciata progressivamente dalle strutture e dalle superfici impermeabili della città, amplificando drasticamente l'anomalia termica complessiva.

Difatti, la differenza fra la temperatura urbana e quella registrata nelle aree periferiche o esterne all'ambito cittadino è dovuta tendenzialmente al fatto che nelle prime vi è una maggiore densità abitativa nonché una netta prevalenza di superfici cementificate e asfaltate che comportano una maggiore impermeabilizzazione dei suoli. Tutto ciò è maggiormente amplificato da una minore presenza di aree verdi rispetto alle zone periferiche ed extraurbane.

Il fenomeno è descritto quantitativamente attraverso il bilancio energetico urbano, formalizzato matematicamente mediante un'equazione termodinamica la quale tiene in considerazione molteplici parametri fisici e flussi ambientali che interagiscono all'interno del microclima cittadino, come, ad esempio, i fattori antropici, lo stoccaggio di calore nei materiali o la capacità di riflettere di una superficie. Tutti questi fattori influiscono sulle UHI e verranno spiegati approfonditamente nel paragrafo 2.2.1.

Il fenomeno è in aumento come afferma anche l'Agenzia Europea dell'Ambiente (2023) che stima che la durata e l'intensità delle ondate di calore cresceranno ulteriormente in tutta Europa secondo tutti gli scenari climatici, specialmente per la parte meridionale del continente.

La necessità di mappare, analizzare e mitigare l'Isola di Calore non risponde soltanto a un'esigenza di carattere climatico, ma rappresenta una priorità cruciale per la salvaguardia della salute pubblica. L'intensificazione delle temperature nelle aree centrali e densamente edificate genera infatti una serie di esternalità negative che minacciano direttamente il benessere dei cittadini comportando, tra le altre cose, un aumento nei tassi di mortalità.

1.1.1. CENNI TEORICI STORICI

Il fenomeno è noto sin dall'inizio del XIX secolo grazie alle ricerche del meteorologo Luke Howard che nel 1833, nel suo trattato "The climate of London", ha riportato prove empiriche di come le temperature sono sistematicamente più elevate all'interno della città di Londra rispetto alle aree rurali circostanti. Howard attribuì la causa principale al calore antropico e alla densità edilizia (Howard, 1833).

Il primo riferimento in materia fisica che ha mostrato il bilancio energetico che caratterizza l'UHI è stato scritto da Oke nel 1982 nel suo articolo dal titolo "The energetic basis of the urban heat island.", contenuto all'interno della rivista "Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.". Al suo interno, egli dimostra matematicamente come la riduzione dell'evapotraspirazione (Q_e) e lo stoccaggio di calore nei materiali (ΔQ_s) creino l'isola (Oke, 1982).

A partire dalla seconda metà del XX secolo, la costante urbanizzazione ha portato all'aumento dei fattori che influiscono sull'innalzamento delle temperature nelle città, in quanto sono state alterate radicalmente le morfologie dei territori: grandi porzioni naturali di questi sono state sostituite da strade e edifici, costituiti da asfalto e cemento che hanno portato ad un maggiore accumulo termico.

Grazie all'evoluzione dei satelliti, introdotti agli inizi degli anni '70 e sviluppati ulteriormente alla fine di questi, con l'implementazione di bande infrarosso termico (TIR) (NASA/USGS, 2022), è avvenuto un'importante evoluzione metodologica nello studio delle UHI. Nel 1972 la NASA ha inaugurato il suo primo programma spaziale Landsat con il lancio della prima missione Landsat-1, che raccoglieva dati soprattutto nello spettro visibile e vicino infrarosso (NASA/USGS, 2022). Nel 1982 vengono implementati i primi sensori termici ad alta risoluzione con il lancio di Landsat-4, che ha reso possibile mappare la temperatura radiante, cioè quella emessa dalle superfici, permettendo di definire fisicamente e spazialmente la Surface Urban Heat Island (SUHI) (Voogt & Oke, 2003).

La differenza fra quest'ultima e l'Urban Heat Island (UHI) risiede nell'oggetto misurato: la prima è una misura dello stress termico dei materiali solidi ed è caratterizzata da picchi di massima intensità durante le ore diurne, quando l'irraggiamento solare è consistente; l'UHI, invece, fa riferimento alla temperatura dell'aria a 2 metri dal suolo e fornisce direttamente una rappresentazione del microclima in cui le persone vivono. Questa, infatti, viene convenzionalmente misurata tramite le stazioni meteorologiche a terra e il suo picco di intensità si presenta durante le ore notturne, quando avviene il rilascio del calore accumulato dai materiali urbani (Voogt & Oke, 2003).

1.1.2. IMPATTI SULLA SALUTE PUBBLICA

Le isole di calore comportano una minaccia anche per la popolazione urbana che è direttamente colpita dagli effetti diretti e costanti delle alte temperature. Il pericolo maggiore che esse determinano risiede nella difficoltà delle città a raffreddarsi durante la notte, non permettendo al corpo di recuperare, e portando così ad un alto stress metabolico (Royé, 2018).

Le fasce notoriamente più vulnerabili sono composte da anziani e bambini, proprio a causa della diversa capacità del loro corpo di reagire e sopportare il calore esterno. Per quanto riguarda la popolazione anziana, la vulnerabilità non è causata solamente da patologie pregresse, ma è strettamente legata a una questione di naturale declino biologico. Il loro corpo, infatti, si surriscalda più facilmente poiché perdono la capacità di

percepire tempestivamente la necessità di bere o di compiere azioni volte a diminuire la temperatura corporea; questo meccanismo porta, per esempio, all'insorgenza di gravi insufficienze cardiovascolari (Bunker et al., 2016).

Per i bambini, invece, e in particolar modo per quelli sotto i quattro anni di età, la criticità è legata fondamentalmente alla composizione fisica dei loro corpi. Essi assorbono il calore molto più velocemente rispetto a un adulto a causa del diverso rapporto tra la loro massa e la superficie corporea ma è ancora immaturo il loro sistema di termoregolazione. Inoltre, sono totalmente dipendenti dalle azioni esterne degli adulti per sopperire ai loro bisogni fisiologici, come ad esempio l'idratazione (Xu et al., 2012).

Di base, comunque, la categoria più debole con la presenza costante di temperature elevate è rappresentata dalle persone con patologie cardiovascolari e respiratorie, come dimostrano differenti studi in materia. Lo studio di Castellani e Chiostrì (2025) riporta che, in Giappone, la mortalità per patologie polmonari subisce un significativo incremento nelle notti particolarmente calde, di circa il 10%; parallelamente, a Barcellona, si verifica “un aumento della mortalità per cause respiratorie pari al 2.9% per ogni incremento del 10% della temperatura notturna”. Ciò si somma alle questioni di inquinamento ambientale: articoli come quelli scritti da Xu et al. (2023) e Rahman et al. (2022) hanno dimostrato la relazione diretta tra la maggiore quantità di polveri sottili nell'aria e l'aumento della mortalità cardiovascolare. Gli studi affermano che l'aumento del ritmo metabolico richiede al cuore di pompare ad una velocità più alta per poter permettere una circolazione sanguigna maggiore che faciliti la traspirazione della pelle. Al contempo, le polveri sottili penetrano nei tessuti portando a infiammazioni acute, rendendo il sangue più denso e incline, quindi, alla formazione di trombi. Tutto questo meccanismo di sovraccarico è la ragione dell'aumento dei decessi in queste condizioni.

È fondamentale evidenziare come la vulnerabilità alle isole di calore urbane non si esaurisca esclusivamente nelle fasce demografiche più fragili. Difatti, la prolungata esposizione comporta anche effetti sulla salute mentale, con un maggiore numero registrato di ammissione ospedaliera per pazienti con disordini psichiatrici (Romanello et al., 2021). Wong et al. (2017) hanno riportato nel loro studio che il 64.7% dei lavoratori soggetti all'UHI riportano casi di depressione, insieme ad altri comportamenti fuori dall'ordinario ad esempio un aumento dell'aggressività, nei conflitti in ambiente lavorativo ed ansia (Basiran et al., 2024). Oltre agli eventi fatali, è registrato che il caldo estremo porta ad una spossatezza cronica, calo dell'attenzione e stress cognitivo, portando ad un maggiore avvenimento di incidenti sul luogo di lavoro (Kjellstrom et al. 2016).

Infine, il fenomeno assume una profonda connotazione di carattere sociale ed economico. La popolazione socio-economicamente più svantaggiata registra un incremento significativo della probabilità di subire gli impatti negativi dell'UHI come dimostrato anche dallo studio “A Systematic Review of Urban Heat Island (UHI) Impacts and Mitigation: Health, Equity, and Policy” (2026) nel quale si evince che la popolazione più svantaggiata economicamente presenta un rischio di mortalità legato al calore, superiore del 26-45% e un'esposizione a temperature maggiori di 2-4°C rispetto alle comunità benestanti (Fong et al., 2026).

Questo divario è, purtroppo, dettato anche da specifiche criticità urbanistiche e abitative come l'assenza di aree verdi in aree caratterizzate da alti tassi di densità abitativa (The BMJ, 2021) e dallo stato e dalla qualità degli edifici che a causa della loro obsolescenza

sono privi di un adeguato isolamento termico e/o caratterizzati da strutture che accumulano calore durante il giorno senza riuscire a dissiparlo nelle ore notturne.

1.1.3. INQUADRAMENTO GENERALE DELLE AZIONI DI MITIGAZIONE PER I CONTESTI URBANI

Il legame fra la temperatura nelle città e il bilancio energetico di queste è stato comprovato (Oke, 1982). Le città e le amministrazioni sono da tempo consapevoli della problematica delle alte temperature urbane e per questo sono già stati sviluppati diversi piani e sperimentate diverse azioni per cercare di mitigare la temperatura.

Restando nel contesto torinese, in particolare, è stato sviluppato il Piano di resilienza climatica (2020) al cui interno sono presenti azioni rivolte alla mitigazione delle temperature, oltre che azioni declinate per l'amministrazione. In questo contesto intervengono le Nature Based Solutions (NBS), che hanno lo scopo di ripristinare le funzionalità degli ecosistemi alterati all'interno dei contesti urbani e, più in generale, di rispondere alle necessità dettate dal cambiamento climatico (PRC, 2020).

L'aumento dell'ombreggiamento attraverso alberature stradali è uno dei più noti interventi NBS: queste determinano la riduzione dello Sky View Factor, schermano l'asfalto dalla radiazione solare a onde corte ($K \downarrow$) e permettono l'aumento del flusso di calore latente (Q_E) tramite la traspirazione, poiché rinfrescano l'aria intrappolata nella chioma.

È previsto anche l'utilizzo di materiali freschi (*cooling materials*) per ridurre l'innalzamento termico, sia per le pavimentazioni urbane che per i tetti degli edifici (PRC, 2020). Questo permetterebbe di ridurre l'accumulo di calore (ΔQ_s).

La de-impermeabilizzazione (*depaving*), infine, si fonda sulla sostituzione di asfalto e cemento (che, come afferma Mohajerani (2017), rappresentano uno dei fattori di maggiore impatto per il fenomeno delle isole di calore) con terra e prato, portando a ridurre nettamente la temperatura restituita all'atmosfera durante le ore notturne.

Le NBS, di cui sono state qui citate solo quelle più rilevanti per le isole di calore e con effetti più diretti e immediati sulla temperatura urbana. Queste sono ampiamente riconosciute a livello internazionale come tra le più efficaci soluzioni per la mitigazione climatica urbana (Fong et al., 2026), come anche integrato a livello locale all'interno del PRC (2020).

1.2. Scopo dell'elaborato: Valutazione dell'UHI attraverso modelli deterministici

Come già detto, lo scopo di questo elaborato è mappare, analizzare e valutare la capacità dello strumento implementato in UMEP di stimare il fenomeno delle Isole di Calore Urbane (UHI), per la città di Torino.

TARGET si presenta come un modello deterministico, il quale rappresenta uno degli strumenti di analisi accessibile, efficiente e, nonostante le semplificazioni che adopera, ritenuto scientificamente affidabile nel replicare i dati reali delle temperature urbane (Broadbent *et al.*, 2019).

In questo lavoro, incentrato sulle analisi climatiche, il modello viene utilizzato come uno strumento basato su sistemi di calcolo matematico e parametri geometrici e territoriali reali, i quali permettono di replicare la realtà fisica simulando i comportamenti dinamici, i fenomeni termodinamici e le relazioni fluidodinamiche che caratterizzano il contesto urbano.

TARGET riproduce i meccanismi di accumulo, di ritenzione e di bilancio energetico superficiale del calore all'interno dell'ambiente costruito, andando a stimare l'andamento della temperatura dell'aria a livello stradale e della temperatura superficiale del tessuto urbano in funzione della morfologia e dei materiali della città.

L'approccio metodologico di TARGET si basa sull'integrazione di dati ambientali reali per simulare la situazione microclimatica alla scala urbana, operando secondo una griglia vettoriale impostata dall'utente per il contesto studiato.

In un'ottica di sviluppo futuro, il modello TARGET non si configura semplicemente come uno strumento statistico o di mera mappatura dello stato di fatto, ma assume un ruolo proattivo e predittivo di fondamentale importanza nello studio dell'ecosistema urbano. Esso, infatti, è in grado di integrare i dati morfologici e microclimatici consentendo la simulazione e la previsione dell'impatto delle future trasformazioni urbanistiche, diventando uno strumento di supporto per i pianificatori nella scelta e nell'implementazione di strategie di mitigazione mirate.

2. Quadro Teorico e Metodologico

All'interno di questo capitolo vengono presentati la struttura e i meccanismi di funzionamento degli strumenti utilizzati per l'analisi dell'Isola di Calore. Sarà specificato e approfondito il modello matematico su cui si basano le simulazioni svolte all'interno di questo elaborato; grazie a tale inquadramento teorico, sarà infatti possibile comprendere appieno i risultati ottenuti nella fase conclusiva del lavoro

2.1. Modellazione climatica urbana con UMEP e TARGET

UMEP (Urban Multi-scale Environmental Predictor) è uno strumento che implementa l'analisi di servizi climatologici, studiato per ricercatori e professionisti del settore. Si presenta come plugin di QGIS ed è un modello open-source che presenta svariate applicazioni connesse al comfort termico, al consumo energetico urbano e alle strategie di contrasto ai cambiamenti climatici (UMEP-dev, 2016).

La sua struttura è presentata nella pubblicazione *"Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP): An integrated tool for city-based climate services"*, edita nel 2018 da Lindberg et al. sulla rivista *Environmental Modelling & Software* (Volume 99).

L'obiettivo dichiarato è quello di offrire agli attori che governano le città strumenti consoni per la valutazione e l'attuazione di strategie di contrasto agli impatti del calore estremo e del cambiamento climatico. Come si legge nel trattato degli autori, lo scopo principale è stato superare le limitazioni di altri modelli, spesso caratterizzati da una bassa accessibilità, dovuta alla necessità di competenze tecniche estremamente specifiche, e da un'elevata complessità computazionale, legata alla mole di dati richiesti in fase di input. Inoltre, trattandosi di uno strumento *open-source*, UMEP non necessita di licenze per l'utilizzo, favorendo così una maggiore accessibilità e libertà operativa (UMEP-dev, 2016).

UMEP è strutturato gerarchicamente in strumenti di pre-processing, processing e post-processing: questa struttura permette di ottenere un ordine consequenziale nell'ottenimento dei dati necessari in input per le differenti fasi, contribuendo alla standardizzazione dell'analisi climatica.

Prima di poterlo utilizzare, tuttavia, è stato necessario configurare l'ambiente di calcolo secondo i requisiti richiesti, come l'installazione di specifiche librerie Python necessarie all'esecuzione dei processi, seguendo sempre quanto esposto dentro la guida. Tale operazione non richiede comunque competenze informatiche o di programmazione avanzate, rendendo l'installazione accessibile a tutti gli utenti.

Le stime delle isole di calore hanno utilizzato un tool integrato all'interno dell'ambiente UMEP chiamato TARGET (The Air-temperature Response to Green/blue-infrastructure Evaluation Tool).

La descrizione del modello matematico è presentata da Broadbent et al. (2019) sulla rivista *Geoscientific Model Development* (Vol. 12) e viene implementata dentro il plug-in UMEP per valutare e stimare l'Isola di Calore nonché gli impatti delle possibili azioni di mitigazione.

I punti di forza di TARGET risiedono nel limitato numero di dati di input richiesti e nella loro facile reperibilità, nella flessibilità della scala di applicazione, nella velocità di elaborazione, proporzionale all'estensione dell'area analizzata, e, infine, nella facilità

d'uso, che non richiede competenze tecniche altamente specialistiche (Broadbent et al., 2019).

La differenza di TARGET risiede proprio nel modo in cui si colloca nella classificazione dei modelli. Da un lato, ci sono i modelli di Computational Fluid Dynamics (CFD), come ENVI-met o OpenFOAM, che risolvono le equazioni di Navier-Stokes e operano su una scala territoriale molto piccola. Questi possiedono un'estrema precisione nella descrizione delle dinamiche ambientali, ma comportano un costo computazionale talmente elevato da renderli poco pratici per analisi estese (Allegrini et al., 2015). Dall'altro lato troviamo i modelli a parametrizzazione (lumped models), come SUEWS (Surface Urban Energy & Water Balance Scheme), che è la base modellistica della struttura generale di UMEP, e LUMPS (The local-scale urban meteorological parameterization scheme). Questi considerano la città attraverso frazioni bidimensionali di tipologie di superfici e hanno una buona capacità di risolvere i bilanci energetici anche ad ampie scale, ma non tengono conto della tridimensionalità della città (Masson, 2006).

TARGET emerge come l'opzione che si pone a metà strada tra le limitazioni e le qualità di questi due approcci. L'unità su cui opera è infatti il blocco urbano, che schematizza per descrivere aree con una scala consigliata di 100-200 metri. Grazie all'utilizzo dei parametri morfometrici (come il Sky View Factor o la rugosità), il modello non deve ricorrere alle complesse equazioni di Navier-Stokes, garantendo una capacità di calcolo che permette di operare simultaneamente su griglie estese all'intero contesto urbano (Erell et al., 2011).

In conclusione, la base su cui opera TARGET è differente da altri modelli: mentre ENVI-met si concentra su una micro-scala che comporta tempi di elaborazione e risorse computazionali considerevoli, specie su aree estese, e LUMPS rimane efficace principalmente per una scala di quartiere, TARGET valuta l'intero tessuto urbano a livello stradale. È proprio a questa scala d'indagine che avvengono i principali scambi termici che influenzano il microclima cittadino, rendendo TARGET lo strumento ideale per la pianificazione urbana, dove serve un equilibrio tra precisione nella determinazione dei parametri fisici ed efficienza nei risultati.

Si è visto, perciò, che il modello matematico schematizza l'ambiente urbano attraverso una descrizione parametrica delle sue geometrie, utilizzando il concetto di canyon urbano come astrazione fisica semplificata per il calcolo del bilancio energetico locale.

La città viene idealizzata attraverso le frazioni di tetti, pareti e superfici al suolo. Gli alberi sono tenuti in considerazione assumendo che le loro chiome siano all'altezza dei tetti degli edifici; il modello include la massa d'aria intrappolata sotto la copertura arborea, che si somma alla massa d'aria termica complessiva. In questo modo, il modello riesce a tenere conto sia dell'ombreggiamento, poiché la chioma intercetta la radiazione solare in ingresso a onde corte, sia dell'intrappolamento della radiazione a onde lunghe, poiché la copertura vegetale ostacola la dissipazione del calore emesso dalle superfici sottostanti verso il cielo. Per ogni area viene calcolata la temperatura aggregata delle superfici, successivamente convertita nella temperatura dell'aria a livello stradale, stima a cui si aggiungono la velocità del vento e la temperatura calcolata al di sopra del piano stradale (Broadbent et al., 2019).

I dati in input che il modello richiede sono la copertura del suolo, la geometria spaziale dell'edificato e i dati meteorologici, attraverso i quali riesce a calcolare e stimare le temperature appena citate. Nello specifico, il modello acquisisce la vegetazione arborea solo come frazione bidimensionale di copertura del suolo e generalizza la sua altezza e,

perciò, anche il suo comportamento nel contesto urbano, assumendo che sia la stessa degli edifici. Questa dinamica viene dedotta anche da un'attenta analisi dei dati generati in output dal processore *Target: prepare*, presentato nel paragrafo Pre-processori: Morphometric Calculator e Urban Land Cover *Pre-processore: TARGET prepare*, dove vi è un univoco parametro di altezza.

Le variabili meteorologiche necessarie sono “la radiazione a onde corte (solare) in arrivo (K), radiazione a onde lunghe (terrestre) in arrivo (L), umidità relativa (RH), velocità del vento di riferimento (tipicamente a 10 m) (Uz) e la temperatura dell'aria (Ta)” (Broadbent et al., 2019). I dati meteorologici devono essere rappresentativi di un'area aeroportuale vicina al sito in analisi o di un sito all'aperto con la presenza minima di edifici (Broadbent et al., 2019).

2.2. Il modulo TARGET: bilancio energetico superficiale e temperatura dell'aria

2.2.1. IL BILANCIO ENERGETICO E L'APPLICAZIONE NEL MODELLO TARGET

Per stimare la temperatura, il modello TARGET sfrutta il bilancio energetico del modello prima citato LUMP, e lo rielabora per applicarlo alla scala geografica a cui opera. Questo è stato scelto dai ricercatori per l'efficacia che ha dimostrato nelle sue previsioni e per la semplicità operativa (Broadbent et al., 2019).

Per comprendere le relazioni e le modalità di utilizzo dei dati che richiede il modello in input, è importante entrare nel merito fisico del bilancio energetico urbano che utilizza. Questo è descritto dall'equazione presentata da Oke (1987):

$$Q^* + Q_F = + Q_H + + Q_E + + \Delta Q_S$$

dove:

Q^* - Radiazione Netta: è la somma della radiazione solare (onde corte) e della radiazione infrarossa (onde lunghe) scambiata con il cielo e le pareti del canyon.

Q_F - Calore Antropogenico: il calore prodotto dall'attività umana.

Q_H - Flusso di calore sensibile: il calore che viene trasferito dall'aria alla superficie e viceversa.

Q_E - Flusso di calore latente: l'energia consumata per l'evapotraspirazione.

ΔQ_S - Accumulo di calore: l'energia immagazzinata dai materiali che compongono il costruito (da asfalto e cemento) e rilasciata durante la notte.

Osservare ciascuno di questi termini e il loro significato, ci permetterà di comprendere come TARGET si comporti nel modellare la temperatura e quali parametri entrano in gioco.

La radiazione netta Q^* legge lo scambio di energia tra i materiali e l'ambiente, sia di notte che di giorno ed è descritta dall'equazione (Oke, 1987):

$$Q^* = (K \downarrow - K \uparrow) + (L \downarrow - L \uparrow)$$

dove:

$K \downarrow$ - Shortwave Downward: radiazione solare diretta e diffusa che arriva dal sole (onde corte).

$K \uparrow$ - Shortwave Upward: radiazione solare riflessa dalla superficie.

$L \downarrow$ - Longwave Downward: radiazione infrarossa emessa dall'atmosfera e dalle nuvole verso il suolo (onde lunghe).

$L \uparrow$ - Longwave Upward: radiazione infrarossa emessa dalla superficie stessa.

Il parametro, perciò, restituisce un valore generalmente positivo durante le ore diurne, poiché l'energia radiativa in entrata supera quella emessa. Al contrario, durante le ore notturne, il valore diventa negativo a causa dell'assenza della radiazione solare incidente e della continua perdita di energia verso l'atmosfera

Flusso di calore sensibile (Q_H) rappresenta il calore scambiato per convezione tra le superfici urbane, quindi muri e strade, con l'aria sovrastante, ed è rappresentato dall'equazione (Grimmond e Oke, 2002):

$$Q_H = \rho c_p \frac{(T_s - T_a)}{r_a}$$

dove:

ρ : è la densità dell'aria.

c_p : è il calore specifico dell'aria.

$(T_s - T_a)$: è la differenza tra la temperatura della superficie (T_s) e la temperatura dell'aria (T_a).

r_a : è la resistenza aerodinamica.

Attraverso questo parametro, TARGET determina la temperatura dell'aria (T_a). Questo processo avviene mediante la risoluzione numerica del bilancio energetico, il quale, per essere soddisfatto, richiede un equilibrio costante tra i termini considerati. A tal fine, il modello esegue una risoluzione iterativa dell'equazione di bilancio: la temperatura dell'aria viene aggiornata dinamicamente in ogni passo temporale finché il flusso di calore sensibile (Q_H) calcolato non garantisce il bilancio energetico del sistema urbano considerato (Broadbent et al., 2019).

Il flusso di calore latente (Q_E) stima l'evapotraspirazione attraverso i parametri di frazione dell'uso del suolo. Grazie a questo parametro, è possibile valutare come varia la temperatura dell'aria in prossimità delle aree vegetate, dove il processo di traspirazione restituisce all'atmosfera un contributo termico più fresco rispetto alle superfici impermeabilizzate, come l'asfalto, che risultano prive di tale effetto mitigativo.

ΔQ_S descrive l'inerzia termica del volume urbano, ovvero la capacità dei materiali che compongono la città di trattenere il calore assorbito durante le ore diurne per poi

rilasciarlo gradualmente durante la notte. Tale variabile rappresenta una delle componenti più incisive nel bilancio energetico del modello.

TARGET associa a ciascuna classe di copertura del suolo (Land Cover) proprietà termofisiche predefinite, che ne determinano il comportamento nello scambio energetico durante il ciclo giornaliero. L'integrazione dei dati morfologici (DSM) permette al modello di calcolare lo Sky View Factor (SVF), il quale influenza direttamente la radiazione netta incidente sulle superfici e le dinamiche di scambio termico tra le pareti del canyon.

L'utilizzo del modello LUMPS come base metodologica per quello di TARGET, comporta che, anche qui, il calore antropogenico Q_F non venga considerato. Questo è giustificato dagli autori del modello a cui si ispira, perché si rischierebbe di valutare doppiamente il calore della città, in quanto l'effetto di questo risulta essere già contenuto dentro gli altri parametri (Grimmond e Oke, 2002).

2.2.2. QUANTIFICAZIONE DELL'ISOLA DI CALORE URBANO

Dopo aver visto come la temperatura dentro il contesto urbano viene stimata dal processore seguendo il bilancio energetico, serve comprendere come vengono stimati i valori dell'Isola di Calore.

Il passo finale, perciò, per ottenere l'intensità dell'Isola di Calore è la semplice differenza fra la temperatura dell'ambiente urbano e quella di riferimento rurale:

$$\Delta T_{UHI} = T_{ac} - T_{ref}$$

dove:

T_{ac} - Temperature of Air in Canyon: È la temperatura dell'aria modellata da TARGET

T_{ref} - Reference Temperature: È la temperatura dell'aria di riferimento, data in input dall'utente.

3. Inquadramento del Caso Studio di Torino

Il presente capitolo ha l'obiettivo di fornire un inquadramento territoriale, morfologico e climatico del caso studio scelto, cioè la città di Torino, risponde a una precisa strategia metodologica e comparativa. Il capoluogo piemontese, infatti, era già stato assunto come territorio di riferimento dall'ente ARPA Piemonte per lo studio e la mappatura delle isole di calore, rendendola la scelta ideale per un confronto con i risultati e le simulazioni di TARGET proposte in questo elaborato di tesi. Infine, va specificato che a causa dei dati inseriti (capitolo 4.2.2), l'area presa in esame per le simulazioni di TARGET, non si limita alla sola città di Torino ma comprende anche porzioni, seppur contenute, di altri comuni limitrofi.

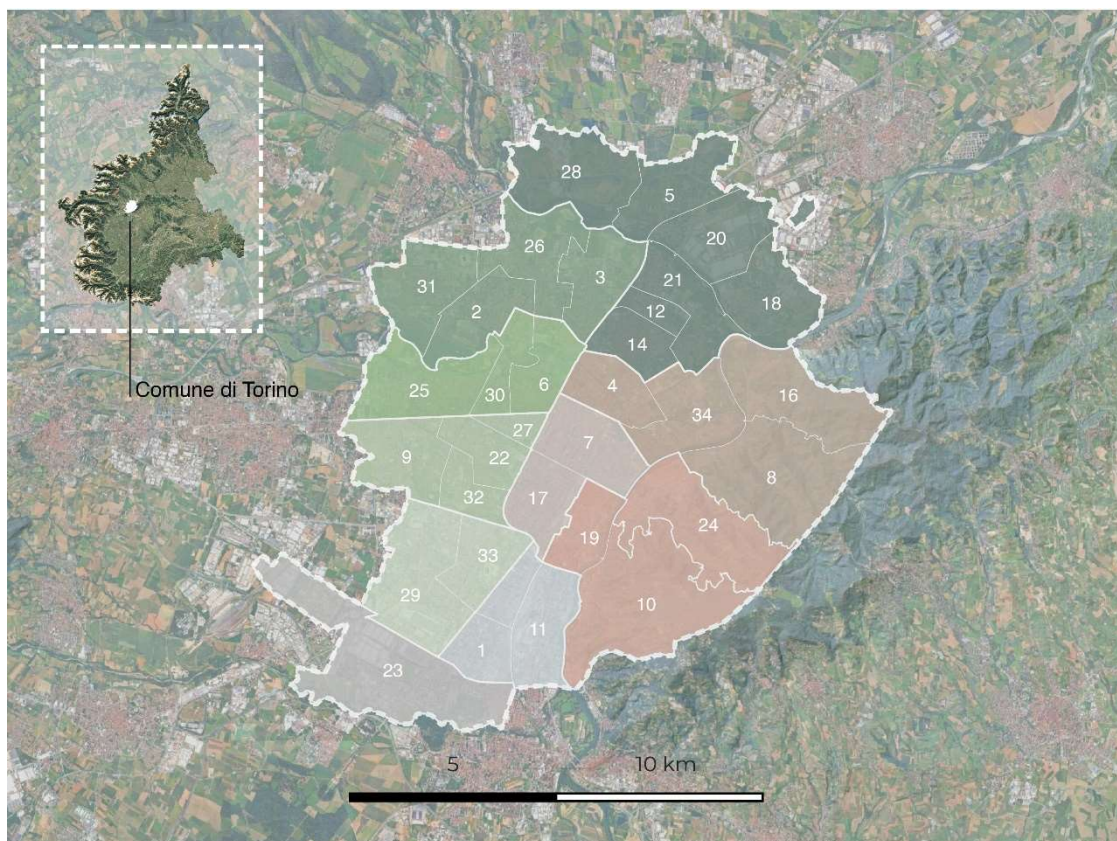
3.1. Inquadramento territoriale: morfologia urbana e copertura del suolo.

La città di Torino è il capoluogo della regione Piemonte, situata nella parte nord-settentrionale della penisola italiana. I comuni con cui confina, facenti tutti parte della prima cintura sono: a nord con i comuni di Venaria Reale, Borgaro Torinese e Settimo Torinese; a est con San Mauro Torinese, Pino Torinese e Pecetto Torinese; a sud con Moncalieri, Nichelino e Beinasco e a ovest con Orbassano, Rivoli, Collegno e Grugliasco.

Sotto il profilo amministrativo, il territorio è suddiviso in dieci circoscrizioni, le quali si suddividono a loro volta nei diversi quartieri qui presentati (Figura 1). La loro individuazione consentirà avere un riferimento territoriale e geografico per le valutazioni riportate nei successivi capitoli.

Sotto il profilo orografico, la conformazione di Torino è molto particolare, in quanto, essa si sviluppa in un'area di pianura fortemente confinata: a nord e a ovest vi è la presenza dell'arco alpino occidentale; mentre, a sud-est vi è la collina torinese. Questa duplice presenza di rilievi influenza in modo determinante il microclima locale, agendo in particolare sul regime dei venti. L'azione congiunta delle Alpi e della collina scherma le correnti principali, ostacolando la ventilazione orizzontale e creando un effetto di confinamento atmosferico. La mancanza di una ventilazione costante riduce il rimescolamento delle masse d'aria a livello stradale, favorendo la formazione di una "cappa" sopra la città all'interno della quale tendono a ristagnare sia gli agenti inquinanti sia il calore accumulato, accentuando così la severità dell'Isola di Calore Urbana (Milelli et al., 2023).

Il territorio, inoltre, presenta una rilevante risorsa di mitigazione ambientale data da un reticolo idrografico composto da quattro corsi d'acqua principali che attraversano il tessuto urbano: il Po, la Dora Riparia, la Stura di Lanzo e il Sangone. Questi fiumi, insieme alle rispettive fasce pertinenziali e ripariali, non costituiscono soltanto elementi idrici, ma si configurano come grandi infrastrutture verdi e blu di importanza strategica per la resilienza cittadina, fornendo un fondamentale servizio ecosistemico di microregolazione termica (Broadbent et al., 2019; Ledda et al., 2021).



Legenda

Circoscrizioni Torino

- Circoscrizione I
- Circoscrizione II

- Circoscrizione III
- Circoscrizione IV
- Circoscrizione V
- Circoscrizione VI

- Circoscrizione VII
- Circoscrizione VIII
- Circoscrizione IX
- Circoscrizione X

Quartieri Torino

- 1 Filadelfia
- 2 Lucento
- 3 Borgo Vittoria
- 4 Aurora
- 5 Falchera
- 6 San Donato
- 7 Centro
- 8 Madonna del Pilone
- 9 Pozzo Strada
- 10 Cavoretto

- 11 Nizza
- 12 Rebaudengo
- 13 Borgo Vittoria
- 14 Barriera di Milano
- 15 Lingotto
- 16 Sassi
- 17 Crocetta
- 18 Betolla
- 19 San Salvario
- 20 Barca
- 21 Regio Parco
- 22 Cenisia

- 23 Mirafiori Sud
- 24 Borgo Po
- 25 Parella
- 26 Madonna di campagna
- 27 Cit Turin
- 28 Villaretto
- 29 Mirafiori Nord
- 30 Campidoglio
- 31 Vallette
- 32 Borgo San Paolo
- 33 Santa Rita
- 34 Vanchiglia

Figura 1 – Collocazione geografica, articolazione amministrativa e scomposizione territoriale del Comune di Torino: ripartizione dei quartieri storici all'interno delle 10 circoscrizioni municipali

Tuttavia, l'azione di mitigazione della rete idrografica deve confrontarsi con un tessuto urbano fortemente antropizzato, dove il consumo di suolo totale al 2021 corrisponde a circa il 62% della superficie comunale (Regione Piemonte, 2023). Come viene riportato nella Tabella 1, si registra un incremento di tale espansione nel periodo compreso tra il 2013 e il 2021, in particolare per quanto riguarda le infrastrutture viarie

Nel periodo considerato, le superfici destinate alle infrastrutture hanno registrato un incremento considerevole, quasi raddoppiando la propria estensione. Si è passati infatti da 350 ettari a 610 ettari, evidenziando una variazione percentuale pari al +74.29%. Specificare questa tendenza è fondamentale in un'ottica in cui il territorio risulta ormai diffusamente urbanizzato; gli elevati tassi di consumo e di impermeabilizzazione sono infatti fattori che incidono pesantemente sull'intensità dell'Isola di Calore Urbana. Queste superfici artificiali accumulano grandi quantità di calore durante il giorno e ne ostacolano la successiva dissipazione durante le ore notturne, alimentando la formazione della cappa termica sopra la città (Oke, 1982).

Tabella 1 - Consumo di suolo del comune di Torino al 2013 (fonte: Elaborazione propria a partire dal rapporto di Regione Piemonte (2023))

Consumo di suolo (CS) di Torino al 2013 e al 2021									
Comune	Superficie	CSU Urbanizzato		CSI Infrastrutture		CSR Reversibile		CSU = CSU + CSI Irreversibile	
	(ha)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
2013	13.001	7.347	56.51	350	2.69	110	0.84	7.806	60.05
2021	13.001	7.406	56.96	610	4.69	108	0.83	8.124	62.48

Andando ad analizzare nel dettaglio la copertura del suolo, attraverso la classificazione sperimentale del progetto europeo EAGLE Characteristics (Figura 2), la quale si basa sulle geometrie del dataset vettoriale BDTRE (Regione Piemonte, 2024), si ottiene un buon grado di dettaglio territoriale.

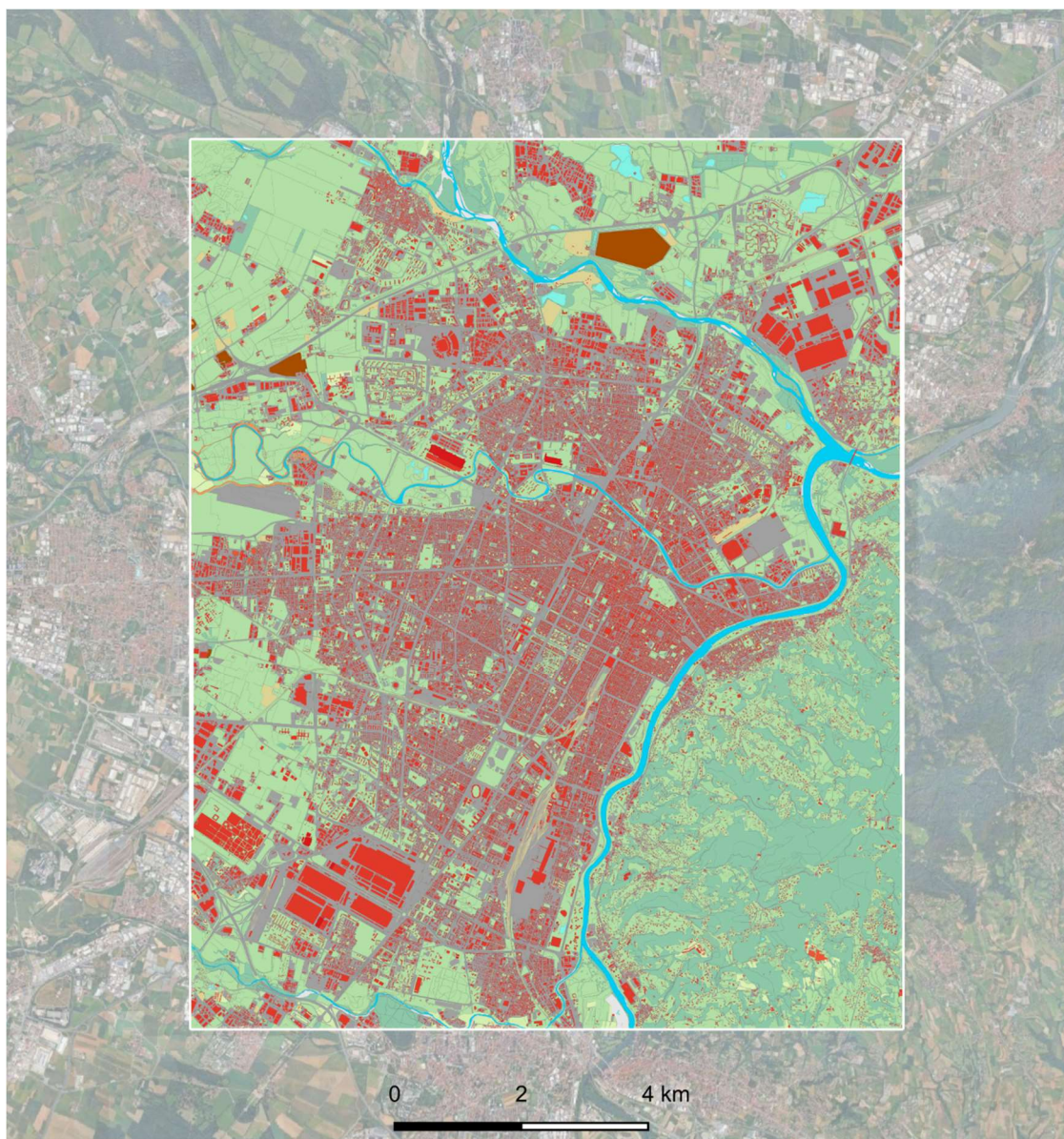
Dalla carta è possibile notare come emerge una marcata divisione spaziale e funzionale tra la superficie pianeggiante e quella collinare. Difatti si può notare, osservando la sezione centrale e occidentale della città, come vi è una netta dominanza dell'urbanizzazione, caratterizzata principalmente dalle classi relative all'edificato (classe 1111) e alle superfici impermeabili aperte (classe 11122). Si distinguono chiaramente, quindi, le geometrie degli edifici e le reti delle infrastrutture viarie che vanno a delineare i canyon urbani centrali. Allo stesso tempo, è possibile identificare a occhio nudo i grandi poli industriali periferici, come il nodo di Mirafiori nel settore meridionale e gli insediamenti logistici a nord, i quali si configurano come aree urbanizzate di massicce dimensioni.

La densa urbanizzazione si contrappone in modo diretto alla porzione collinare della città, dove si registra la prevalenza delle classi vegetate (2, 211 e 22) con una grande percentuale di aree boschive naturali che costituiscono un fattore fondamentale a livello microclimatico del territorio.

Al contrario, il tessuto edificato della pianura risulta interrotto quasi esclusivamente dal disegno lineare dei quattro corridoi idrografici principali. E, sebbene lungo le aree limitrofe ai fiumi sia presente una fascia vegetata ripariale, spostandosi verso i quartieri più centrali, la presenza di verde diventa sporadica. All'interno del tessuto consolidato si riscontra la presenza di grandi parchi urbani, tra cui il Parco della Pellerina, il Parco Dora,

i Giardini Reali, il Parco dei Cavalieri di Vittorio Veneto e il Parco Ruffini, che agiscono come isolate macchie verdi che. Importante è evidenziare che all'interno del dataset non vi è la presenza di alberi singoli o in formazioni lineari. Di conseguenza, l'intera rete dei viali alberati che caratterizza storicamente la città di Torino e che svolge un ruolo fondamentale nell'offrire ombreggiamento e servizi ecosistemici favorevoli alla dissipazione del calore, non viene rappresentata qui. Le implicazioni di tale mancanza, in particolare sulla stima finale delle temperature, verranno discusse in dettaglio nel paragrafo 6.1 riguardante i limiti della ricerca.

Infine, la cartografia permette di visualizzare la contrapposizione tra il nucleo compatto e le aree esterne e periurbane della pianura. In queste zone limitrofe si registra una maggiore presenza di superfici permeabili (classe 22, 221,222).



Legenda

Land Cover Piemonte - Classificazione Eagle Characteristics

- 1111 - Edifici
- 11111 - Edifici convenzionali
- 11112 - Edifici specializzati
- 1112 - Altre costruzioni
- 11121 - Strutture e impianti specializzati

- 11122 - Superfici impermeabili aperte
- 1121 - Discariche
- 1122 - Superfici permeabili aperte
- 122 - Aree non vegetate
- 1221 - Detriti minerali
- 2 - Vegetato
- 211 - Alberi
- 212 - Arbusti, macchia

- 22 - Copertura erbacea
- 221 - Graminacee
- 222 - Non Graminacee
- 3121 - Corsi d'acqua
- 3122 - Acque ferme

Elementi di base

- Differenza simmetrica

Figura 2 - Land cover classificato secondo distinzione del progetto europeo EAGLE Characteristics

3.2. Caratterizzazione climatica: analisi storica delle ondate di calore a Torino.

Per poter effettivamente analizzare l'Isola di Calore urbana (UHI) nel contesto torinese è necessaria una breve introduzione per spiegare e valutare le dinamiche microclimatiche locali. È infatti fondamentale considerare le tendenze storiche legate al progressivo innalzamento delle temperature registrato negli ultimi decenni e al costante aumento della frequenza e dell'intensità delle ondate di calore causate dal cambiamento climatico, che incidono sul fenomeno delle UHI. Esiste uno stretto legame tra le anomalie termiche su vasta scala e l'intensificazione del microclima cittadino; infatti, l'innalzamento delle temperature medie globali si riflette direttamente a livello locale esasperando la vulnerabilità del tessuto costruito e della città in generale (IPCC, 2022).

Il cambiamento climatico nel contesto di Torino è evidente nella netta inversione di tendenza avvenuta negli ultimi tre decenni, come illustrato dal grafico in Figura 3. Mentre per il periodo compreso tra il 1989 e i primi anni 2000 vi è una forte alternanza di anomalie negative (in arancione) e debolmente positive (in rosso), per l'ultimo decennio vi è, invece, una dominanza di anomalie positive, con picchi significativi registrati nel 2017, 2019 e 2020 che sfiorano e consolidano incrementi vicini a +1 °C rispetto alla norma storica (Ledda et al., 2021)

Dal grafico si evince chiaramente come l'anomalia negli ultimi anni sia sempre di circa +1°C e la situazione potrebbe ancora peggiorare, visto il l'andamento regionale di aumento costante, e viene così calcolato dall'ARPA come un “un trend positivo di circa +0.4 °C ogni 10 anni”.

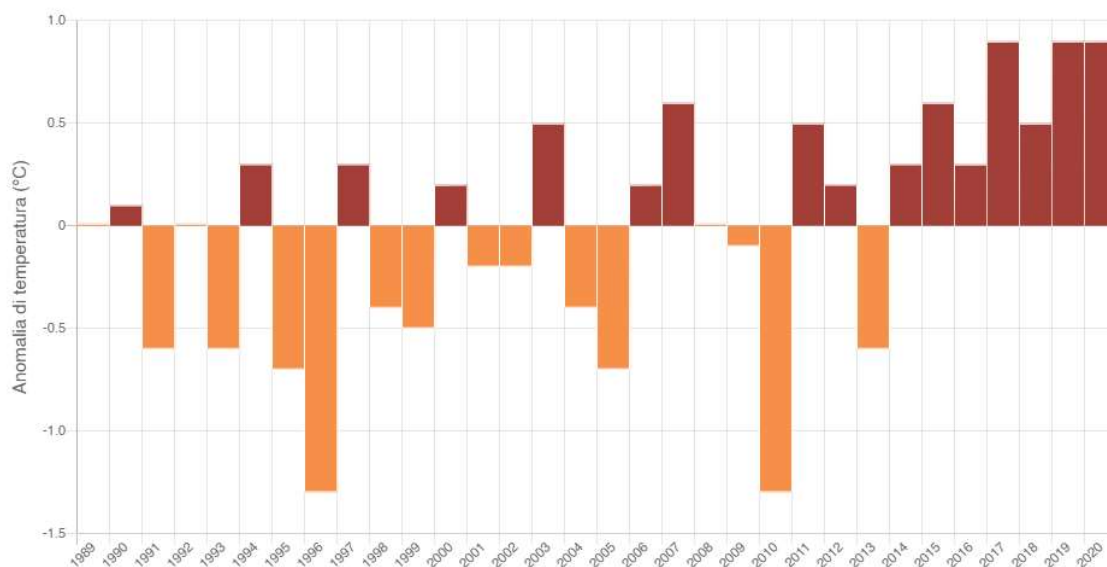


Figura 3 – “Andamento dell'anomalia annuale di temperatura media calcolata rispetto alla temperatura annuale media sul periodo 1989-2020” LEDDA et al. (2021)

In un contesto globale in costante evoluzione verso maggiori instabilità, le città sono i luoghi più vulnerabili a tali ondate di calore in quanto, come già spiegato, a causa della loro stessa natura fisica, morfologica e funzionale tendono ad agire come dei veri e propri amplificatori termici a parità di radiazione solare ricevuta rispetto ad un ambito rurale, causando un ristagno del calore (Oke, 1987; Stull, 1988). Inoltre, nel contesto torinese

tale ristagno è intrinsecamente legato alle caratteristiche morfologiche del bacino torinese. L'orografia complessa della pianura piemontese, chiusa su due lati dall'anfiteatro alpino e dal sistema collinare, ostacola la circolazione d'aria profonda, creando una conseguente “cappa di calore” che potrebbe dissolversi solo in presenza di eventi di ventilazione significativi (Regione Piemonte, s.d.).

In ultimo sono rappresentati due grafici che mostrano l'andamento climatico dell'ultimo trentennio a Torino, messi a disposizione dalla fondazione CMCC (Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici) (Ledda et al., 2021).

Essi aiutano a comprendere la distribuzione temporale del carico termico che grava sulla città e nel dettaglio il primo (Figura 4), illustra il ciclo annuale, espresso in percentuale di giorni al mese, per tre parametri fondamentali registrati nel periodo 1989-2020: i giorni freddi, i giorni molto caldi e le notti calde.

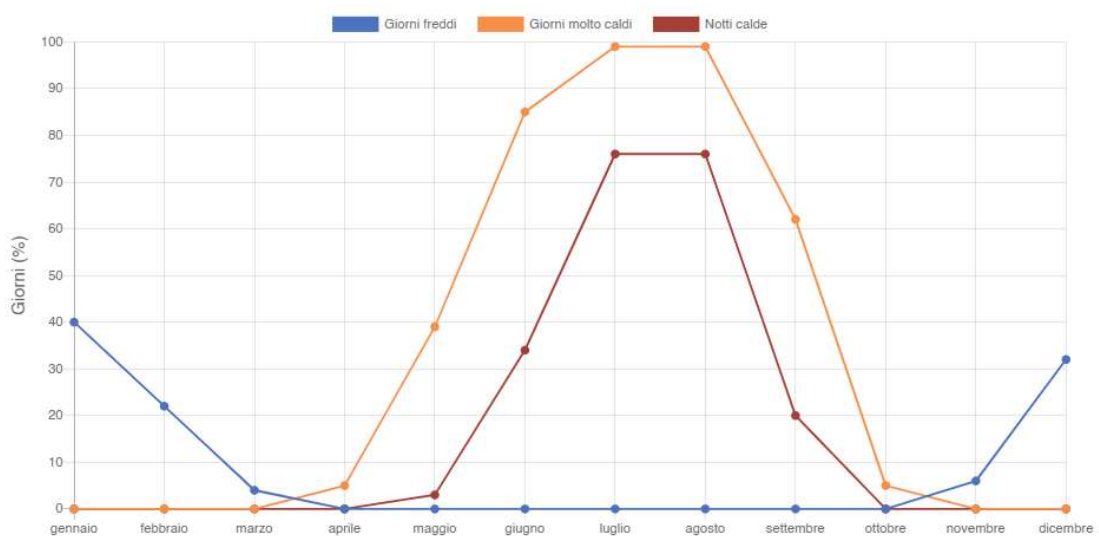


Figura 4 – “Rappresentazione del ciclo annuale (percentuali di giorni al mese) per gli indicatori descritti come giorni freddi (frost days, FD), notti calde (tropical nights, TR) e giorni molto caldi (summer days, SU) sul periodo 1989-2020” Ledda et al. (2021)

Dal grafico emergono chiaramente tre evidenze climatologiche determinanti per spiegare l'esasperazione dell'Isola di Calore Urbana nei mesi estivi. In primo luogo, l'andamento estivo dei giorni molto caldi (caratterizzati da temperature massime superiori ai 25 °C) mostra che nei mesi di luglio e agosto la loro percentuale è del 100%. Ciò significa che per l'intero bimestre estivo la città è costantemente sottoposta alla radiazione solare, comportando un accumulo di calore nel tessuto urbano (ΔQ_s) (Oke, 1982).

In secondo luogo, il picco critico delle notti calde (linea marrone) registra un'impennata speculare proprio in corrispondenza di luglio e agosto, stabilizzandosi su valori vicini al 76%. Questo dato è cruciale, in quanto, più di tre notti su quattro, l'atmosfera cittadina non riesce a rinfrescarsi.

L'effetto di sfasamento termico giornaliero è visibile dalla perfetta concordanza geometrica tra il picco dei giorni molto caldi e il picco delle notti calde. Ciò è indice del meccanismo di accumulo e rilascio del calore descritto in precedenza, dove l'energia immagazzinata durante il giorno (100% di giorni caldi) si traduce direttamente in una incapacità di raffrescamento notturno (76% di notti tropicali).

Il grafico successivo (Figura 5), invece, mostra come sono variate le temperature nel corso degli anni per i giorni molto caldi, le notti calde e i giorni freddi e rappresenta chiaramente le dinamiche del cambiamento climatico in atto a Torino su scala trentennale.

L'andamento mostra che la percentuale di notti calde (linea marrone) è salita stabilmente da una media del 15% a circa il 20% dei giorni dell'anno, tendenza analoga visibile anche nelle giornate calde in aumento di circa il 3%. Per quanto riguarda le notti calde si nota anche come negli ultimi anni non vi è la presenza di picchi al di sotto del trend, rendendo evidente come queste siano sempre in crescita.

Infine, ultimo fattore non meno importante è l'andamento inverso dei giorni freddi; essi, infatti, sono in calo scendendo da una media del 10% a meno del 7% nell'ultimo decennio, sintomo del cambiamento climatico globale.

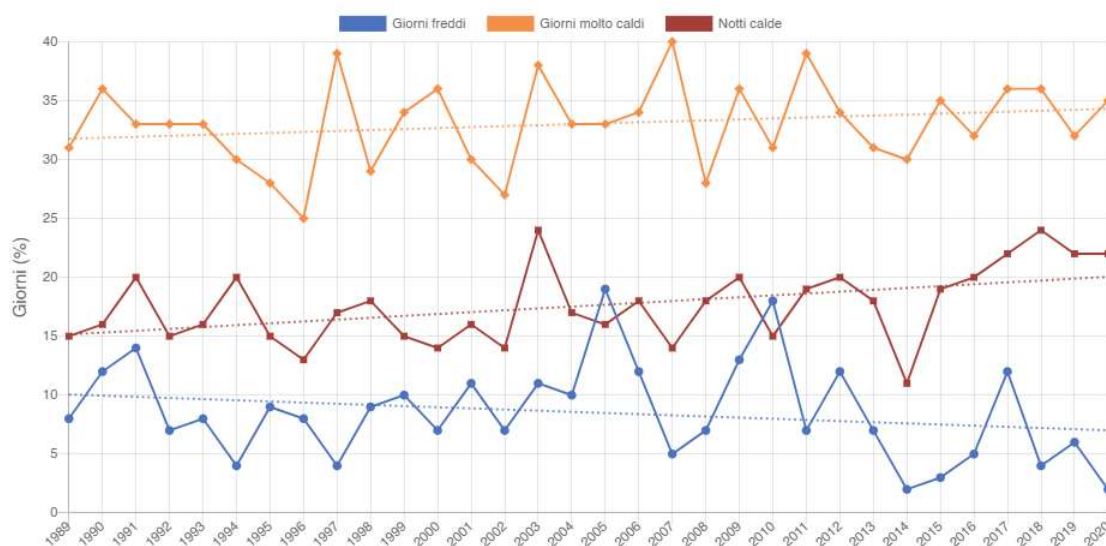


Figura 5 - "Andamento annuale (percentuali di giorni l'anno) per gli indicatori descritti come giorni freddi (frost days, FD), notti calde (tropical nights, TR) e giorni molto caldi (summer days, SU) sul periodo 1989-2020" Ledda et al. (2021)

3.3. Inquadramento morfologico tramite Local Climate Zones (LCZ) e rete di monitoraggio

Le Local Climate Zones (LCZ) sono state introdotte da Stewart e Oke (2012) e costituiscono uno dei sistemi di classificazione internazionale per studiare il microclima urbano. Esse, non dividono la città in modo tradizionale, come nel caso della Land Cover, ma la dividono in base a come le caratteristiche morfologiche omogenee e la copertura del suolo interagiscono con le condizioni microclimatiche dell'area urbana. (Stewart and Oke, 2012).

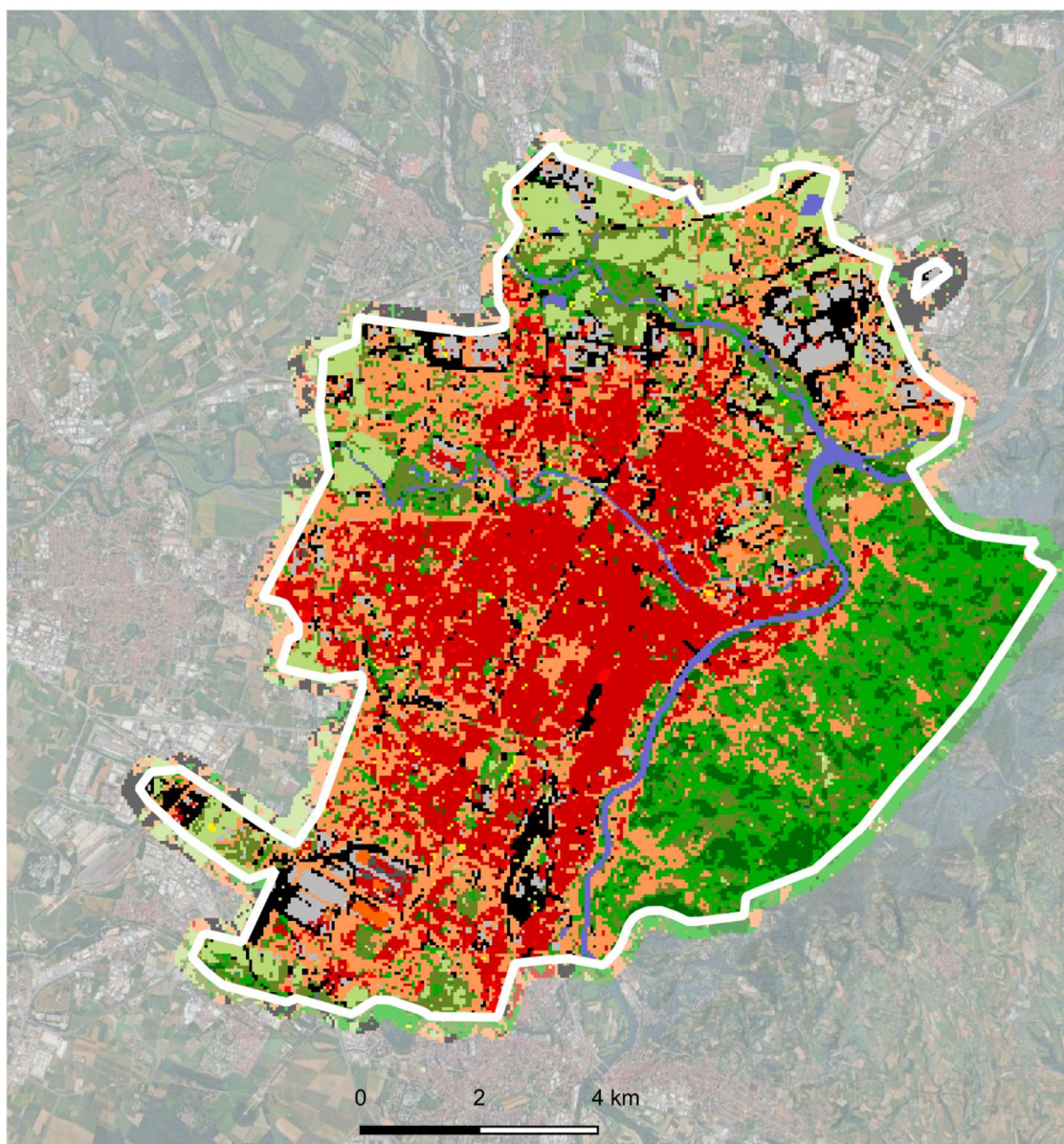
La classificazione prevede 17 classi, di cui 10 per il contesto urbano costruito e 7 per i suoli naturali. Le zone sono definite da dei parametri fisici precisi come l'altezza dei palazzi, la vicinanza tra gli edifici, i materiali presenti, la presenza di alberi o elementi vegetali e la permeabilità del suolo.

Le LCZ possono essere rappresentate attraverso differenti livelli di dettaglio spaziale. Nel presente quadro conoscitivo è stata riportata la cartografia alla risoluzione di 50 metri (Figura 6) messa a disposizione da ARPA Piemonte.

Questo layer utilizza le 17 classi standard, visibili nella relativa legenda, e mostra un grado di dettaglio geometrico particolarmente elevato. Grazie a questa specifica risoluzione spaziale, il dataset è in grado di individuare accuratamente lo sviluppo dei corsi d'acqua che attraversano il territorio torinese ed è in grado di distinguere con precisione l'assetto del tessuto edificato compatto. All'interno del nucleo di Torino si nota infatti come la parte centrale sia interamente dominata da classi appartenenti al tessuto compatto, costituito da edifici di media e bassa altezza (classi 2 e 3). La mappa permette anche di distinguere i grandi complessi edificati presenti sul territorio che influenzano il microclima locale, come ad esempio l'area ex-industriale di Mirafiori nel settore meridionale, i distretti produttivi posizionati a nord e lo stadio a nord-ovest.

Dalla carta si evince anche in modo nitido la copertura naturale della parte collinare, dove emerge in modo prominente, che all'interno del tessuto urbano. Difatti, emergono in modo evidente le aree densamente alberate e le zone verdi, comprese le fasce vegetate lungo le sponde dei corridoi idrografici. Tuttavia, è necessario evidenziare che per quanto riguarda gli elementi più puntuali, questo tipo di risoluzione spaziale non è in grado di localizzare in modo isolato i singoli alberi o la presenza sporadica di elementi vegetati minori, tra cui anche i viali alberati che caratterizzano la città. Ciononostante, i grandi parchi urbani e i giardini pubblici risultano chiaramente visibili e perfettamente definiti, garantendo un livello di dettaglio complessivamente ottimale. Questa specifica rappresentazione costituisce la base utilizzata dall'ente regionale nelle proprie indagini microclimatiche, i cui risultati costituiranno il termine di confronto per la successiva validazione del modello TARGET oggetto di questo elaborato di tesi.

Inoltre, l'introduzione delle LCZ completa il quadro conoscitivo della città, restituendo un livello informativo diverso e complementare rispetto alla copertura del suolo. Le due informazioni risultano tematicamente in parte sovrapponibili, ma le LCZ non identificano nel dettaglio la localizzazione esatta dei singoli elementi urbani come, ad esempio, le strade. Permettono invece di classificare la tipologia del contesto costruito, con particolare riferimento alla compattezza dell'edificato. Proprio in questo aspetto risiede la differenza sostanziale nell'utilizzo dei dataset tra i due approcci: l'ente regionale ha sfruttato le LCZ come base territoriale per le proprie indagini climatiche, mentre il modello TARGET basa il proprio calcolo fisico sui dati di Land Cover.



Legenda

Global LCZ Map risoluzione spaziale a 50m

- 1 - Compact high-rise
- 2 - Compact midrise
- 3 - Compact lowrise
- 4 - Open highrise
- 5 - Open midrise
- 6 - Lightweight lowrise

- 7 - Lightweight lowrise
- 8 - Large lowrise
- 9 - Sparsely built
- 10 - Heavy industry
- 11 - Dense trees
- 12 - Scattered trees
- 13 - Bush, scrub
- 14 - Low plants

- 15 - Bare rock or paved
- 16 - Bare soil or sand
- 17 - Water

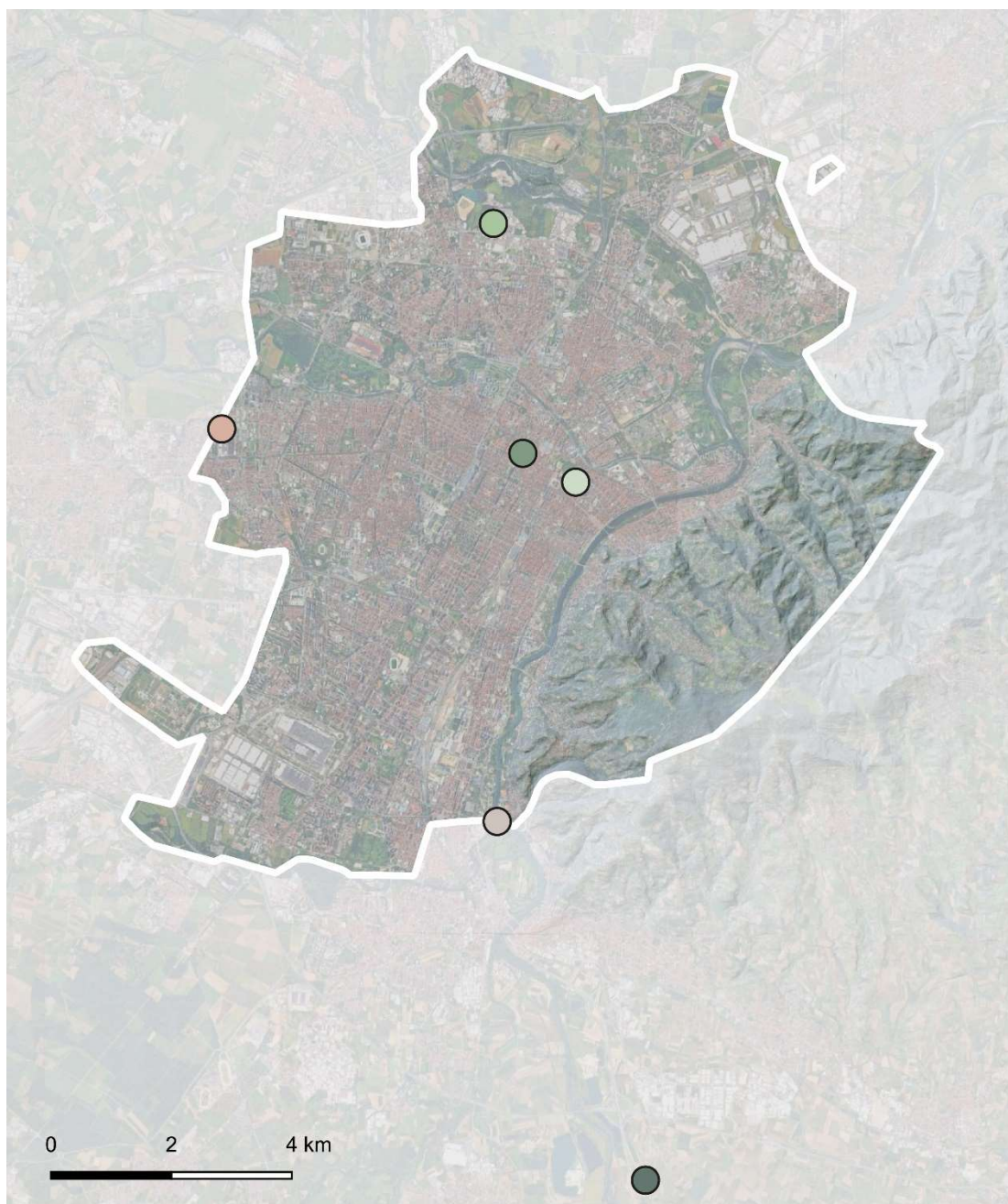
Elementi di base

- Confine Comunale

Figura 6 - Global Local Climate Zone Map con risoluzione spaziale di 50 m.

L'ultima analisi utile a definire il quadro microclimatico locale riguarda l'inquadramento territoriale delle stazioni meteorologiche (Figura 7). La rete di monitoraggio a terra assume un'importanza fondamentale, in quanto le stazioni sono state prese come riferimento, sia dall'ente ARPA Piemonte sia in questo lavoro di lavoro di tesi, per l'estrazione dei dati di input e di validazione. Trattandosi di elementi di misurazione reali e puntuali, queste centraline consentono di analizzare le dinamiche fisiche in atto e risultano indispensabili per il monitoraggio costante della situazione climatica sul territorio piemontese.

La registrazione continua e sistematica delle variabili atmosferiche da parte delle stazioni non supporta soltanto le attività meteorologiche tradizionali, ma fornisce una base conoscitiva essenziale per i ricercatori e per i pianificatori territoriali, permettendo di mantenere un controllo costante sulle risposte termiche della città. Per tali motivi, nelle sezioni seguenti vengono presentate le stazioni meteorologiche, ad esclusione delle tre che montano sensori idrometrici lungo i percorsi dei fiumi (Torino Murazzi Po, Torino Doria Riparia e Torino Stura Di Lanzo.) e quella presa a riferimento per le analisi nel comune di Moncalieri. Di queste ne vengono descritte nel dettaglio le specifiche caratteristiche del contesto in cui ricadono e dell'uso del suolo circostante nonché le rispettive classificazioni.



Legenda

Stazioni meteorologiche

	Bauducchi		Torino Giardini Reali
	Torino Via della Consolata		Torino Vallere
	Torino Reiss Romoli		Torino Alenia

Figura 7 - Inquadramento delle stazioni meteorologiche rispetto ai confini di Torino

Tabella 2 - Classificazione riferita al contesto in cui le stazione meteorologiche ricadono

Stazione Meteorologica	Classificazione
Torino Via della Consolata	Urbana
Torino Alenia	Urbana
Torino Reiss Romoli	Urbana
Torino Giardini Reali	Urbana
Torino Vallere	Urbana
Bauducchi (Moncalieri)	Rurale

Nel dettaglio, la localizzazione delle stazioni meteorologiche presenti a Torino e di quella di Bauducchi è riportata su base cartografica satellitare (Google, 2026), al fine di analizzare le specifiche caratteristiche dei contesti in cui sono inserite. Esse saranno poi oggetto di analisi e confronto nei capitoli successivi.

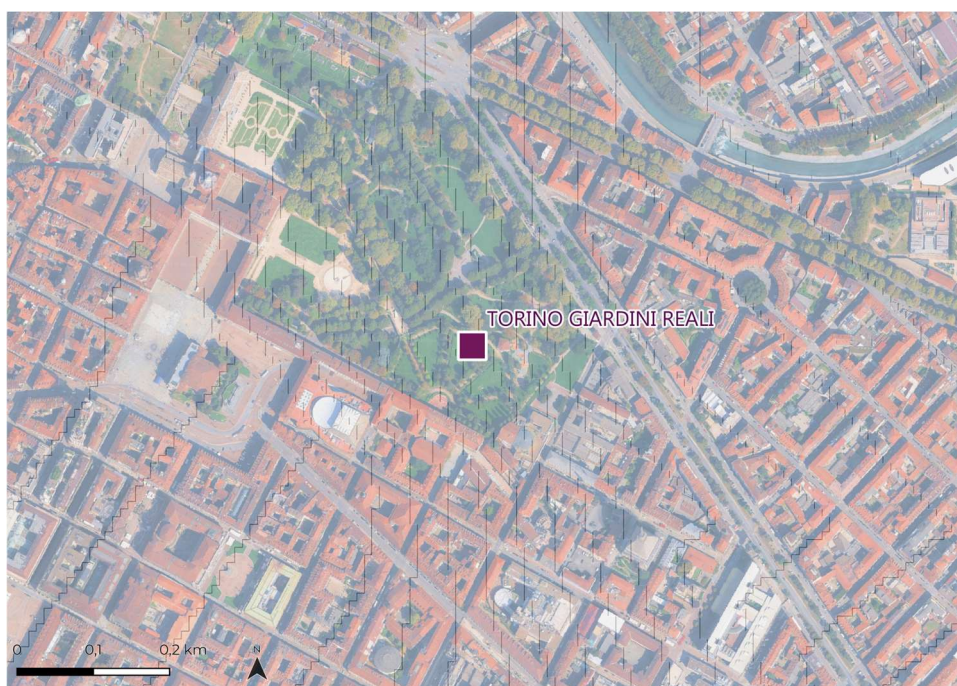


Figura 8 - Stazione di Torino Giardini Reali su base ortofoto Google (2026)

La SM di Torino Giardini Reali (Figura 8) si identifica come una stazione ibrida, situata in un'area verde centrale all'interno del contesto urbanizzato di Torino. Questo sito risente direttamente delle modificazioni microclimatiche apportate dall'ombreggiamento della componente vegetale, in particolare i prati e gli elementi verdi verticali presenti nel giardino, e dalla presenza di suolo permeabile. Tali caratteristiche influenzano la capacità dell'area di mitigare le temperature, assorbendo il calore diurno senza restituirlo intensamente all'atmosfera durante le ore notturne

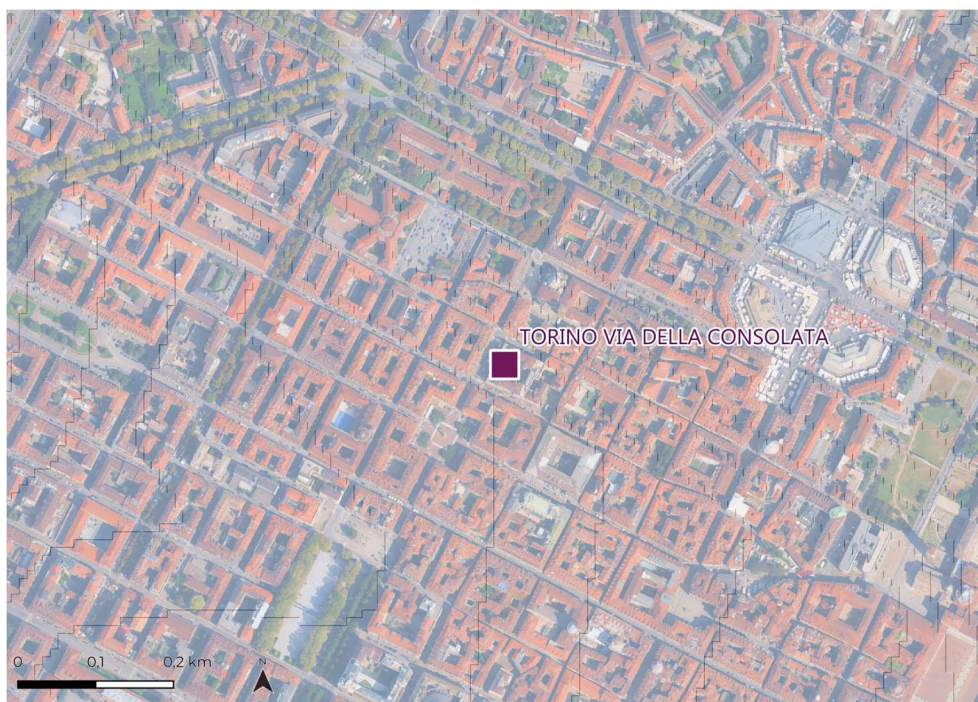


Figura 9 - Stazione di Torino Via della Consolata su base ortofoto Google (2026)

La stazione di Torino Via della Consolata (Figura 9), si configura come una stazione puramente urbana, posizionata nei pressi di Porta Palazzo, in un quadrante interamente appartenente al centro storico denso e compatto. Il tessuto circostante è caratterizzato da strade e palazzi di media altezza, con una sostanziale assenza di veri spazi verdi di microregolazione. Gli unici elementi vegetati presenti nei dintorni sono elementi lineari dati dalle alberature ed elementi puntuali, situati nelle piazze e negli spazi aperti asfaltati circostanti, limitando la presenza naturale a pochi elementi isolati nei dintorni.



Figura 10 - Stazione di Torino Alenia su base ortofoto Google (2026)

La terza stazione analizzata è quella di Torino Alenia (Figura 10); essa è situata al confine settentrionale della città, all'interno dei comparti produttivi, logistici e industriali della periferia torinese. La centralina è localizzata a ridosso di queste grandi strutture industriali, in un'area contraddistinta da una totale assenza di vegetazione e dalla prevalenza di superfici artificiali ad alto accumulo termico e a bassissima dissipazione del calore.



Figura 11 - Stazione di Torino Reiss Romoli su base ortofoto Google (2026)

Situazione analoga anche per la stazione di Torino Reiss Romoli (Figura 11), difatti, anche in questo caso, la centralina è localizzata all'interno di un tessuto misto e

industriale situato nella porzione al confine nord della città di Torino, in vicinanza di aree verdi extra-urbane. Il comparto si caratterizza per un'elevata densità di coperture industriali e per superfici ad alto accumulo termico; tuttavia, a differenza della stazione precedente, si riscontra qui la vicinanza esterna di un'ampia superficie verde e una maggiore presenza di piccoli elementi vegetativi e aree verdi, che erano invece del tutto assenti nel contesto di Alenia.

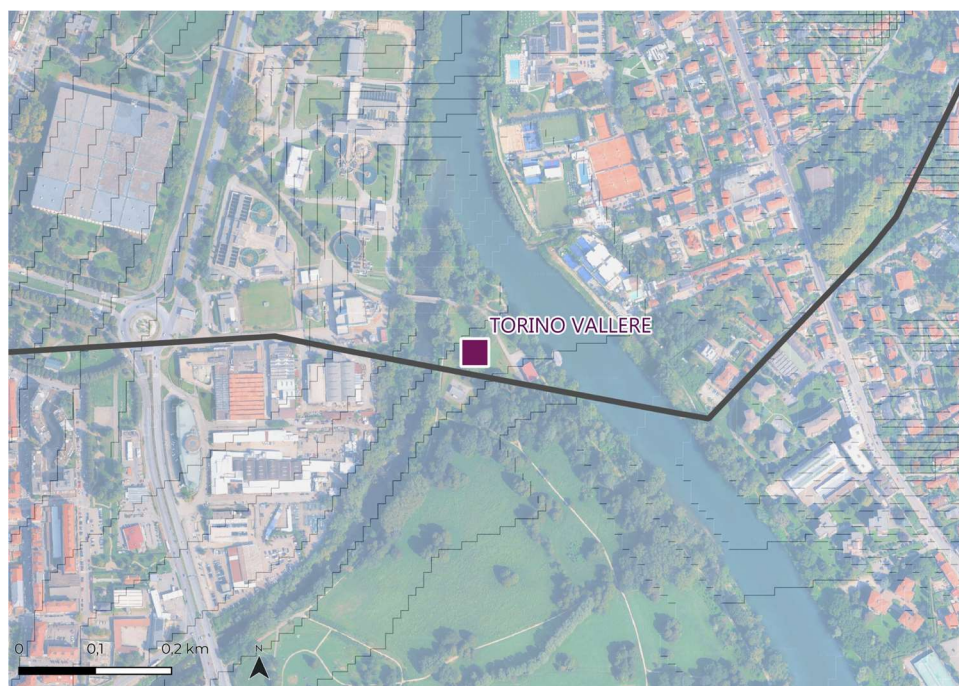


Figura 12 - Stazione di Torino Vallere su base ortofoto Google (2026)

La stazione di Torino Vallere (Figura 12) può essere definita come una stazione ibrida localizzata in uno spazio verde al confine sud della città, fuori dal centro urbano e situata a ridosso del fiume Po, in prossimità della confluenza con il fiume Sangone. Pur non trovandosi totalmente isolata dal centro abitato, questa viene influenzata direttamente a livello climatico dall'azione di queste infrastrutture blu.

Infine, l'ultima stazione analizzata è la stazione di Bauducchi (Figura 13). Essa è una stazione puramente rurale, localizzata nel comune di Moncalieri in un'area a bassissima densità edilizia, caratterizzata prevalentemente da infrastrutture viarie e da poche case sparse a tessuto discontinuo. La centralina è posizionata in campo aperto, circondata da terreni agricoli e quasi priva di elementi vegetali verticali, come alberi. Per queste caratteristiche, Bauducchi rappresenta la stazione di riferimento, utilizzata sia da ARPA Piemonte che nel presente lavoro di tesi, come termine di paragone rurale per il calcolo del bilancio termico dell'aria, secondo la metodologia discussa nel Capitolo 2.

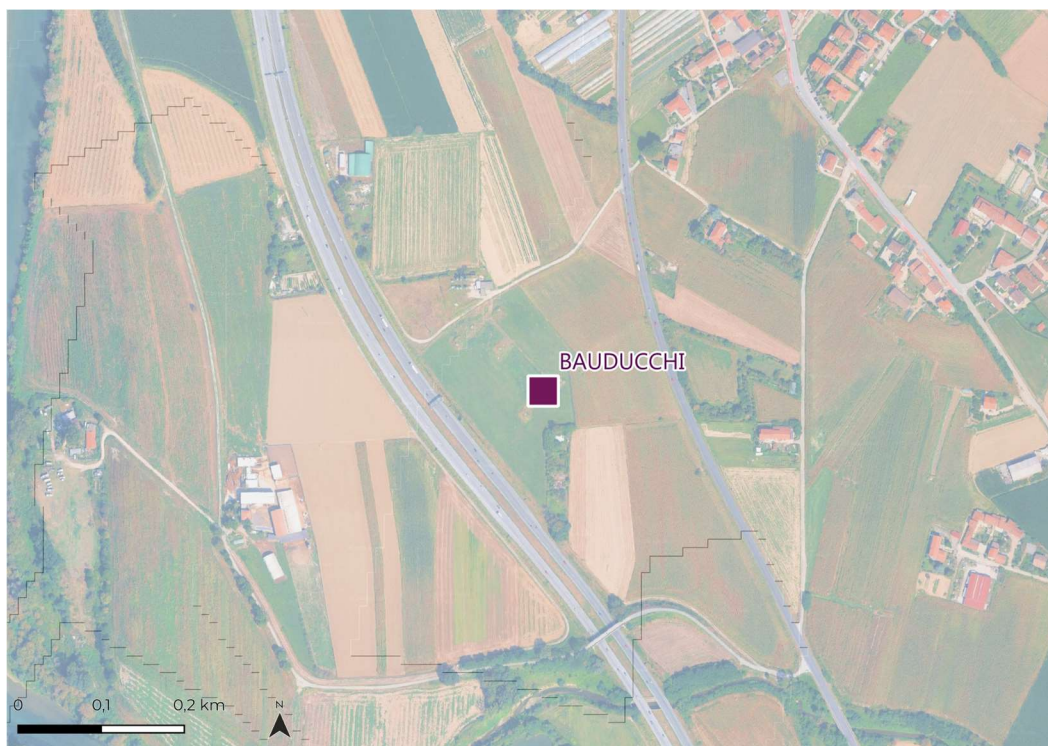


Figura 13 - Stazione meteo di Bauducchi su base ortofoto Google (2026)

4. Metodologia di Analisi e Simulazione

4.1. Il dataset ARPA: stazioni di monitoraggio, metadati e temperature di riferimento.

L'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale (ARPA) rappresenta il riferimento sul territorio per le questioni legate al monitoraggio, controllo e vigilanza dell'ambiente nonché la protezione della salute dei cittadini e dell'ecosistema.

Per questi motivi rappresenta sul territorio l'ente preposto al monitoraggio e alla previsione delle ondate di Calore, attraverso l'attivazione annualmente del sistema specifico chiamato Heat Health Watch System e anche al calcolo dell'indice di disagio bioclimatico basato sul Warm Day Alert.

Come conseguenza del suo ruolo, nel dicembre 2024, il *Dipartimento Rischi Naturali e Ambientali* ha redatto un rapporto dove spiega la metodologia che ha utilizzato per la produzione delle mappe delle isole di calore per il contesto torinese, nonché le relative mappe di rischio e pericolo.

L'equazione base utilizzata da ARPA per il calcolo del fenomeno è stata:

$$UHI = T_{urb} - T_{rur}$$

dove:

T_{urb} : temperatura urbana

T_{rur} : temperatura rurale

Per quantificare l'Isola di Calore ha, però, combinato due metodologie complementari, ossia: la prima che sfrutta un approccio osservativo basato sulle stazioni meteorologiche; e la seconda che utilizza un approccio modellistico, utilizzato per ottenere e "spalmare" i dati sulla mappa dell'intera città di Torino.

L'approccio osservativo per la produzione delle isole di calore è iniziato con la collaborazione del Politecnico di Torino, per la creazione di un innovativo sistema di classificazione delle stazioni meteo nel contesto torinese, che si basa sul loro comportamento termico, individuando tre categorie: rurali, ibride e urbane (ARPA Piemonte, 2024).

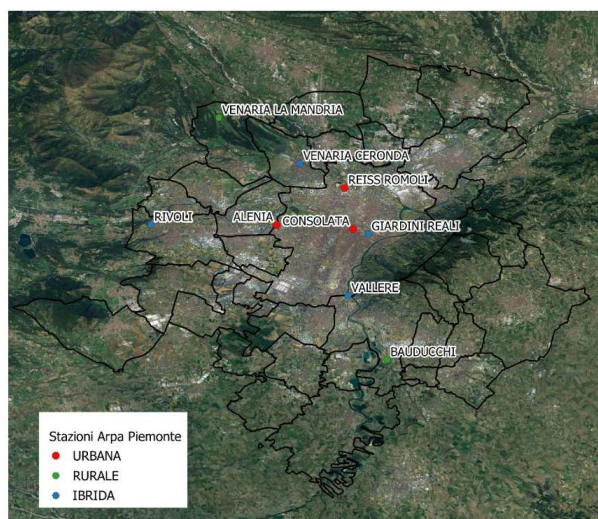


Figura 14 - “Stazioni della rete meteoidrografica di Arpa Piemonte nell’area di Torino e comuni limitrofi, classificate in urbane, rurali e ibride sulla base del loro comportamento termico” Fonte: ARPA Piemonte (2024), fig. 2

Grazie alla classificazione, sono state individuate due stazioni rurali (Bauducchi e La Mandria) per le quali è stata calcolata l’intensità dell’Isola di Calore all’interno della città per ogni stazione urbana, tramite l’equazione base prima riportata.

Il limite della semplice differenza risulta chiaro, cioè la mancanza della distribuzione spaziale dei dati della temperatura: per superare questo ostacolo, l’agenzia ha messo a punto un modello urbano (TERRA URB) che viene implementato ad uno meteorologico (COSMO), che insieme danno nome al modello, COSMO+TERRA URB.

Il secondo metodo rappresenta l’approccio modellistico: in questa fase sono stati dati “in input le caratteristiche geometriche e termiche degli edifici quali altezza, rapporto tra altezza e larghezza, superficie occupata dai tetti e dalle superfici impervie, capacità termica, etc.” (ARPA Piemonte, 2024, p. 8). Questi sono stati dedotti dalla classificazione delle Local Climate Zone, presi dal dataset globale ECOCLIMAP-SG alla risoluzione di 300 m, il che ha imposto un limite sulla risoluzione che le loro elaborazioni hanno dovuto utilizzare (ARPA Piemonte, 2024, p. 8).

Il modello restituisce la ricostruzione delle ondate di calore passate avvenute il 9-18 giugno 2022, il 21-27 luglio 2022, il 15-22 luglio 2023 e il 16-23 agosto 2023. L’elaborazione è stata effettuata sull’intera regione Piemonte con un focus su Torino e i comuni limitrofi. Il riferimento rurale per il calcolo delle UHI per tutte e quattro le simulazioni è stata la stazione meteorologica di Bauducchi.

I risultati ottenuti dall’ARPA mostrano che “il modello ben ricostruisce la distribuzione della temperatura sulla città e consente pertanto una buona rappresentazione del fenomeno di Isola di Calore” (Arpa Piemonte - Dipartimento Rischi Naturali e Ambientali, 2024). Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti dall’agenzia dove l’ente per le rappresentazioni in Figura 16, individua il periodo notturno dalle ore 20 alle 4 del mattino.

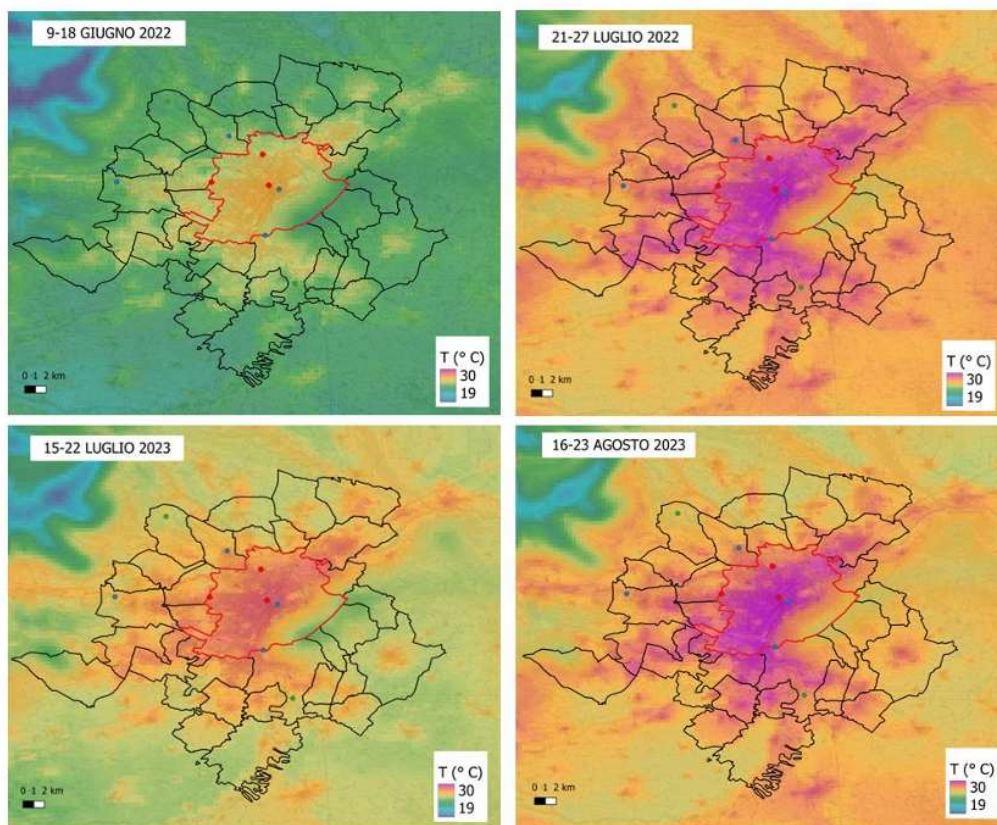


Figura 15 - "Mappe di temperatura a 2 metri media fornite dal modello COSMO+TERRA_URB per le 4 ondate di calore" Fonte: ARPA Piemonte (2024), fig. 7

All'interno della Tabella 3 sono riportati i parametri statistici calcolati dall'agenzia per la validazione del modello. In questa, per ogni simulazione (sim) vengono presi in considerazione gli indici statistici: Mean Bias (MB o Errore Medio); Root Mean Square Error (RMSE); e il Coefficiente di Correlazione R. I significati fisico e matematico di questi sono riportati e approfonditi nel paragrafo del confronto dei dati simulati dal modello ARPA e quello TARGET (Gli indicatori statistici).

Tuttavia, si può anticipare che grazie a questi valori è possibile confermare come il modello dell'ARPA segua l'andamento delle temperature reali con buona approssimazione. I valori simulati tendono a sovrastimare la realtà soltanto durante il caso studio di agosto 2023; in generale, lo scarto rispetto ai dati reali si mantiene contenuto e si attesta sotto i 2 °C di errore, con la sola eccezione del 21 luglio e della notte del 16 agosto.

Tabella 3 - "Indici statistici calcolati per i 4 casi studio e distinti in giorno e notte [20-4 UTC]". Fonte: ARPA Piemonte (2024) tab. 2[

Sim	Periodo della giornata	Parametri statistici		
		MB	RMSE	R
09/06/2022	Giorno	-0.04	1.62	0.89
09/06/2022	Notte	0.00	1.92	0.87
21/07/2022	Giorno	0.24	2.24	0.74
21/07/2022	Notte	0.95	1.74	0.84

15/07/2023	Giorno	0.44	1.65	0.87
15/07/2023	Notte	-0.05	1.27	0.82
16/08/2023	Giorno	1.04	1.95	0.90
16/08/2023	Notte	1.56	2.21	0.80

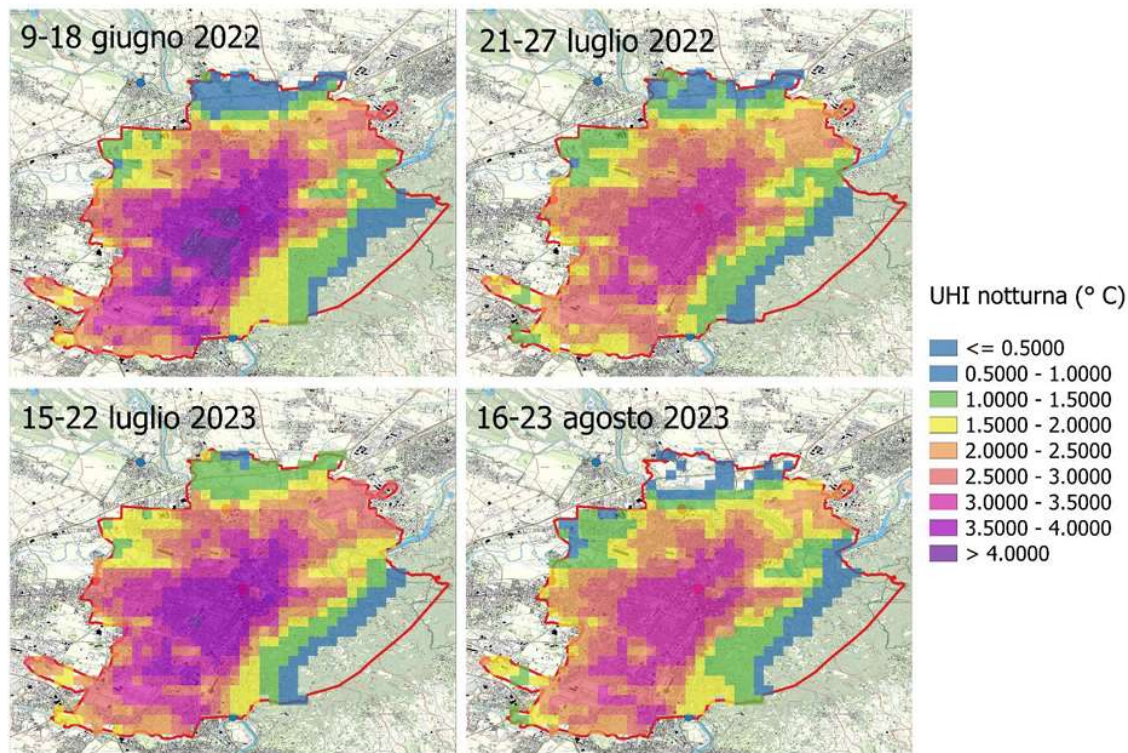


Figura 16 - Mappe di intensità dell'Isola di Calore (UHI) mediate sul periodo notturno [20-4 UTC] prodotte attraverso il modello COSMO+TERRA URB per le quattro ondate di calore simulate" Fonte: ARPA Piemonte (2024) fig. 12

4.2. Il flusso di lavoro UMEP/TARGET:

Il modello “The Air-temperature Response to Green/blue-infrastructure Evaluation Tool” (TARGET), implementato all'interno del plug-in UMEP, è uno strumento per la simulazione climatica urbana che permette di valutare l'efficacia delle infrastrutture verdi e blu nel contrasto alle alte temperature nei contesti urbani.

TARGET rappresenta una soluzione più efficace e accessibile rispetto ai modelli odierni, che permette all'utente di avere un numero contenuto di dati di input e allo stesso tempo accurato. (Broadbent *et al.*, 2019). Attualmente esistono altri modelli progettati per calcolare e valutare le dinamiche delle temperature all'interno dei contesti urbani, i quali sono ampiamente utilizzati per diverse tipologie di progetti. Si tratta tuttavia di modelli ad altissima risoluzione, come ENVI-met (risoluzione 1-5 metri), basato sulla fluidodinamica computazionale (CFD), o il framework microclimatico PALM-4U, che riporta delle rappresentazioni dettagliate dei processi microclimatici (Chen *et al.*, 2026).

Questi strumenti, pur essendo estremamente precisi, presentano tempi di elaborazione elevati e, di conseguenza, vengono applicati a scale territoriali di interesse ristrette, solitamente limitate alla dimensione della singola strada, e sono utili per la progettazione e la valutazione di possibili interventi NBS. TARGET, invece, è un tool migliore per un'analisi a livello urbano, in quanto esso è in grado, in tempi contenuti, di fornire informazioni termiche sull'intera estensione del territorio cittadino considerato, ed è stato progettato proprio per valutare l'inserimento e la funzionalità delle infrastrutture verdi e blu a scala di quartiere urbano. (Chen *et al.*, 2026)

Inoltre, sebbene i modelli microclimatici ad alta risoluzione siano ottimi strumenti capaci di offrire risultati chiari, richiedono competenze altamente specifiche, rendendoli di fatto accessibili solo a professionisti in ambiti specialistici.

D'altra parte, l'utilizzo di modelli meteorologici a scala più ampia, come il WRF (Weather Research and Forecasting), per analisi intra-urbane comporterebbe il rischio di approssimare eccessivamente il dato (Chen *et al.*, 2026).

Alla luce di queste considerazioni, quindi, TARGET è risultato il modello ottimale, motivo per il quale è utilizzato nel presente studio. Esso riesce a colmare le lacune tra la micro e la meso scala, garantendo un buon grado di approssimazione senza generare grossi errori (Chen *et al.*, 2026). Lo strumento restituisce un dato realistico e, essendo efficiente dal punto di vista computazionale grazie ai suoi tempi di calcolo ridotti, risulta accessibile e utilizzabile da un'utenza molto più ampia (Chen *et al.*, 2026), inoltre, anche i dati di input richiesti sono direttamente reperibili e di immediato utilizzo, come le temperature dell'aria o i file raster territoriali che descrivono la conformazione del terreno, disponibili sui portali web delle istituzioni.

Il modello numerico, infatti, permette di calcolare la temperatura dell'aria a livello stradale e la temperatura superficiale nei canyon urbani, e, grazie alla sua implementazione all'interno di UMEP, è possibile averli restituiti anche a livello grafico.

4.2.1. INTRODUZIONE AL MODELLO: DATI DI INPUT E REQUISITI DI BASE

L'implementazione del modello TARGET richiede necessariamente la predisposizione di un dataset formattato secondo le indicazioni del plugin UMEP. I valori richiesti in input sono differenti e di diversa natura:

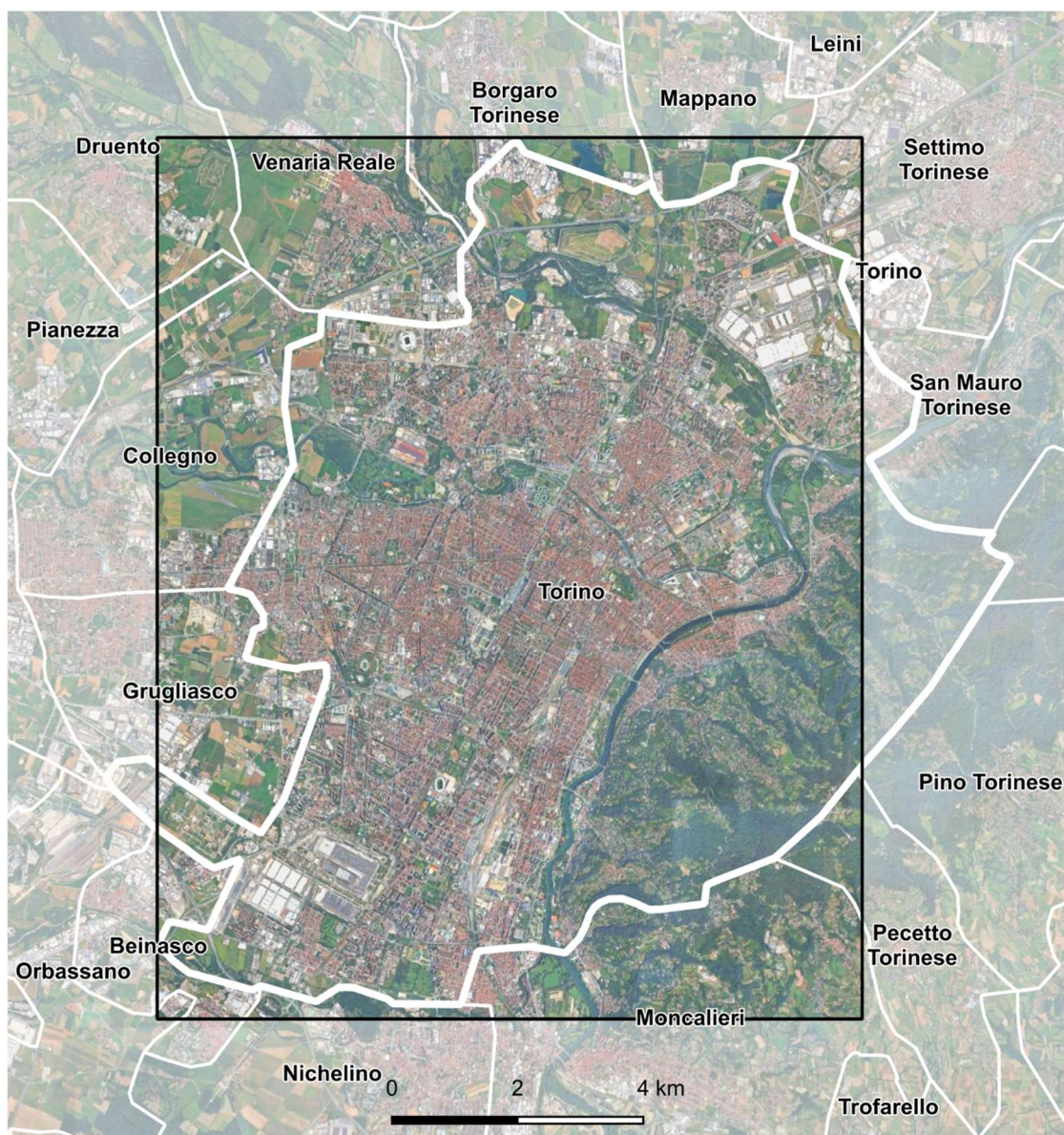
- Griglia vettoriale, la quale risulta necessaria alla delimitazione dell'area studio e rappresenta l'unità spaziale di calcolo su cui viene applicato il modello (vedi paragrafo *La griglia vettoriale*). Ogni cella è indipendente e possiede un ID univoco per la sua identificazione durante tutti i processi;
- Land Cover, un file raster che definisce la tipologia di copertura del suolo e che deve seguire la formattazione specifica UMEP, presentata nel paragrafo *La Land Cover*. Essa è fondamentale in quanto i materiali, attraverso le loro caratteristiche fisiche, influenzano direttamente il bilancio energetico;
- Modelli digitali di elevazione (DSM e DEM/DTM), tramite i quali è possibile ricostruire la morfologia del territorio
- Dati meteorologici, riportati come file di testo contenenti le variabili climatiche orarie, al cui interno devono essere contenute necessariamente la Ta (Temperatura a 2m), la velocità del vento, le precipitazioni, la pressione atmosferica e la radiazione solare (Lindberg, F., et al., 2019). Per la natura propria del modello TARGET è importante che questi dati siano provenienti da una stazione meteorologica posizionata in un'area extraurbana o, preferibilmente, rurale (Broadbent et al., 2019). Il file deve anch'esso essere strutturato secondo gli standard UMEP.

4.2.2. IL CASO STUDIO: DEFINIZIONE DELL'AREA

L'estensione areale del caso studio è la città di Torino e alcune aree contermini; tuttavia, l'area effettiva delle elaborazioni spaziali non copre l'intero territorio urbano, andando ad escluderne alcune porzioni periferiche. Tale delimitazione non costituisce una scelta arbitraria, bensì un vincolo tecnico-operativo imposto dalla copertura spaziale del file di input relativo al Modello Digitale delle Superfici (DSM), fornito dal laboratorio SDG11Lab del Politecnico di Torino.

Il DSM è il dataset con l'estensione territoriale più contenuta tra tutte le fonti a disposizione, rappresentando il fattore spaziale maggiormente limitante per l'analisi. Per garantire la coerenza e la sovrapponibilità spaziale di tutti i layer utilizzati, si è reso necessario assumere l'estensione del raster DSM come riferimento. Di conseguenza, tutti gli altri dati di input, originariamente dotati di una copertura più estesa, sono stati ritagliati per farli coincidere esattamente con l'estensione massima consentita dal file.

L'estensione dell'area studio occupa una superficie totale di 180 km², occupando la quasi totalità della superficie del comune di Torino e una porzione di alcuni comuni appartenenti alla prima cintura della città (Figura 17): Venaria Reale, Collegno, Pianezza, Druento, Borgaro T.se, Mappano, Settimo T.se, San Mauro T.se, Pecetto, Moncalieri, Nichelino, Beinasco e Grugliasco. Questo ha comportato un'esclusione di alcune parti periferiche della città di Torino che, come si vedrà, non sono considerate neanche dalle cartografie prodotte da ARPA. Perciò, questa delimitazione dell'area non comporta un problema ai fini della comparazione.



Legenda

- Area di studio
- Confini comunali

Figura 17 - Delimitazione dell'area di interesse e area di studio

4.2.3. DATI DI INPUT

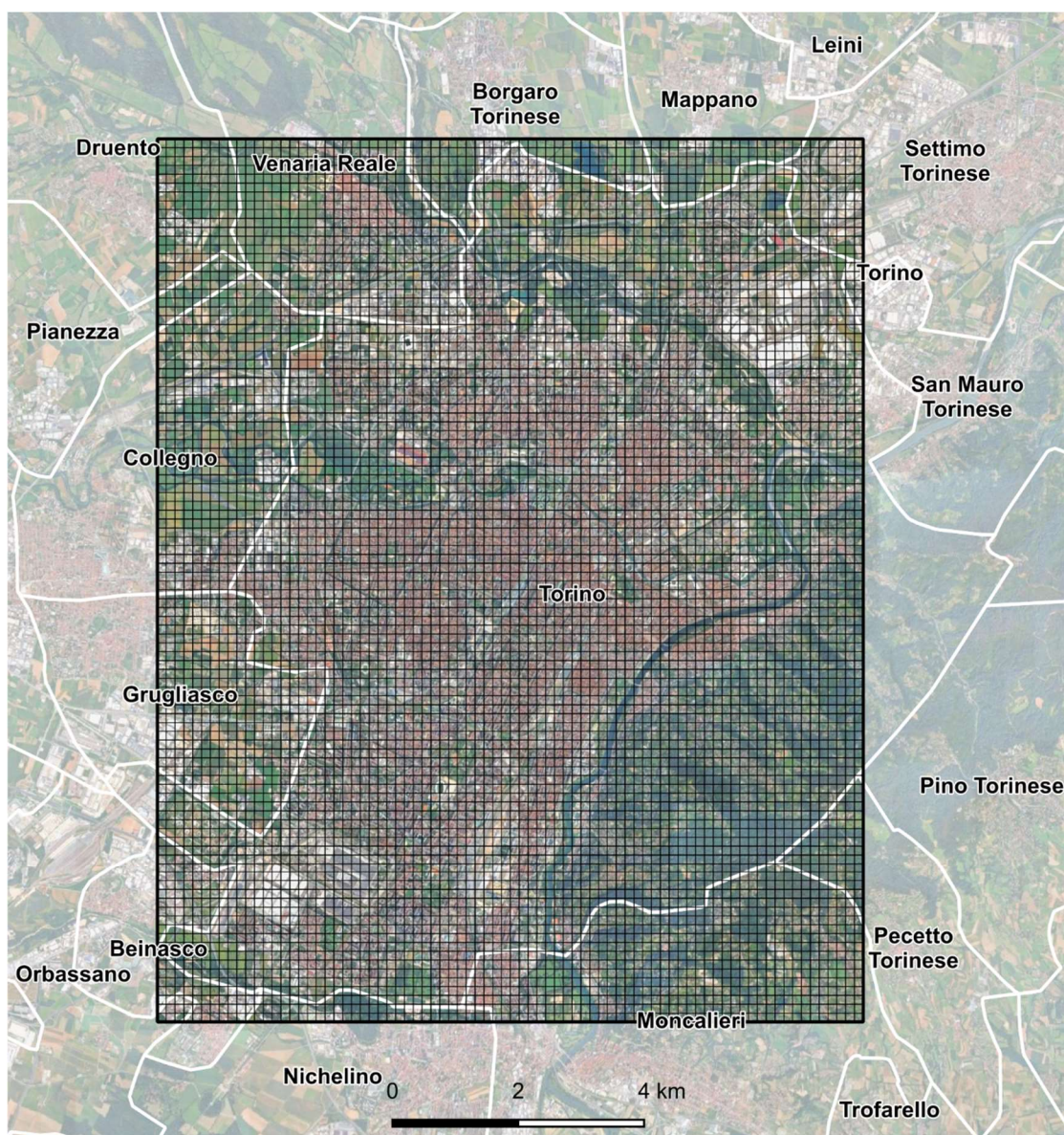
Di seguito vengono spiegati i dati di input utilizzati per le simulazioni.

La griglia vettoriale

La definizione della risoluzione spaziale in TARGET ha richiesto un bilanciamento tra il rigore topologico, la rappresentatività del fenomeno termico e l'ottimizzazione dei carichi computazionali. L'adozione di una griglia di calcolo con passo di 150 metri è scaturita da una precisa e ponderata scelta metodologica, nonostante in letteratura venga suggerita una soglia minima di 100 metri (Broadbent et al., 2019).

Infatti, il modello è stato concepito per effettuare valutazioni microclimatiche alla scala del blocco urbano o del canyon stradale (Broadbent et al., 2019). La scelta della dimensione della cella è stata ponderata per massimizzare l'efficienza computazionale del modello evitando di comprometterne la validità dei dati. Ciò rende lo strumento flessibile e in grado di rispondere in maniera immediata nell'ambito degli interventi di pianificazione territoriale, in quanto permette di eseguire simulazioni complesse, in tempi relativamente brevi, per testare e validare differenti scenari di mitigazione climatica

La definizione della maglia di calcolo a 150 metri nasce dalla ricerca di un equilibrio tra risoluzione spaziale, qualità dell'output e sostenibilità computazionale. Come detto, il riferimento teorico costituito dalle elaborazioni ARPA, è elaborato su una griglia di 300x300 metri, la quale però risulta eccessiva per cogliere le specifiche dinamiche microclimatiche sia per il modello TARGET che per il contesto urbano in generale, rendendo così necessario una riduzione della griglia di riferimento.



Legenda

- | | | |
|--|--|--|
|  Area di studio |  Confini comunali |  Griglia di riferimento |
|--|--|--|

Figura 18 - Delimitazione dell'area di interesse e griglia vettoriale di calcolo con risoluzione a 150 metri

Per tale motivo, in fase di valutazione delle dimensioni della griglia, sono state valutate e scartate due diverse alternative rispetto alle indicazioni della letteratura di settore (Lindberg et al., 2018; Chen et al., 2026). L'esclusione della soglia minima di 100 m è legata al fatto che essa avrebbe comportato una frammentazione dell'area di studio in 18.000 celle. Questa mole di dati avrebbe saturato le capacità computazionali dello strumento, dilatando i tempi di calcolo in modo incompatibile con la necessità di eseguire simulazioni relativamente rapide e ripetibili. Al contempo, lo scarto dell'opzione intermedia di 200 m non è stato preso in considerazione, nonostante ad una prima impressione poteva rappresentare l'opzione mediata tra letteratura e dati di confronto dell'ARPA, in quanto il rapporto spaziale non sarebbe stato un esatto sottomultiplo, andando drasticamente ad aumentare l'errore di campionamento spaziale per i possibili confronti futuri.

Le due opzioni sono state quindi scartate in favore della griglia di 150 m, la quale offre risultati di risoluzione spaziale superiori per la scala di analisi e garantisce un allineamento topologico perfetto, evitando possibili anomalie geometriche che le griglie da 200 e 100 metri potrebbero generare. Ciò ha permesso di contenere il numero delle celle a sole 8.000 rispetto alle 18.000 della risoluzione di 100 m, comportando una riduzione del carico computazionale stimata tra il 55% e il 60%. Allo stesso tempo ha aumentato il livello di accuratezza rispetto alle 2.000 celle della risoluzione di 300m che, sebbene avesse comportato un carico computazionale minore, non avrebbe restituito un valore rappresentativo di tutte le parti della città contenute nella cella.

Infine, è fondamentale per il funzionamento di UMEP che tutti i file raster presentino le stesse caratteristiche: estensione, altezza, larghezza e coincidenza dell'origine dei pixel. Per questo motivo, in primis, si è operato il ritaglio dei raster tramite lo strumento interno di QGIS *Ritaglia raster con maschera*, in modo da allineare l'estensione di tutti i layer a quella del DSM che, come precedentemente illustrato, definisce l'area di lavoro. In secondo luogo, si è verificato che questi fossero effettivamente co-registrati, accertandosi che possedessero le identiche caratteristiche appena nominate e che le loro origini spaziali coincidessero perfettamente. L'esito dell'operazione ha confermato la perfetta co-registrazione di tutti i file utilizzati. Senza questa accortezza, il plug-in non avrebbe permesso di effettuare le analisi: un eventuale disallineamento dei pixel, infatti, avrebbe comportato la perdita di corrispondenza spaziale tra i livelli e, conseguentemente, generato elaborazioni distorte e non aderenti alla realtà.

La Land Cover

I dati dell'uso del suolo sono stati ricavati dallo shape LCP (Land Cover Piemonte) (Regione Piemonte, 2024), preso dal geoportale della regione Piemonte, aggiornato al 2023. È stato necessario convertire le sue classificazioni secondo lo schema richiesto da UMEP, che viene riportato all'interno della Tabella 4. Questo processo è fondamentale perché definisce i parametri che caratterizzano i materiali delle coperture.

Il file raster relativo alla copertura del suolo (*Land Cover*) è stato elaborato a partire dallo shapefile vettoriale denominato "Land cover Piemonte 2023", reso disponibile per i singoli comuni sul Geoportale della Regione Piemonte. Esso fornisce informazioni aggregate a vari livelli di dettaglio, provenienti da molteplici enti, istituzioni e database territoriali.

Per garantire il livello di risoluzione necessario al funzionamento di UMEP, è stata selezionata la classificazione basata su EAGLE (Action Group on Land monitoring in Europe of the European environment information and observation network) che fornisce

informazioni sul contesto spaziale, il modello costruito, la pratica agricola e le coltivazioni (Regione Piemonte, 2023). Ai valori di questa classificazione, come illustrato nella tabella sotto riportata, sono state successivamente associate le corrispondenti classi di copertura del suolo di UMEP.

È importante fare una precisazione metodologica sulle categorie utilizzate. Sebbene il plugin metta a disposizione uno schema di classificazione specifico denominato "TARGET" (strutturato su 9 classi), si è constatato che il livello di dettaglio dei dati LCP non era sufficientemente elevato per distinguere in modo accurato tutte le categorie richieste, mostrate in tabella 5. Di conseguenza, per evitare forzature, si è scelto di adottare lo schema base di UMEP, utilizzando le 7 classi standard anziché le 9 previste da TARGET.

L'uso di questo schema semplificato, forzato dalla disponibilità del dettaglio delle informazioni in input, penalizza in primo luogo le superfici impermeabili. Le categorie nella classificazione a 9 sono state individuate per poter distinguere le proprietà termodinamiche dei materiali. Mentre TARGET distingue tra “road” (asfalto) e “conc” (concrete, ovvero cemento), la classificazione UMEP associa entrambe alla classe “paved”, portando alla generalizzazione dei valori di albedo e di capacità termica. Questo accorpamento necessario potrebbe causare un errore nella precisione con cui il modello gestisce l’accumulo di calore nelle piazze o nei grandi incroci viari chiari rispetto alle strade scure.

In secondo luogo, vi è un impatto potenziale sul calcolo dell'evapotraspirazione. Le classi che definiscono le aree verdi ben irrigate (irr) o aride (dry) vengono tutte accorpate dentro alla categoria Prato proprio per l'impossibilità di ricavare attraverso il dataset a disposizione questa discriminante per le aree verdi. L’associazione di queste classi nella stessa classe di UMEP potrebbe portare a una perdita di precisione nel calcolo del bilancio energetico, in quanto il flusso di calore latente è fortemente legato al potere rinfrescante di un prato irrigato.

Tabella 4 - Classi UMEP dell'uso del suolo

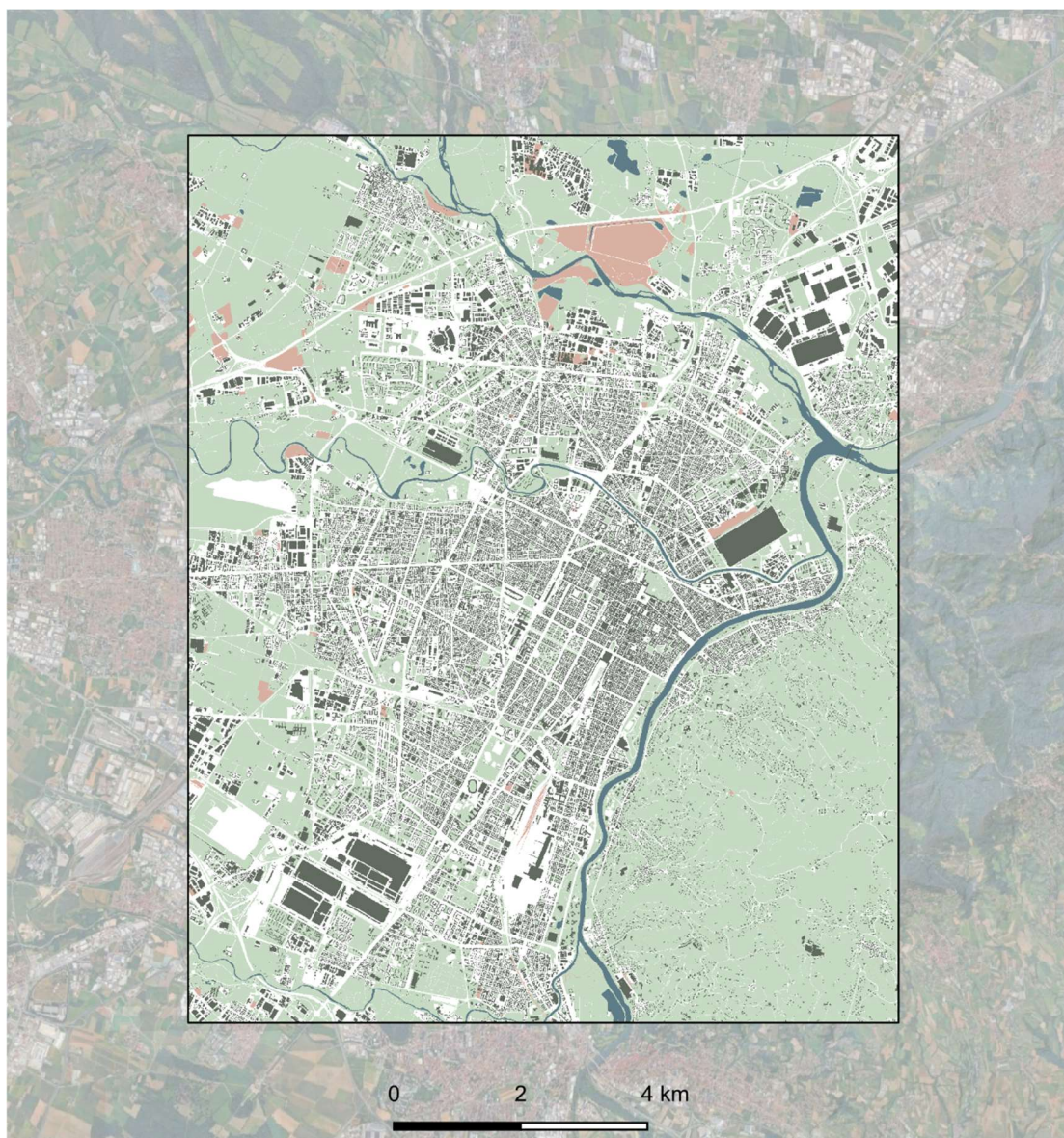
CLASSI BASE UMEP		
1	Paved	Paved surfaces (e.g. roads, car parks)
2	Buildings	Building surfaces
3	Evergreen Trees	Evergreen trees and shrubs
4	Deciduous Trees	Deciduous trees and shrubs
5	Grass	Grass surfaces
6	Bare soil	Bare soil surfaces and unmanaged land
7	Water	Open water (e.g. lakes, ponds, rivers, fountain)

Tabella 5: Corrispondenza delle classi dell'uso del suolo di TARGET con quelle UMEP

TARGET class	UMEP class
road	paved
roof	buildings
Veg	Conifer and Deciduous trees
dry	grass
irr	grass
NA	bare soil
water	water
Concreate	NA

Tabella 6: corrispondenza tra la classificazione LCC e le classi UMEP

EAGLE Land Cover Component - presente su Torino	LCC	UMEP CLASS
11122 - Superfici impermeabili aperte	11122	1
11121 - Strutture e impianti specializzati	11121	2
11112 - Edifici specializzati	11112	2
11111 - Edifici convenzionali	11111	2
3122 - Acque ferme	3122	7
3121 - Corsi d'acqua	3121	7
1221 - Detriti minerali	1221	7
1122 - Superfici permeabili aperte	1122	6
1121 - Discariche	1,121	6
1112 - Altre costruzioni	1,112	2
1111 - Edifici	1111	2
222 - Non Graminacee	222	5
221 - Graminacee	221	5
212 - Arbusti, macchia	212	5
221 - Graminacee	211	5
22 - Copertura erbacea	22	5
2 - Vegetato	2	5



Legenda

Elementi di base

 Area di studio

Categorie UMEP dell'uso del suolo

 1 - Paved
 2 - Buildings

 5 - Grass
 6 - Bare soil
 7 - Water

Figura 19 - Carta della Land Cover riclassificata secondo la struttura a 9 classi di UMEP

Modelli di elevazione

I modelli di elevazione spaziale sono fondamentali per le analisi sulle isole di calore e, in particolare per TARGET, in quanto aiutano a comprendere la morfologia urbana e di conseguenza come si comporta una città a livello climatico. La morfologia, infatti, può essere dedotta dai modelli DTM/DEM e DSM grazie ai quali è possibile individuare gli ostacoli presenti in superficie. Tutto questo permette poi, tramite il processore che descrive la morfometria della città, di calcolare effettivamente i dati di input che contribuiscono al bilancio energetico del modello come, ad esempio, lo Sky View Factor, che descrive la porzione di cielo visibile da terra, il *Frontal Area Index* (FAI), che stima la superficie frenante per il vento, e la rugosità (z_0), che quantifica la capacità del vento nello spazzare via il calore accumulato.

I modelli digitali spaziali presi in considerazione sono stati due: il Digital Surface Model (DSM) 5x5m, fornito gentilmente dal SDG11Lab del Politecnico di Torino; e il Digital Terrain Model (DTM) 5x5m ottenuto tramite il Geoportale della Regione Piemonte.

Quest'ultimo è stato utilizzato al posto del Digital Elevation Model (DEM), in quanto il file raster DSM rispecchia il criterio stabilito dagli sviluppatori di essere un raster che rappresenta solo l'altezza del terreno sopra il livello del mare (*Lindberg et al., 2020, sez. 10 Abbreviations*), definendo chiaramente che la scelta adatta per il funzionamento del plugin TARGET è il DTM.

Anche per questi file raster è stato necessario valutare la co-registrazione attraverso gli stessi passaggi spiegata alla fine del *paragrafo 4.2.3.* confermandone il perfetto allineamento.

Dati meteorologici

I dati meteorologici sono fondamentali all'interno dell'elaborato poiché forniscono i parametri iniziali per i calcoli del bilancio energetico del modello. Essi sono definiti come 'forcing data' e vengono fatti interagire dal modello con i parametri ricavati tramite le elaborazioni morfometriche e dell'uso del suolo.

Tali dati devono provenire da un sensore posto in un contesto rurale, dove vi è l'assenza dell'influenza dal calore antropico (Broadbent et al., 2019). Per tale motivo è stata scelta la stazione meteorologica di Bauducchi, collocata in un'area verde nel comune di Moncalieri. La scelta della stazione è stata ponderata anche rispetto ai dati ARPA che la identificano come stazione di riferimento per le loro analisi, rendendo maggiormente confrontabili i risultati ottenuti.

I dati reperiti si rifanno ai periodi delle ondate di calore registrate nel 2022 e nel 2023 per i mesi di giugno, luglio e agosto, le stesse considerate per la validazione della metodologia dell'Agenzia. In particolare, sono stati utilizzati i dati orari, dei periodi 9-18 giugno 2022, 21-27 luglio, 2022, 15-22 luglio 2023 e 16-23 agosto 2023. La stazione mette a disposizione una serie di dati, i quali sono stati formattati in modo da farli coincidere con quanto richiesto da UMEP. Tra le variabili utilizzate da plug-in (Lindberg, F., et al., 2019) vi sono: la temperatura aria, misurata a 2 m; le precipitazioni; l'umidità dell'aria; la radiazione globale; la velocità di raffica del vento; e la pressione atmosferica. Quest'ultima variabile era assente per la stazione Bauducchi, per tale motivo è stato utilizzato il dato reperito dalla stazione I23imitrofa di Carmagnola (232 m.s.l.m.), che ricadeva in un contesto simile a Bauducchi (226 m.s.l.m.) e con un'altitudine paragonabile.

4.3. Architettura del modello

Dal punto di vista operativo, l'architettura organizzativa dei dati di input e di output di TARGET è molto rigida. Per tale motivo, in ogni paragrafo saranno esplicitate le accortezze e le posizioni fisiche dove prendere o collocare i dati e i parametri per i vari processori. Questo paragrafo è un supporto in più rispetto alla documentazione fornita dagli sviluppatori, in quanto essa non risultava esaustiva per alcuni problemi emersi in fase di analisi ed errori del programma con conseguenti blocchi durante i vari processi. La maggior parte delle correzioni è stata effettuata grazie alla consultazione dall'Intelligenza artificiale che ha contribuito nella comprensione dei messaggi di errore e, per un caso specifico che si vedrà in seguito, alla modifica del codice sorgente.

La Figura 20 mostra come sono state strutturate le principali cartelle di lavoro, prima ancora di osservare nel dettaglio ogni passaggio di TARGET, per poter comprendere meglio come si organizzano, ed evitare l'insorgenza di errori o blocchi nelle differenti fasi. In particolare, la cartella "1 - pre processore - Morphometric Calculator e Urban Land Cover" riportata nella Figura 20 deve contenere esclusivamente i file di output dei primi due pre-processor che verranno presentati; le altre cartelle sono invece specifiche per ogni periodo di simulazione a cui si è interessati. Queste ultime fungeranno sia da directory di input che di output per il processore successivo.

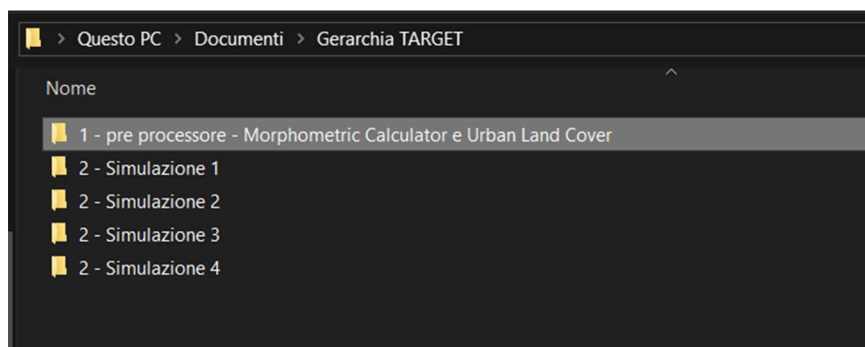


Figura 20 - Esempio della struttura gerarchica delle cartelle richiesta dal plugin UMEP

4.3.1. Flusso di lavoro TARGET

UMEP adotta un'organizzazione di tutti i suoi strumenti in tre categorie: pre-processor, processor e post-processor. Perciò, per poter rendere di facile comprensione il procedimento cronologico seguito con il plug-in, verrà mostrata la gerarchia dei processi TARGET, nonché i loro nomi e i loro output, all'interno dello schema in Figura 21.

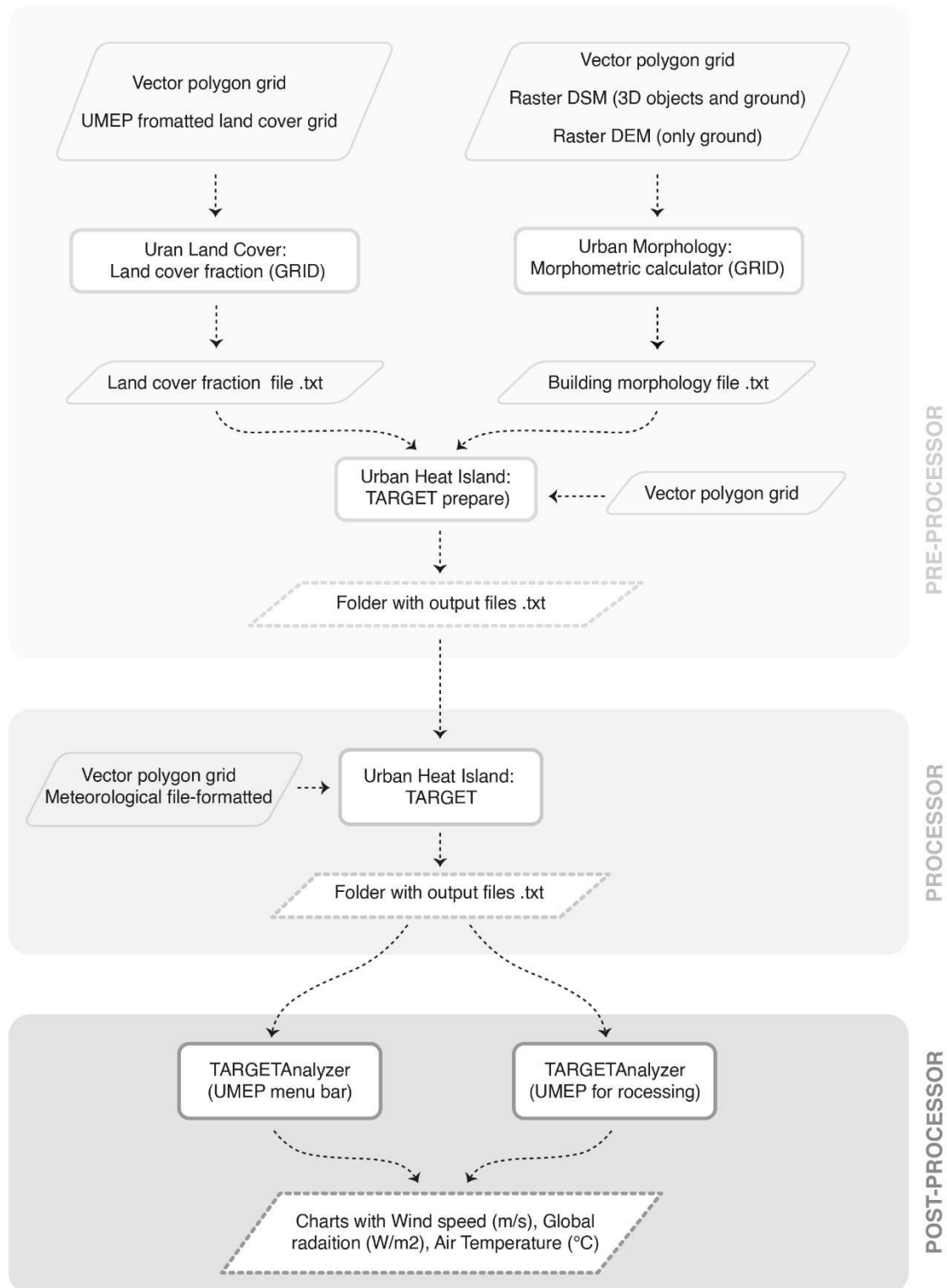


Figura 21 - Diagramma di flusso del modello TARGET: dalle fasi di pre-processamento all'estrazione dei risultati

Pre-processori: Morphometric Calculator e Urban Land Cover

Nel riquadro giallo del diagramma di flusso, la fase di pre-processamento del modello si articola in passaggi sequenziali che elaborano i dati di input. Viene utilizzata la griglia poligonale vettoriale di base (shapefile) come riferimento spaziale e vengono avviati due processi propedeutici al passaggio successivo.

Il primo è l'*Urban Land Cover: Land Cover Fraction (Grid)*, dove partendo dal raster della copertura del suolo formattato per UMEP, viene calcolata la frazione di uso del suolo per ogni singola cella della griglia. Esso è uno dei dati più importanti per il processo in quanto definisce il materiale e, di conseguenza, le sue caratteristiche fisiche che influenzano la temperatura.

Il secondo è *Urban Morphology: Morphometric Calculator (Grid)*, dove grazie ai modelli digitali di elevazione (DSM e DTM), vengono calcolati i parametri morfometrici degli edifici urbani, sempre frazionati per ogni cella della griglia.

Gli output di questi due strumenti devono essere contenuti all'interno della stessa cartella, la quale verrà utilizzata esclusivamente per essi. Questa procedura risulta fondamentale, in quanto rappresenta il "contenitore" da cui il pre-processore successivo estrapola le informazioni essenziali e rielabora. Nelle immagini vengono riportate come si presentano le finestre dei due processori.

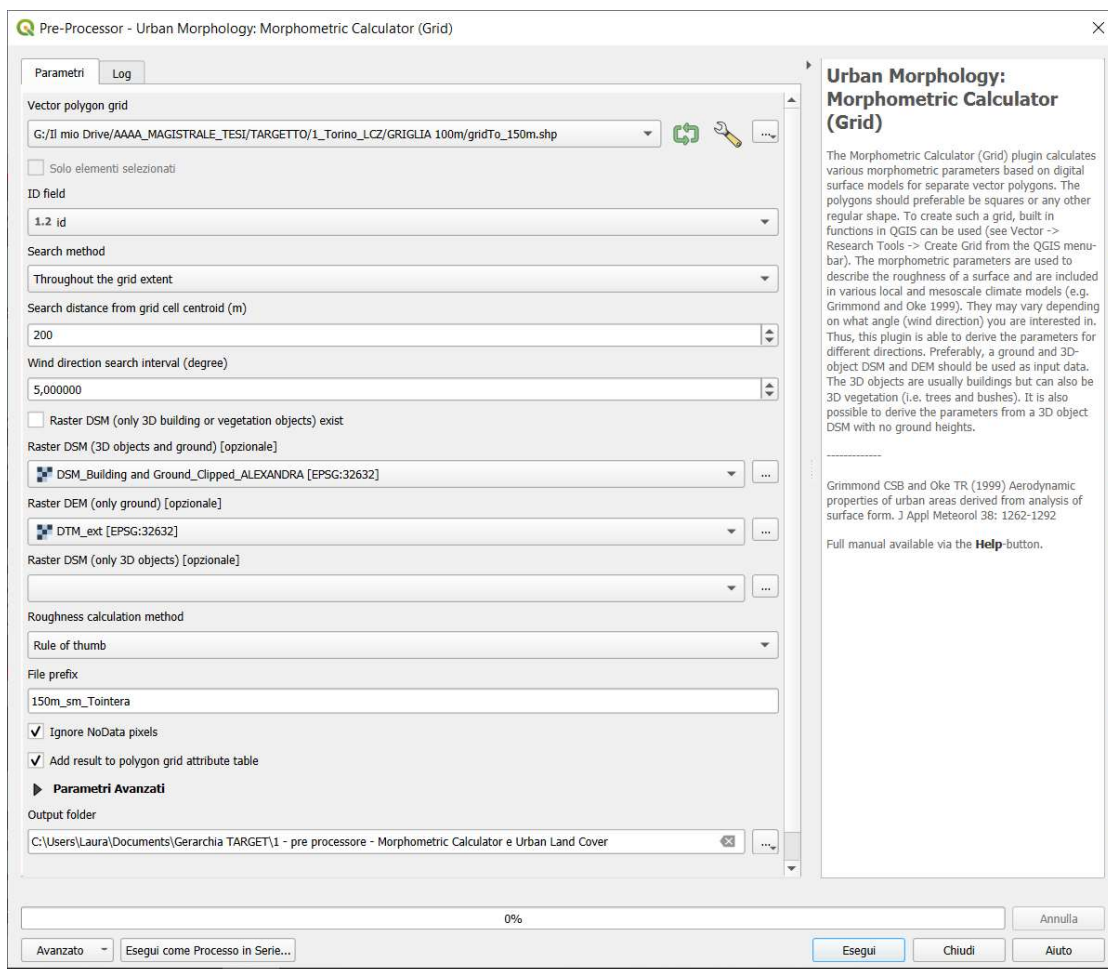


Figura 22 - Finestre di dialogo del pre-processore Morphometric Calculator

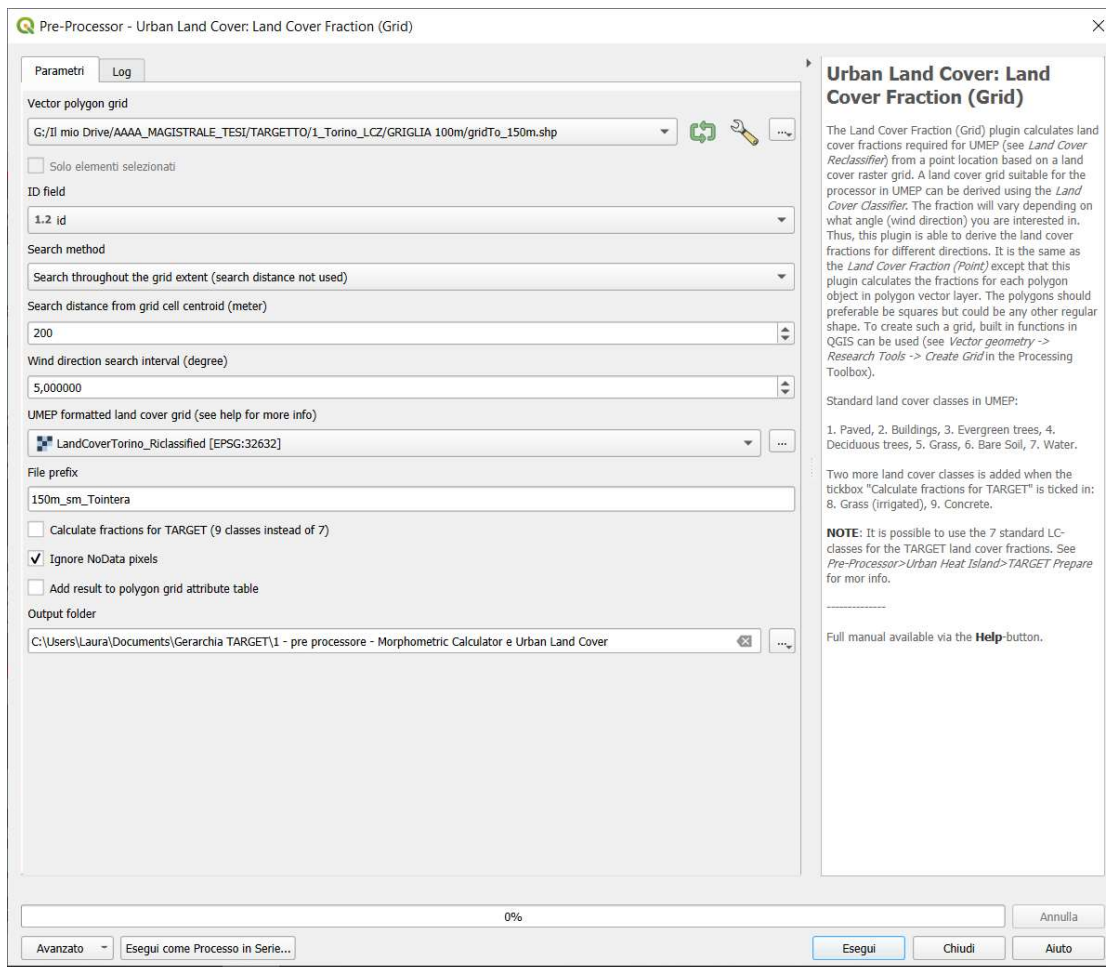


Figura 23 - Finestre di dialogo del pre-processore Urban Land Cover

Da questi due processi vengono generati dei file di output specifici in formato testo (.txt) che contengono i dati relativi alla frazione di uso del suolo e alla morfologia del tessuto urbano e si presentano come riportato nelle figure 24 e 25.

Nel file contenente le informazioni sulla copertura del suolo (Figura 24), per ogni cella della griglia di TARGET, il sistema esegue una intersezione geometrica andando a calcolare l'area quadrata occupata da ciascuna classe e la divide per l'area totale della cella, ottenendo, così un parametro che va da 0 a 1 per ogni categoria. Nei casi si ottenevano valori uguali a 0, è stato necessario per motivi computazionali eseguire un aggiustamento manuale di sostituzione del valore con un parametro arbitrario e di poco superiore, per poter poi procedere nell'elaborazione della fase successiva del lavoro, come si vedrà nel prossimo paragrafo.

L'output del pre-processore morfometrico (Figura 25) descrive la scabrezza e gli ostacoli fisici presenti all'interno della città. La morfologia urbana viene definita attraverso la geometria, la densità, l'altezza e la disposizione spaziale di tali ostacoli; si tratta di informazioni indispensabili per comprendere il comportamento dei flussi all'interno dei canyon urbani.

I parametri presi in considerazione, come si evince dall'immagine, sono:

- l'ID, che identifica univocamente ogni cella della griglia di riferimento;
- il PAI (Plan Area Index), che è l'indice di area in pianta ed è un valore compreso tra 0 e 1, il quale quantifica in che misura la frazione di suolo è coperta dagli edifici;
- il FAI (Frontal Area Index) che è l'indice di area frontale ed è un parametro aerodinamico cruciale per determinare la resistenza che la morfologia della città oppone al flusso dell'aria;
- il zH che riportati i valori medi dell'altezza degli edifici;
- zHmax indica il valore massimo;
- zHstb rappresenta la deviazione standard delle altezze e descrive la variabilità altimetrica degli edifici;
- zd è l'altezza di spostamento del piano di zero;
- z0 rappresenta la rugosità aerodinamica, che descrive le asperità del contesto urbano.

ID	Paved	Buildings	EvergreenTrees	DeciduousTrees	Grass	Baresoil	Water
1	0.001	0.001	0.001	0.001	1.000	0.001	0.001
2	0.030	0.001	0.001	0.001	0.970	0.001	0.001
3	0.007	0.001	0.001	0.001	0.993	0.001	0.001
4	0.001	0.001	0.001	0.001	1.000	0.001	0.001
5	0.286	0.183	0.001	0.001	0.531	0.001	0.001
6	0.540	0.417	0.001	0.001	0.043	0.001	0.001
7	0.288	0.139	0.001	0.001	0.573	0.001	0.001
8	0.074	0.002	0.001	0.001	0.924	0.001	0.001
9	0.148	0.070	0.001	0.001	0.782	0.001	0.001
10	0.493	0.299	0.001	0.001	0.208	0.001	0.001
11	0.617	0.099	0.001	0.001	0.256	0.001	0.028
12	0.009	0.001	0.001	0.001	0.991	0.001	0.001
13	0.006	0.001	0.001	0.001	0.943	0.051	0.001
14	0.054	0.001	0.001	0.001	0.627	0.319	0.001
15	0.008	0.001	0.001	0.001	0.992	0.001	0.001
16	0.043	0.001	0.001	0.001	0.957	0.001	0.001
17	0.052	0.051	0.001	0.001	0.897	0.001	0.001
18	0.126	0.034	0.001	0.001	0.840	0.001	0.001
19	0.001	0.001	0.001	0.001	1.000	0.001	0.001
20	0.002	0.001	0.001	0.001	0.957	0.041	0.001
21	0.076	0.001	0.001	0.001	0.496	0.428	0.001
22	0.277	0.001	0.001	0.001	0.234	0.489	0.001
23	0.008	0.001	0.001	0.001	0.572	0.420	0.001
24	0.093	0.001	0.001	0.001	0.903	0.001	0.003
25	0.169	0.068	0.001	0.001	0.763	0.001	0.001
26	0.202	0.001	0.001	0.001	0.798	0.001	0.001
27	0.182	0.001	0.001	0.001	0.818	0.001	0.001
28	0.183	0.001	0.001	0.001	0.654	0.163	0.001
29	0.516	0.001	0.001	0.001	0.442	0.041	0.001
30	0.492	0.008	0.001	0.001	0.500	0.001	0.001
31	0.511	0.001	0.001	0.001	0.488	0.001	0.001
32	0.133	0.004	0.001	0.001	0.862	0.001	0.001
33	0.217	0.024	0.001	0.001	0.755	0.004	0.001
34	0.090	0.077	0.001	0.001	0.829	0.004	0.001
35	0.007	0.001	0.001	0.001	0.987	0.001	0.006
36	0.027	0.001	0.001	0.001	0.796	0.001	0.177
37	0.252	0.007	0.001	0.001	0.672	0.001	0.069

Figura 24 – Output del Pre-processore Urban Land Cover

150m_sm_Tointera_IMPGrid_isotropic.txt - Blocco note di Windows

id	pai	fai	zH	zHmax	zHstd	zd	z0	wai
1	0.024	0.012	6.348	13.795	3.532	4.444	0.635	0.010
2	0.009	0.007	4.459	12.842	3.339	3.121	0.446	0.006
3	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.100	0.030	0.001
4	0.057	0.019	8.831	22.887	5.997	6.182	0.883	0.018
5	0.428	0.137	6.743	23.433	3.138	4.720	0.674	0.073
6	0.552	0.124	7.096	12.537	2.668	4.967	0.710	0.057
7	0.230	0.129	7.797	16.994	3.587	5.458	0.780	0.048
8	0.002	0.001	2.143	2.278	0.135	1.500	0.214	0.001
9	0.152	0.022	5.222	9.448	1.758	3.655	0.522	0.020
10	0.536	0.188	7.331	17.289	3.405	5.132	0.733	0.085
11	0.269	0.072	6.226	17.374	3.730	4.358	0.623	0.044
12	0.039	0.005	6.919	14.101	2.913	4.843	0.692	0.005
13	0.012	0.002	5.088	10.130	2.575	3.562	0.509	0.004
14	0.057	0.039	8.316	18.038	5.309	5.821	0.832	0.028
15	0.012	0.004	6.755	10.726	1.957	4.729	0.676	0.004
16	0.011	0.023	6.753	10.546	2.024	4.727	0.675	0.008
17	0.093	0.040	5.594	10.606	1.826	3.916	0.559	0.021
18	0.136	0.097	5.694	12.397	2.167	3.985	0.569	0.039
19	0.028	0.011	7.804	14.097	3.168	5.463	0.780	0.010
20	0.087	0.070	15.013	24.413	6.120	10.509	1.501	0.049
21	0.198	0.135	5.960	19.008	4.083	4.172	0.596	0.058
22	0.177	0.091	10.003	28.496	7.865	7.002	0.999	0.061
23	0.003	0.001	3.004	4.064	0.818	2.103	0.300	0.001
24	0.018	0.002	4.983	9.549	2.252	3.488	0.498	0.004
25	0.171	0.054	5.644	14.856	2.499	3.951	0.564	0.040
26	0.034	0.015	5.455	21.591	4.858	3.819	0.546	0.011
27	0.073	0.039	21.809	31.849	9.310	15.266	2.181	0.030
28	0.246	0.080	7.049	26.083	6.348	4.934	0.705	0.048
29	0.212	0.089	6.372	18.585	3.448	4.460	0.637	0.044
30	0.062	0.026	4.657	11.826	2.291	3.260	0.466	0.019
31	0.014	0.008	5.084	11.375	3.290	3.559	0.508	0.007
32	0.064	0.024	5.110	11.320	1.836	3.577	0.511	0.022
33	0.066	0.013	6.046	8.740	1.960	4.232	0.605	0.012
34	0.174	0.099	5.774	12.428	2.564	4.042	0.577	0.034
35	0.073	0.009	8.366	15.679	2.629	5.856	0.837	0.009
36	0.457	0.209	9.490	22.620	4.002	6.643	0.949	0.091
37	0.214	0.082	5.033	17.279	2.795	3.523	0.503	0.046

Figura 25 - Output dei pre-processori Morphometric Calculator

Pre-processore: TARGET prepare

Gli output della fase appena descritta convergono nel pre-processo denominato Urban Heat Island: TARGET prepare. Attraverso questo tool, il programma traduce i dati appena prodotti, rielaborandoli e formattandoli secondo la struttura necessaria al processore successivo. La finestra di dialogo di questo strumento si presenta come di seguito riportato in Figura 26.

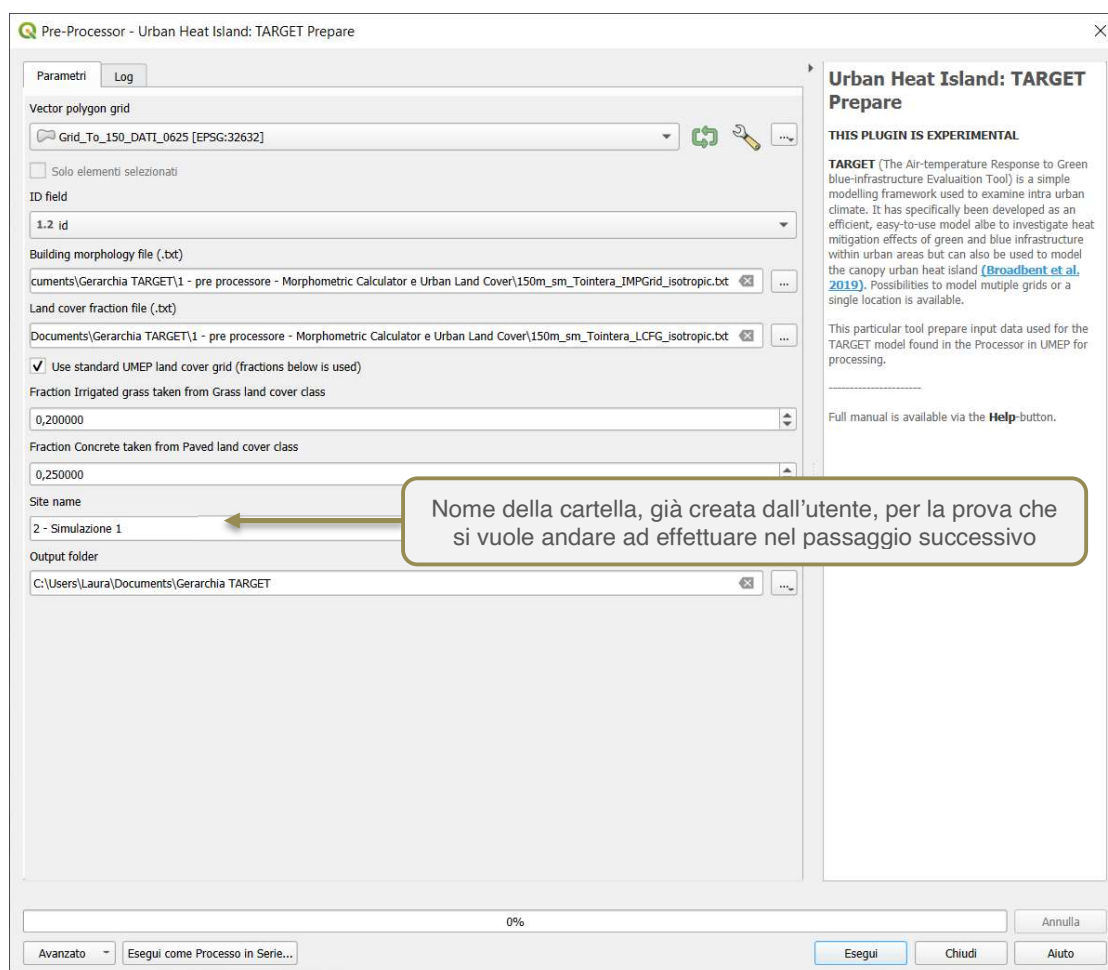


Figura 26 - Finestra di dialogo del pre-processore Urban Heat Island: TARGET Prepare

Alcune delle rigidità che prima venivano sottolineate, si presentano in questa fase del procedimento. Per questo motivo è necessario apportare alcune modifiche inevitabili ai file creati nei due pre-processori precedenti e tenere bene a mente la struttura gerarchica delle cartelle evidenziata all'inizio del capitolo *Architettura del modello*.

Prima di eseguire lo strumento, perciò, è essenziale creare una cartella con il nome dall'utente definito in "site name" (evidenziato in figura), in quanto il codice sorgente non la crea di default.

In secondo luogo, occorre modificare gli 0.000 in 0.001, come già anticipato, nel file di output del pre-processore *Urban Land Cover* (sostituzione già operata nella Figura 24), per evitare l'interruzione improvvisa dell'esecuzione del software dovuta all'errore matematico di una divisione per 0 nei processi del modello.

In ultimo, è necessario creare tante cartelle quante sono i periodi da simulare. Un limite del programma è dato proprio dall'impossibilità di realizzare più simulazioni contemporaneamente o aggregarle, in quanto, il programma non riesce a distinguere la differenza tra due date che differiscono solo per l'anno nel *processore TARGET* successivo al presente.

Questo modulo utilizza nuovamente la griglia poligonale vettoriale di partenza per unire tutti i dati precedentemente elaborati, condensandoli in un'unica cartella contenente i file di output preparatori al processo.

Processore TARGET:

La fase successiva, visibile all'interno del riquadro blu nel diagramma di flusso (Figura 21), rappresenta il processo analitico dove avviene il calcolo del bilancio energetico. Questo blocco centrale di calcolo viene alimentato simultaneamente da due dati di input: l'output del pre-processore TARGET, in formato txt e le variabili meteorologiche della stazione di Bauducchi. Di seguito viene mostrata la finestra di dialogo (Figura 27).

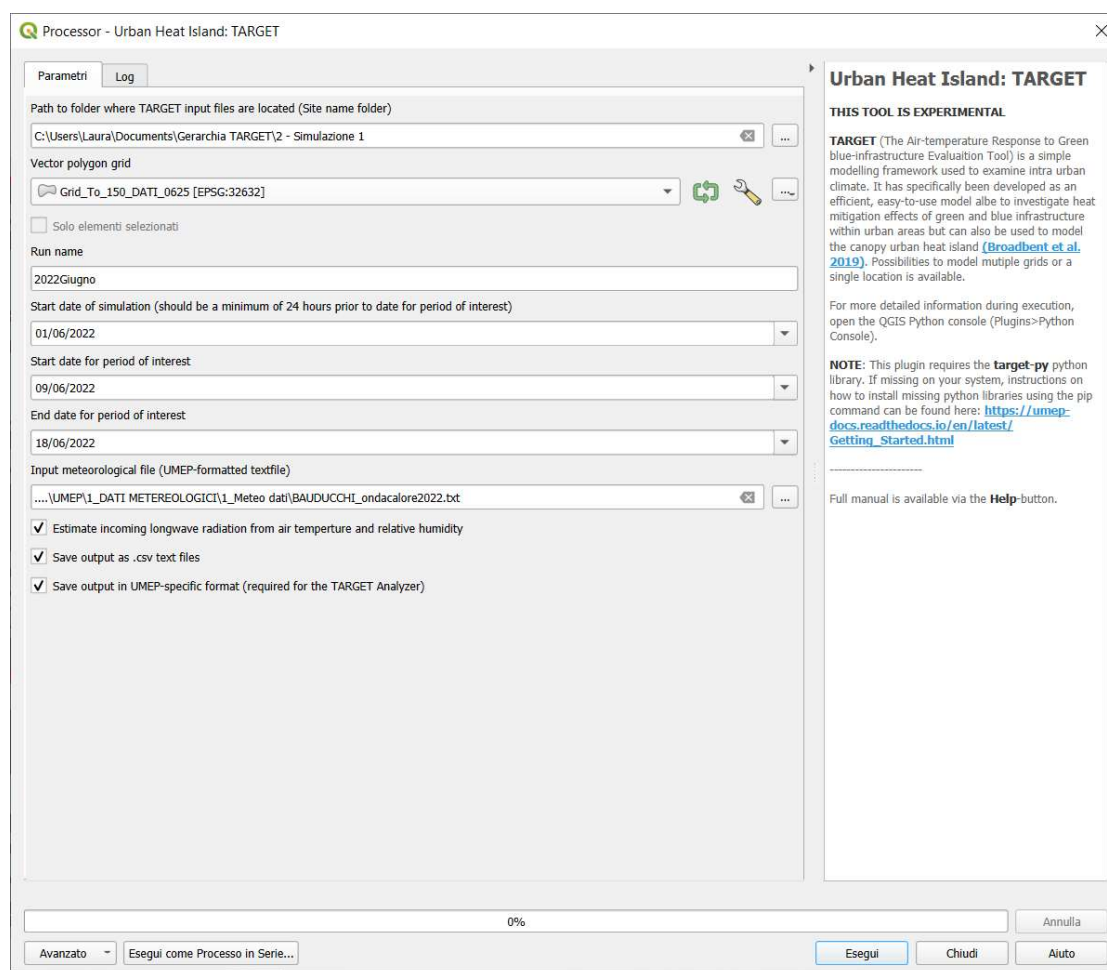


Figura 27 - Finestra di dialogo del processore TARGET

Anche qui occorre utilizzare un escamotage per evitare l'insorgenza di errori nel processo. Infatti, la principale causa di blocco è legata alla difficoltà di UMEP, in questo caso, di generare la barra e il log di avanzamento del processo. La soluzione al problema è la semplice apertura della console Python all'interno di QGIS, che ne permette la regolare visualizzazione.

Gli output del processo risultano essere file in formato .txt per ogni cella, dove alla data inserita vengono riportati i parametri climatici simulati da TARGET, solo per il periodo preso in analisi.

Nella Figura 28 è riportato un esempio delle variabili climatiche modificate dal modello, dove, in questo caso, sono evidenziate le ore del giorno della giornata del 9 giugno 2022 per la cella corrispondente alla stazione meteo Alenia.

%iy	id	it	imin	Q*	QH	QE	QS	Qf	wind	RH	Td	press	rain	Kdn	snow	ldown	fclld	wuh	xsmd	lai_hr	Kdiff	Kdir	wd
2022	160	0	0	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	0.70000	86.00	15.21	99.00	0.00	0.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	315.00
2022	160	1	0	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	0.40000	89.00	13.11	98.76	0.00	0.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	315.00
2022	160	2	0	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	1.00000	92.00	12.95	99.00	0.00	0.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	315.00
2022	160	3	0	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	0.30000	93.00	11.58	98.72	0.00	0.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	315.00
2022	160	4	0	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	1.60000	95.00	12.59	99.31	0.00	0.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	315.00
2022	160	5	0	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	1.10000	95.00	14.28	98.06	0.00	74.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	315.00
2022	160	6	0	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	1.60000	92.00	17.28	100.10	0.00	402.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	315.00
2022	160	7	0	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	1.40000	72.00	21.36	98.63	0.00	500.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	315.00
2022	160	8	0	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	1.10000	56.00	23.65	98.49	0.00	681.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	315.00
2022	160	9	0	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	2.00000	39.00	25.49	99.02	0.00	851.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	315.00
2022	160	10	0	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	1.20000	36.00	25.99	99.00	0.00	781.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	315.00
2022	160	11	0	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	1.80000	31.00	26.34	98.28	0.00	717.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	315.00
2022	160	12	0	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	1.60000	29.00	27.86	98.45	0.00	1026.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	315.00
2022	160	13	0	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	1.50000	26.00	27.91	98.81	0.00	982.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	315.00
2022	160	14	0	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	4.70000	17.00	29.83	99.00	0.00	866.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	315.00
2022	160	15	0	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	5.70000	16.00	29.20	98.67	0.00	729.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	315.00
2022	160	16	0	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	5.30000	18.00	29.63	98.67	0.00	566.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	315.00
2022	160	17	0	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	5.70000	19.00	27.38	99.00	0.00	377.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	315.00
2022	160	18	0	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	3.60000	22.00	25.79	98.28	0.00	172.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	315.00
2022	160	19	0	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	3.50000	22.00	23.41	99.00	0.00	0.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	315.00
2022	160	20	0	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	1.90000	25.00	21.37	99.00	0.00	0.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	315.00
2022	160	21	0	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	3.20000	26.00	21.12	98.97	0.00	0.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	315.00
2022	160	22	0	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	2.20000	32.00	18.39	99.17	0.00	0.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	315.00
2022	160	23	0	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	1.80000	43.00	16.28	97.80	0.00	0.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	-999.00	315.00

Figura 28 - Estratto dell'output del processore TARGET: prepare per la giornata del 9 giugno 2022 rispetto alla stazione meteo Alenia

Post-processor: Urban Heat Island Analyzer

La fase del *post-processore Urban Heat Island Analyzer*, rappresentata nel riquadro rosso dello schema (Figura 29), ha due punti di accesso nell'interfaccia Qgis. In base alla scelta di uno dei due, si differenziano gli output che si ottengono.

Se vi si accede tramite il *processing toolbox* di Qgis, si ottiene la restituzione in formato raster, con una risoluzione uguale alle griglie date in input, di una singola giornata, potendo scegliere il tipo di statistica (mean, media, 70% percetile, etc.) e il periodo (diurno, notturno o l'intera giornata) da analizzare.

Scegliendo, invece, il processore dal menu UMEP, presente nella barra in alto di Qgis, si hanno differenti output. Questi si differenziano per la possibilità di creare un raster per periodi più lunghi, permettendo di scegliere come prima, il periodo della giornata o la statistica da effettuare. In secondo luogo, permette di creare grafici degli andamenti orari dei parametri meteorologici disponibili, visualizzando i valori di temperatura simulati da TARGET e confrontarli con quelli della stazione di riferimento rurale, perciò la stazione Bauducchi.

Per poter permettere al processore di produrre le carte diurne è stato necessario apportare una modifica al codice sorgente del file "target_analyser.py", grazie al supporto dell'AI. All'interno di questo, infatti, gli sviluppatori hanno bloccato le righe di codice che permettevano di produrre, quando selezionata la casella corrispondente, le carte corrispondenti al periodo selezionato. La sezione di codice originario e quella modificata sono stati riportati all'interno dell'Allegato 1.

In questi due post-processori vengono effettuati gli stessi passaggi matematici, che partono dai file di output del processore precedente. Qui viene effettuata la differenza fra le temperature predette (mod) e quelle della stazione di riferimento rurale, secondo l'equazione di base per l'identificazione dell'Isola di Calore.

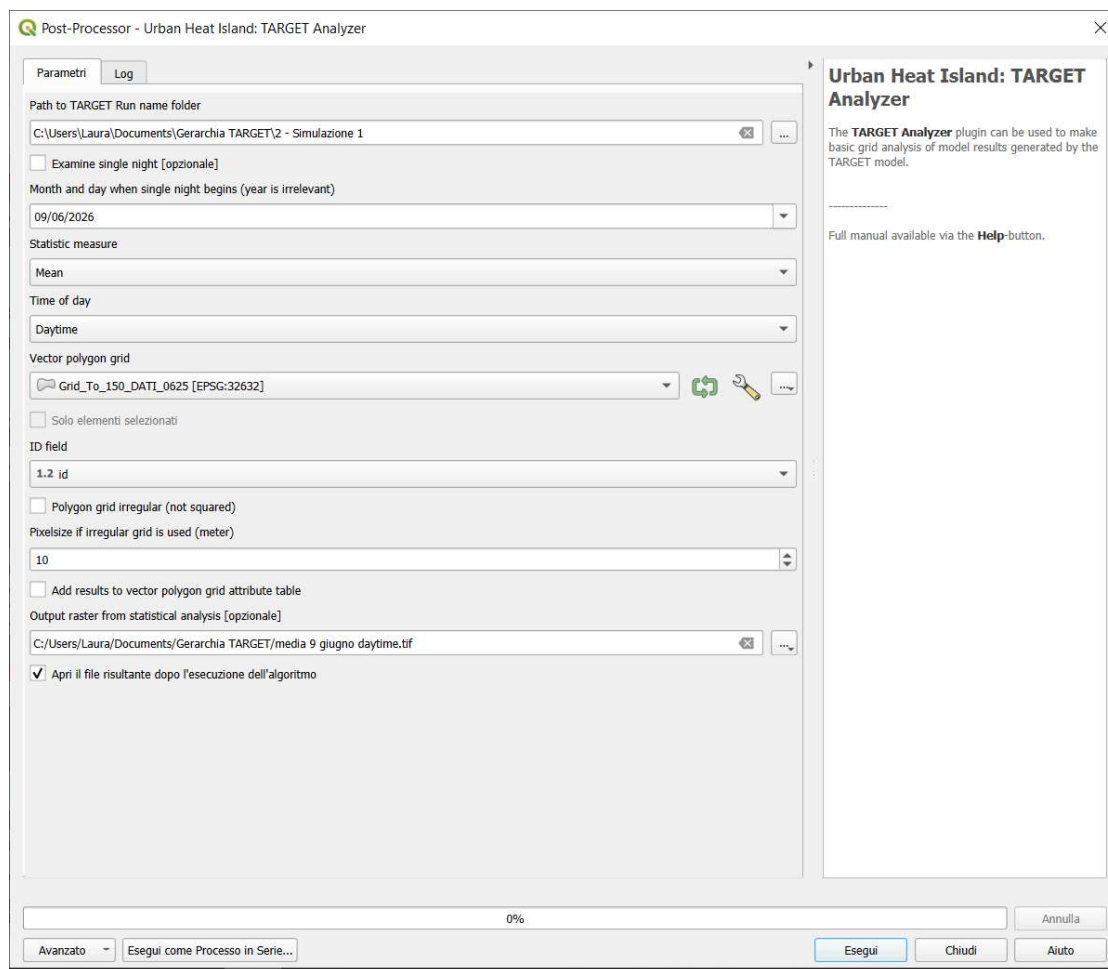


Figura 29 - Finestra di dialogo del processore TARGET Analyzer dalla processing toolbox.

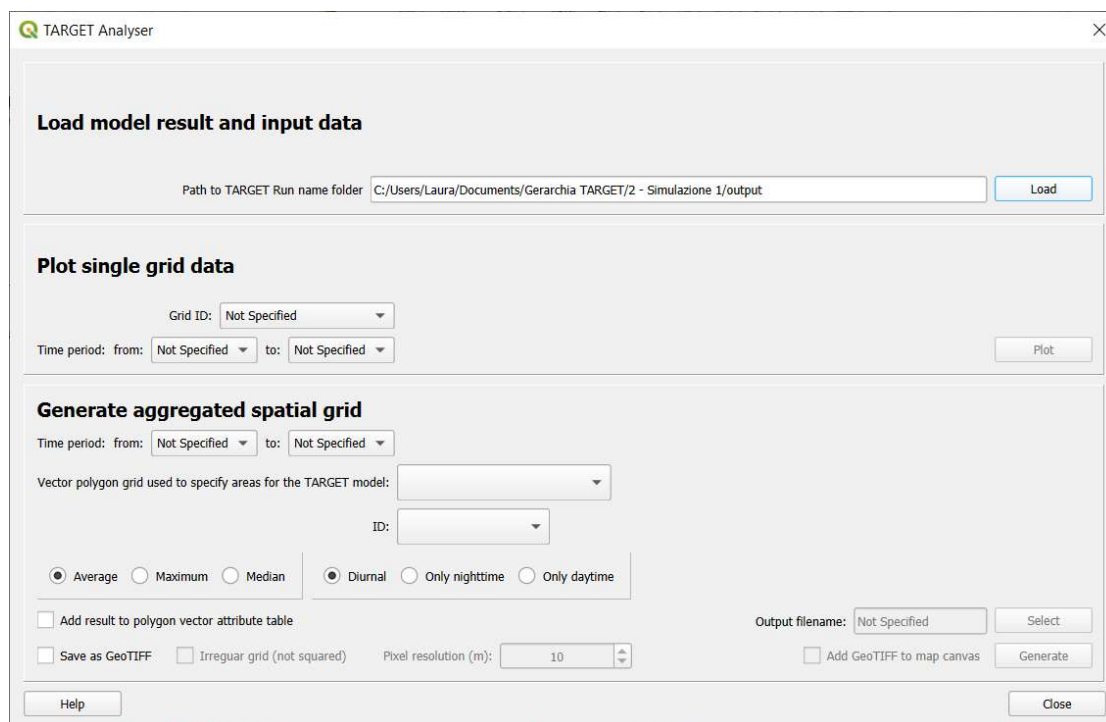


Figura 30 - Finestra di dialogo del processore TARGET Analyzer dalla barra di Qgis

I processori TARGET Analyzer non richiedono l'impostazione manuale di fasce orarie rigide, ma identificano autonomamente il periodo notturno attraverso un'analisi termodinamica: grazie all'analisi del codice sorgente dello strumento, è stato appurato che viene individuato il periodo notturno nei momenti in cui la radiazione solare a onde corte in ingresso è nulla o prossima allo zero.

Per i mesi considerati per i casi studio nei capitoli successivi (giugno, luglio e agosto), le ore con assenza di radiazione solare sono comprese mediamente tra le 21:00-05:00 ora locale per giugno e luglio, e tra le 20:00-05:00 per il mese di agosto. Di conseguenza, l'intervallo [20:00-04:00 UTC] definito dall'ARPA, che corrisponde alle 22:00-06:00 ora locale, risulta ampiamente coerente con le ore notturne identificate da TARGET. Questa sovrapposizione temporale garantisce la piena confrontabilità tra gli output del modello e i dati osservativi, rendendo la validazione statistica solida e priva di distorsioni temporali significative.

5. Analisi Comparativa

Il seguente capitolo riporta i risultati delle simulazioni realizzate con TARGET. Queste sono state fatte per le ondate di calore avvenute in occasioni: dal 9 al 18 giugno 2022, dal 21 al 27 luglio 2022, dal 15 al 22 luglio 2023 e dal 16 al 23 agosto 2023. Saranno presentate le carte dei periodi interi nonché quelli delle singole giornate prese come caso studio, coincidenti con il giorno iniziale di ogni periodo, per poter sempre confrontare il risultato con il modello creato da ARPA.

Saranno anche presi in considerazione i principali parametri statistici (l'MB, RMSE e R2) in modo da valutare l'affidabilità del modello.

A causa dell'indisponibilità delle cartografie digitali tematiche delle Isole di Calore dell'ARPA, il confronto è avvenuto su due livelli: il primo in riferimento alla mappa dell'isola disponibile sul rapporto dell'ente del 2024 e il secondo, più puntuale, attraverso i valori per ogni stazione meteo, di cui i dati sono stati gentilmente forniti.

5.1. Analisi spaziale: Mappe di temperatura prodotte da TARGET

Le carte delle simulazioni delle ondate di calore sono state fatte per le ore diurne e quelle notturne.

A causa della mancanza del dato osservato reale per ogni cella, il confronto statistico è stato svolto solo per quelle al cui interno ricadono le stazioni meteo indicate nel capitolo *Caratterizzazione climatica: analisi storica delle ondate di calore a Torino.*, che ricordiamo essere anche quelle prese dall'ente regionale per le sue valutazioni.

Le rappresentazioni cartografiche prodotte da TARGET mostrano la differenza fra la temperatura calcolata (mod) e quella di riferimento rurale, che ricordiamo essere la stazione meteo di Bauducchi. Importante notare che tutte le mappe prodotte con il software, hanno prodotto dei valori estremi negativi, della grandezza delle migliaia, sempre per le stesse celle. Per una questione di valutazione dei dati, queste non sono state considerate e nelle mappe vengono indicate con la dicitura NULL.

Da un'analisi più attenta si nota che le aree che hanno causato questa anomalia computazionale sono pixel che avevano al loro interno grandi edifici, come per la zona di Mirafiori o il cimitero monumentale, anch'esso inteso come costruito, con valore uguale a 2 nella classificazione Land Cover. La ragione di questo errore è stata attentamente valutata, e la più probabile motivazione risiede nelle fasi di pre-processing e processing: la parametrizzazione morfologica urbana è la base su cui si basa il modello, che da qui, astrae il canyon urbano (Oke, 1988). Se questo non viene rappresentato realisticamente, il modello sembra fallire generando una temperatura nulla, indicata con -9999, nel file meteorologico del file di output del processore TARGET. L'errore sembra avvenire quando la risoluzione o il posizionamento della cella isola porzioni del tessuto urbano composte quasi esclusivamente da edifici, con una percentuale di questa uguale o superiore al 75%. Questo valore è contenuto nel file LC, output del pre-processore TARGET prepare, come si è appurato grazie all'incrocio di questo e delle celle indagate.

Infine, le mappe delle ondate di calore sono state rappresentate con una scala di colori che imitasse quella dell'Arpa per poter permettere un confronto visivo, riportando le tonalità di blu per i valori minori di 0 e di rosso per gli altri.

Ondata di calore dal 9 al 18 giugno 2022

La prima ondata di calore analizzata è quella che comprende il periodo dal 9 al 18 giugno. In tale periodo, le stazioni meteorologiche della città di Torino indicano che la temperatura massima è stata di 31.7 °C e la minima di 16.4 °C con una media stima di 24.8 °C.

L'andamento dei dati medi delle stazioni meteo urbane registrati in questo periodo è stato confrontato attraverso la differenza tra questi e le temperature registrate nella stazione di riferimento rurale di Bauducchi. La tabella sottostante (Tabella 7) riporta le differenze mediate sulle ore per l'intera giornata, evidenziando un netto innalzamento del divario termico tra la stazione rurale e il contesto cittadino, con picchi che raggiungono addirittura i 4.3°C in più all'interno della città.

Al contrario, durante le ore diurne non sembra presentarsi una temperatura maggiore nel contesto urbano rispetto a quella registrata dalla stazione meteorologica rurale. Questo andamento dimostra l'effettiva presenza del fenomeno dell'Isola di Calore urbana, la quale si manifesta e viene percepita fondamentalmente durante le ore notturne.

Tabella 7 - Temperatura media oraria per il periodo di giugno 2022: differenza tra la media delle Stazioni meteo (SM) e la stazioni meteo di Bauducchi

Ora	SM obs	BD obs	Diff.:SM- BD.
00:00:00	22.7	19.0	3.7
01:00:00	21.9	18.2	3.7
02:00:00	21.5	17.6	3.9
03:00:00	20.9	16.7	4.3
04:00:00	20.2	16.4	3.8
05:00:00	20.4	18.5	2.0
06:00:00	22.2	21.4	0.9
07:00:00	23.9	23.8	0.2
08:00:00	25.3	25.8	-0.5
09:00:00	26.8	27.1	-0.3
10:00:00	28.0	28.2	-0.1
11:00:00	28.7	29.0	-0.3
12:00:00	29.8	29.9	-0.1
13:00:00	30.7	30.7	0.1
14:00:00	31.3	31.1	0.2
15:00:00	31.8	31.6	0.2
16:00:00	31.4	31.7	-0.2
17:00:00	30.9	31.3	-0.4
18:00:00	30.1	29.8	0.3
19:00:00	28.7	27.2	1.6
20:00:00	27.1	24.7	2.4
21:00:00	25.5	22.8	2.7
22:00:00	24.7	21.6	3.2
23:00:00	24.0	20.6	3.4

Analizzando il

Grafico 1 è possibile apprezzare nuovamente tale fenomeno; infatti, è chiaramente visibile, come nelle ore notturne (0-4 e 20-23), l'andamento delle temperature si discosti nettamente nelle rappresentazioni. Il confronto con i dati ottenuti da TARGET permette di notare come già il tool mostri delle difficoltà nella rappresentazione e nella stima del fenomeno. Target si accosta all'andamento della stazione Bauducchi e, perciò, non riporta nessuna differenza nelle ore notturne tra città e contesto esterno.

Grafico 1 - Confronto tra l'andamento della temperatura media oraria delle Stazioni meteo (SM), quella di TARGET (TG) e quella di Bauducchi per il periodo di giugno 2022



I valori delle temperature reali sono confrontati con la media delle temperature di TARGET (calcolata per le celle coincidenti con le stazioni meteo) e la media dei valori modellati dall'ARPA per le stazioni, all'interno della Tabella 8.

La differenza tra quelle prodotte con TARGET e le altre due a confronto, evidenzia un comportamento nettamente discrepante del processore nel gestire il periodo diurno e quello notturno della giornata. Mentre i dati osservati dalle SM e quelli di ARPA danno valori simili, con poco scostamento nei valori.

Le differenze registrate, infatti, hanno discrepanze notturne sempre superiori a 3°C registrati, con una differenza massima di 5.7 °C rispetto all'ARPA e di 5.6 °C rispetto ai dati SM.

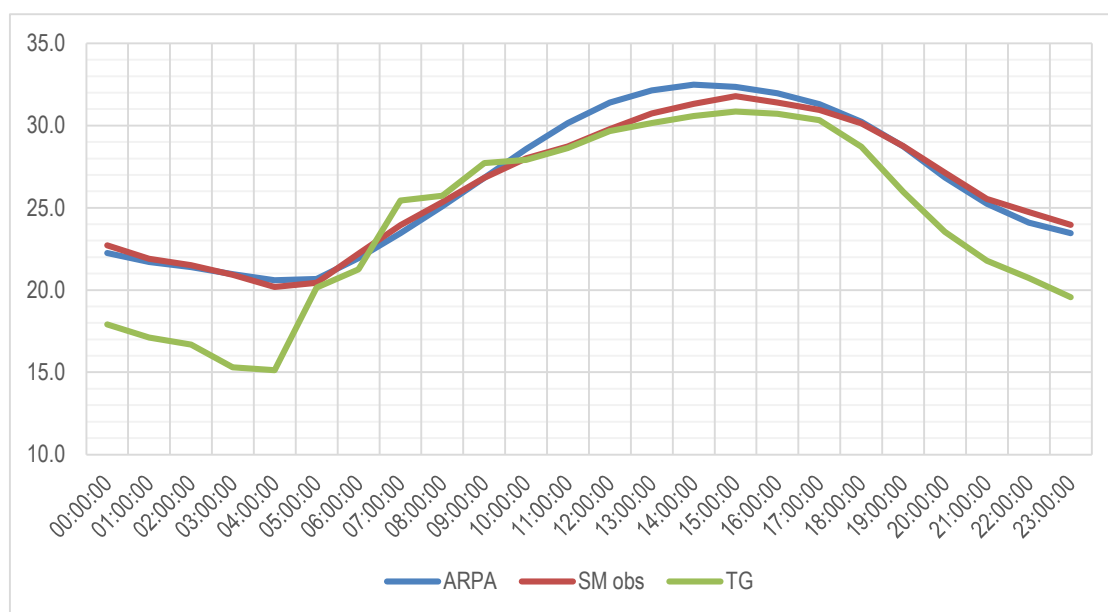
Al contrario, le ore diurne hanno valori più contenuti, dove registrano i loro minimi nelle ore subito antecedenti alla notte. Il confronto riporta un massimo di +2°C per l'ente e di +1.5°C per l'altro esempio, per poi stabilirsi su una tendenza negativa in entrambi i casi ma più ampia per il primo caso rispetto al secondo.

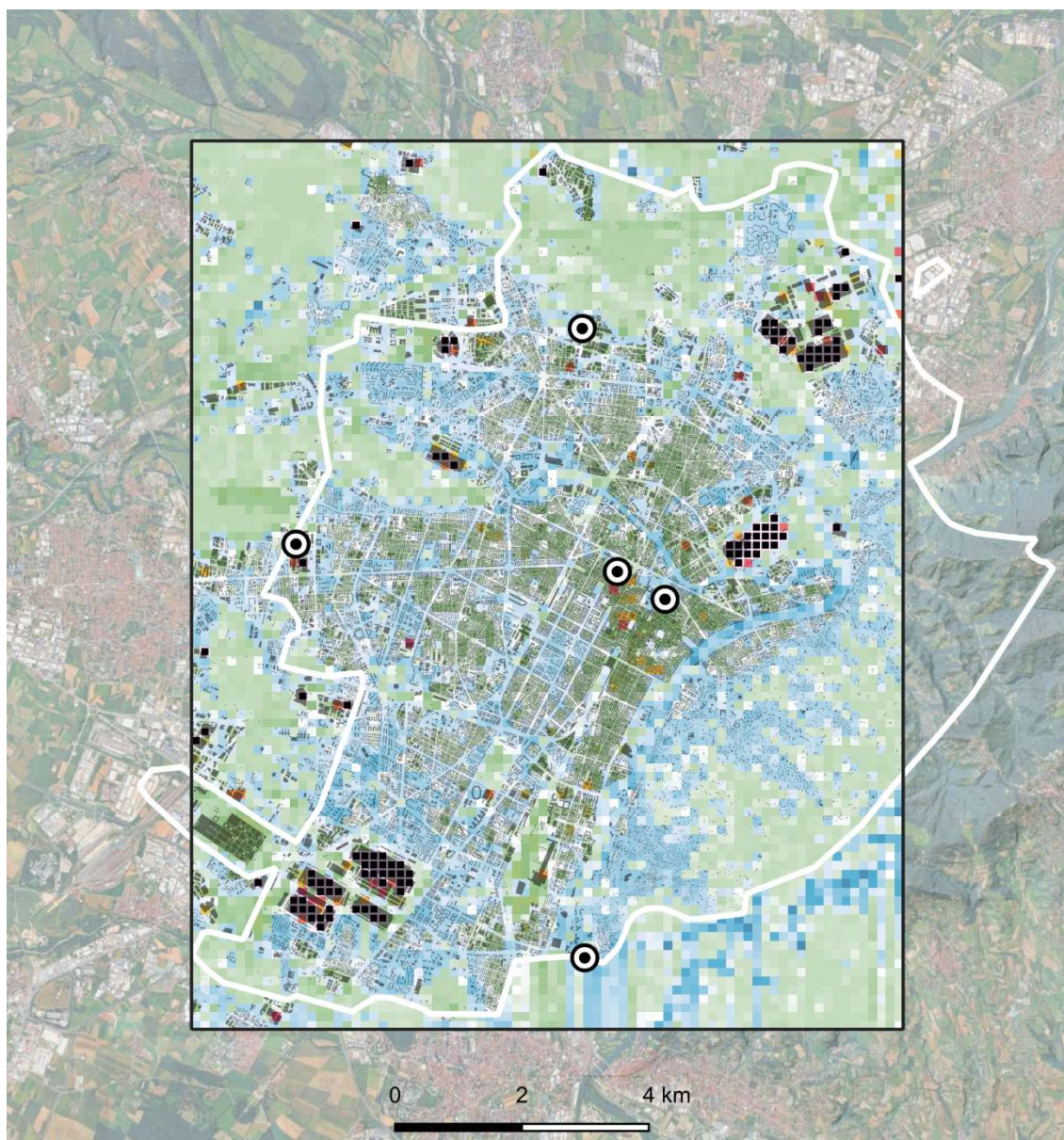
La previsione del modello in esame sembra riprodurre in modo corretto l'andamento delle temperature reali diurne provando di avere prestazioni anche migliori rispetto a COSMO+TERRA URB. Quest'ultimo però rimane più affidabile dove le differenze calcolate in base a TARGET sono maggiori. L'andamento e i discostamenti sono apprezzabili attraverso la rappresentazione nel Grafico 2.

Tabella 8 - Valori medi orari di temperatura registrati dalle Stazioni Meteo (SM obs), da TARGET (TG) e da ARPA (obs) per il periodo di giugno 2022

Ora	TG	ARPA mod	SM obs	TG-ARPA	TG - SM Obs
00:00:00	17.9	22.2	22.7	-4.3	-4.8
01:00:00	17.1	21.7	21.9	-4.6	-4.8
02:00:00	16.7	21.4	21.5	-4.7	-4.8
03:00:00	15.3	21.0	20.9	-5.7	-5.6
04:00:00	15.1	20.6	20.2	-5.5	-5.1
05:00:00	20.1	20.7	20.4	-0.5	-0.3
06:00:00	21.3	21.9	22.2	-0.7	-1.0
07:00:00	25.4	23.4	23.9	2.0	1.5
08:00:00	25.7	25.1	25.3	0.6	0.4
09:00:00	27.7	26.8	26.8	0.9	0.9
10:00:00	27.9	28.6	28.0	-0.7	-0.1
11:00:00	28.6	30.2	28.7	-1.5	-0.1
12:00:00	29.7	31.4	29.8	-1.7	-0.1
13:00:00	30.1	32.1	30.7	-2.0	-0.6
14:00:00	30.6	32.5	31.3	-1.9	-0.7
15:00:00	30.9	32.4	31.8	-1.5	-0.9
16:00:00	30.7	32.0	31.4	-1.2	-0.7
17:00:00	30.3	31.3	30.9	-1.0	-0.6
18:00:00	28.7	30.2	30.1	-1.5	-1.4
19:00:00	26.0	28.7	28.7	-2.8	-2.8
20:00:00	23.5	26.8	27.1	-3.3	-3.6
21:00:00	21.8	25.3	25.5	-3.5	-3.8
22:00:00	20.7	24.1	24.7	-3.4	-4.0
23:00:00	19.6	23.5	24.0	-3.9	-4.4

Grafico 2 - Confronto tra l'andamento della temperatura media oraria delle Stazioni meteo (SM obs), quella di TARGET (TG) e quella ARPA per il periodo di giugno 2022





Legenda

9-18 giugno 2022
media diurna



-4 0 5

Null Data

Elementi di base

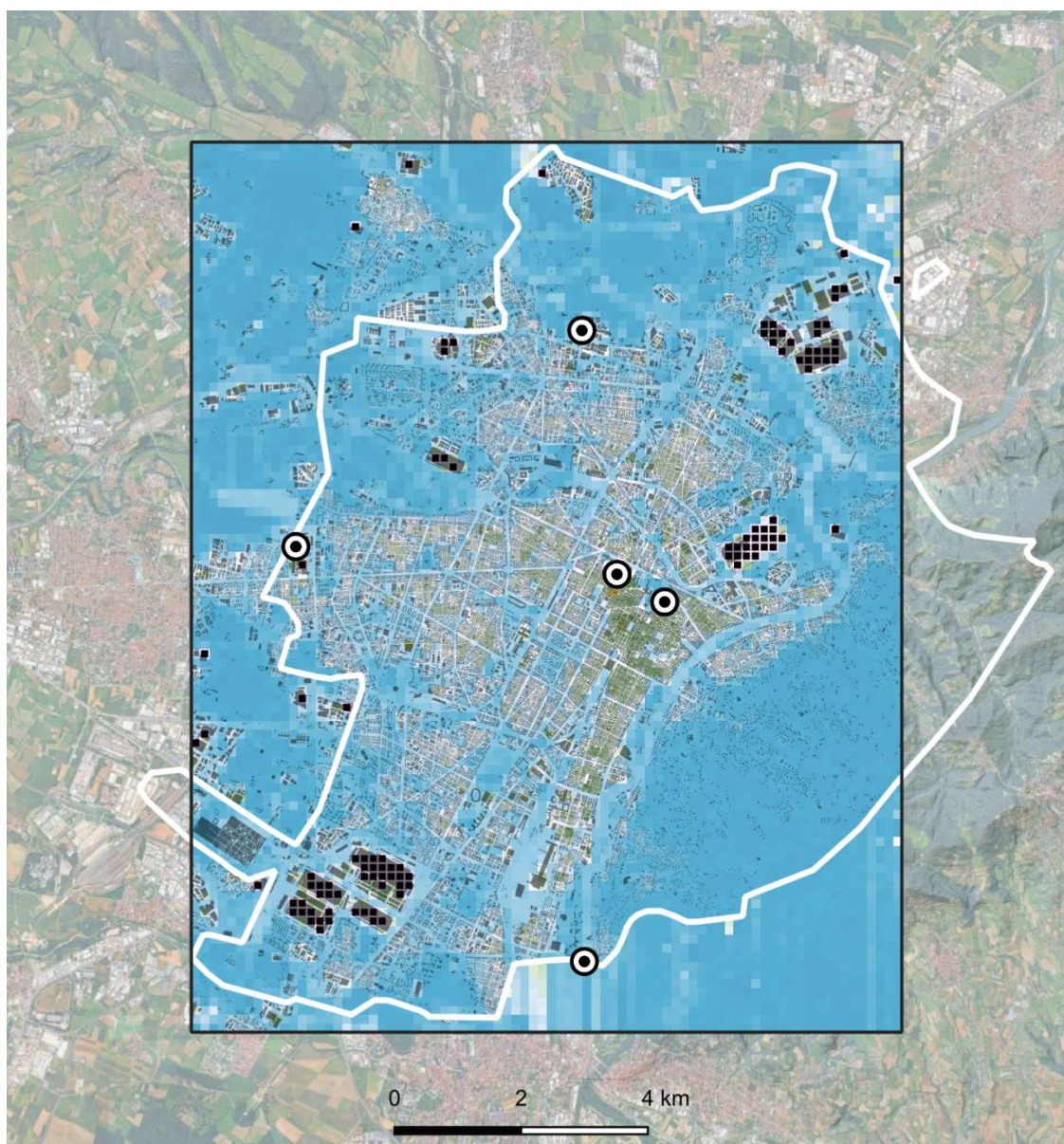
Edificato BDTRE2023

Area di studio

Confini comunali Torino

Stazioni meteorologiche

Figura 31 - Simulazione TARGET dal 9 al 18 giugno 2022 per il periodo diurno



Legenda

**9-18 giugno 2022
media notturna**



-4 0 5

Null Data

Elementi di base

Edificato BDTRE2023

Area di studio

Confini comunali Torino

Stazioni meteorologiche

Figura 32 - Simulazione TARGET dal 9 al 18 giugno 2022 per il periodo notturno

Le rappresentazioni spaziali per il periodo diurno e quello notturno dell'ondata di calore elaborata da TARGET vengono riportate nelle carte in Figura 31 e Figura 32.

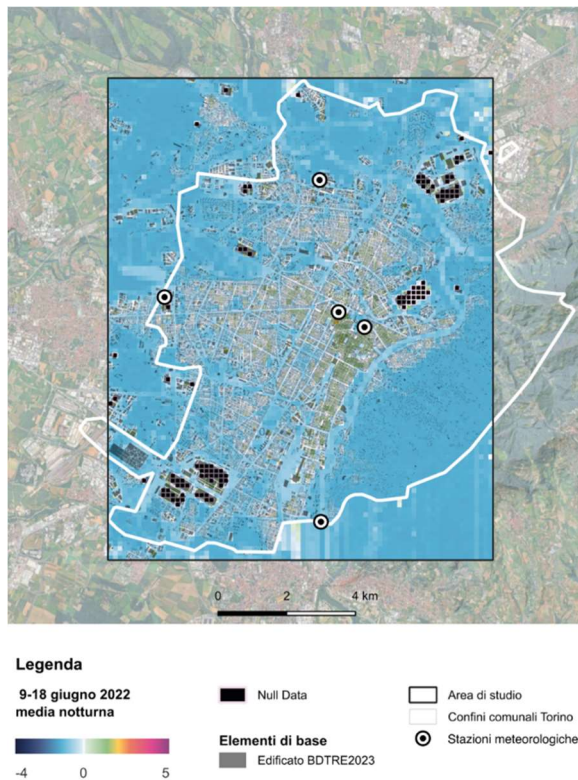
Le differenze rappresentate evidenziano una concentrazione di calore nella parte più costruita della città, in particolare per i quartieri con una densità edilizia elevata e ricadenti all'interno delle classi LCZ 2, come la zona del centro storico o quella del quartiere che costeggia il fiume Po. Quest'ultimo, in particolare, rappresenta un'infrastruttura blu ben definita nella rappresentazione, con valori diversi rispetto al contesto in cui ricade, come accade per gli altri fiumi della città di Torino. Gli assi viari, invece, non presentano una temperatura apprezzabilmente diversa rispetto alle celle limitrofe, risultando riconoscibili nelle rappresentazioni solo grazie al contesto inserito. Infatti, la scelta della cella di 150m comporta che nella cella ricadano elementi della città eterogenei, per i quali il modello effettua una media delle proprietà termiche e radiative. Questo va a influire sulla maggiore temperatura dell'asfalto o sull'effetto mitigativo dei corsi d'acqua, portando a omogeneizzare le temperature del contesto in cui ricadono.

La rappresentazione del periodo diurno produce anomalie: si evidenziano aree più periferiche, coincidenti con ampie aree verdi, con valori della differenza calcolata positivi, intorno a +2 gradi secondo la scala di rappresentazione, e in contrapposizione, aree dove si ha la presenza del costruito con valori nella scala blu-negativa. Tale restituzione porterebbe a pensare che in queste ultime il processore abbia un livello di dettaglio maggiore dato dalla presenza di edifici e che, nel suo bilancio energetico, sovrastimi la loro capacità nell'ombreggiamento e quindi la temperatura della cella. Al contempo è probabile che sottostimi anche l'azione dell'albedo delle superfici delle città, in quanto ci si aspetterebbe una temperatura più omogenea o comunque minore per le aree verdi cittadine, come per il parco della Pellerina o il parco Ruffini.

Nelle ore notturne la distribuzione delle temperature sembra mostrare un andamento generalmente negativo. La rappresentazione evidenzia una concentrazione delle temperature superiori alla stazione di riferimento nel centro cittadino, seguendo l'andamento del periodo precedente, ma per il resto della città rileva, per la maggior parte, valori minori rispetto alla stazione rurale. Il contesto esterno alla parte densamente edificata mostra una tonalità tendente verso il blu scuro, indicando una tendenza in negativo dei valori in queste aree. Le aree considerate con delle anomalie precedentemente, non evidenziano più una differenza sostanziale col contesto intorno a loro, anzi mantengono l'andamento negativo globale riscontrato.

In generale, le aree identificate dalla classe 2 delle Local Climate Zone, sembrano risultare i luoghi con la differenza di temperatura maggiori. Osservando globalmente le mappe prodotte sembrerebbe che l'Isola di Calore venga mostrata localizzata in precisi punti del costruito ma sottostimando aree altamente urbanizzate meno baricentriche, come il quartiere di Mirafiori o quello di Lucento.

Confronto con le carte e valori ARPA



riportata - Simulazione TARGET dal 9 al 18 giugno 2022 per il periodo notturno

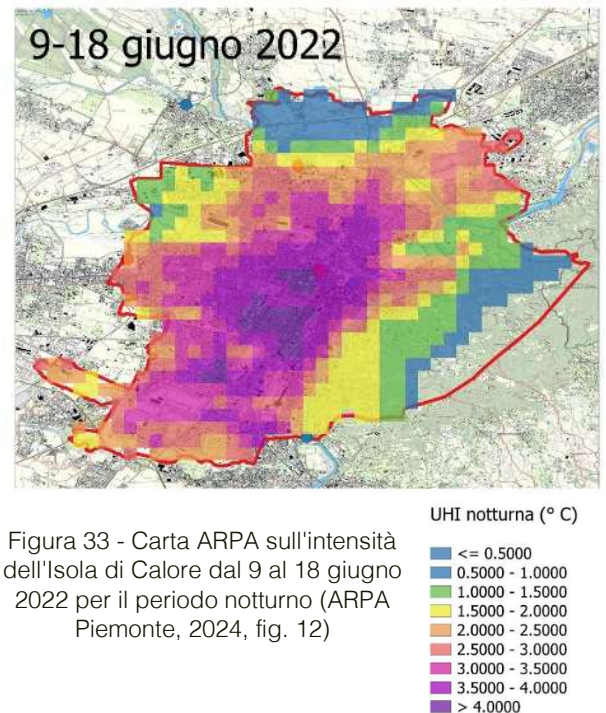


Figura 33 - Carta ARPA sull'intensità dell'Isola di Calore dal 9 al 18 giugno 2022 per il periodo notturno (ARPA Piemonte, 2024, fig. 12)

Osservando la media notturna per tutto il periodo di giugno 2022, il modello valuta -0.9°C rispetto alla stazione di riferimento, con un massimo di $+1.9^{\circ}\text{C}$ per la cella 4751, corrispondente alla zona centrale di via Garibaldi, e una minima di circa -1.5°C per diverse aree che ricadono in zone periferiche non costruite.

Il confronto con la mappa elaborata da ARPA evidenzia, immediatamente, un forte scostamento dei dati. Secondo quanto predetto dal modello COSMO+TERRA Urb la temperatura è molto maggiore dalla periferia verso il centro della città, come effettivamente si comporta il fenomeno dell'Isola di Calore. Anche per la simulazione TARGET sembra avvenire la stessa distribuzione delle temperature ma, al contempo, risulta netta solo per la zona del quartiere che costeggia il parco del Valentino fino al centro città.

Infatti, l'ARPA registra valori superiori a quelli dedotti dall'ente regionale che da 0.5°C arrivano a valori superiori a 4°C , i quali non sono mai raggiunti da TARGET.

Ondata di calore dal 21 al 27 luglio 2022

La seconda ondata presa in riferimento comprende il periodo dal 21 al 27 luglio 2022. Per questo la temperatura media è stata di 28.8°C con una massima di 34.0°C alle ore 14:00 e una temperatura minima di 23.8 °C alle 05:00.

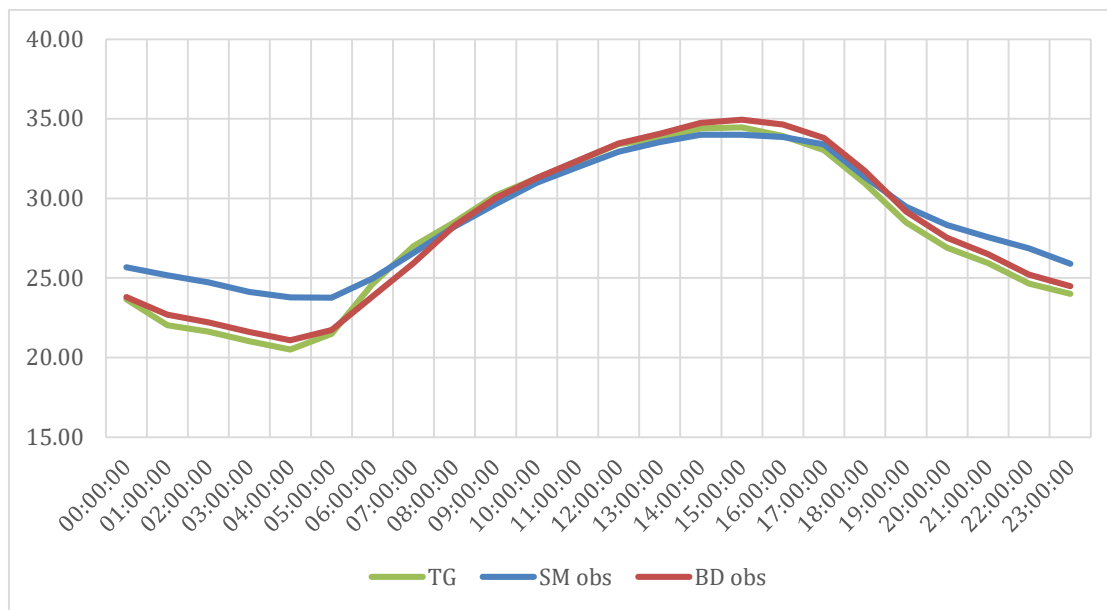
Dal confronto tra la temperatura registrata nella stazione rurale e quella urbana è possibile notare come vi sia un distacco minore rispetto al caso precedente di giugno 2022. I divari maggiori sono sempre registrati di notte, per il fenomeno dell'Isola di Calore, e si registrano valori di differenza che vanno da +0.8 °C a + 2.7°C. Questo andamento è visibile anche nel grafico 3 dove si evidenzia che nelle ore della notte lo scarto tra le temperature osservate dalle stazioni risulta più ravvicinato.

Le temperature di TARGET (Grafico 3) rispecchiano sempre quelle di Bauducchi comportando che TARGET si distacchi secondo valori dello stesso ordine di grandezza rispetto alla temperatura in città.

Tabella 9 - Temperatura media oraria per il periodo di luglio 2022: differenza tra la media delle Stazioni meteo (SM obs) e la stazioni meteo di Bauducchi (BD obs)

Ora	SM obs	BD obs	Diff.:SM- BD.
00:00:00	25.7	23.8	1.9
01:00:00	25.2	22.7	2.5
02:00:00	24.7	22.2	2.5
03:00:00	24.1	21.6	2.5
04:00:00	23.8	21.1	2.7
05:00:00	23.8	21.7	2.0
06:00:00	25.0	23.8	1.1
07:00:00	26.6	25.9	0.6
08:00:00	28.2	28.3	-0.1
09:00:00	29.6	30.0	-0.4
10:00:00	31.0	31.3	-0.3
11:00:00	32.0	32.4	-0.4
12:00:00	32.9	33.5	-0.5
13:00:00	33.5	34.1	-0.5
14:00:00	34.0	34.7	-0.7
15:00:00	34.0	34.9	-0.9
16:00:00	33.8	34.6	-0.8
17:00:00	33.4	33.8	-0.4
18:00:00	31.3	31.7	-0.4
19:00:00	29.5	29.2	0.3
20:00:00	28.3	27.5	0.8
21:00:00	27.6	26.5	1.1
22:00:00	26.8	25.2	1.6
23:00:00	25.9	24.5	1.4

Grafico 3 - Confronto tra l'andamento della temperatura oraria media delle Stazioni meteo (SM obs), quella di TARGET (TG) e quella di Bauducchi per il periodo di luglio 2022



I valori delle temperature simulati da TARGET e confrontati con gli altri presi in considerazione, dimostrano la bassa capacità dello strumento nel simulare le temperature nel contesto costruito per il periodo notturno.

Se confrontati i modelli, TARGET si discosta notevolmente, con minimi di -4.4°C sulle previsioni notturne e rispetto al giorno si evidenzia un'escursione contenuta, con valori sempre minori di 2°C, ad eccezione per le 5 del mattino.

Nuovamente, durante le ore del giorno, la differenza con i valori delle stazioni meteo è sempre contenuta in $\pm 1^\circ\text{C}$. Tuttavia, il modello in analisi non mostra nessuna evidente migliore qualità di rappresentare la realtà meglio del modello di ARPA.

Tabella 10 - Valori medi orari di temperatura registrati dalle Stazioni Meteo (SM obs), da TARGET e da ARPA per il periodo di luglio 2022

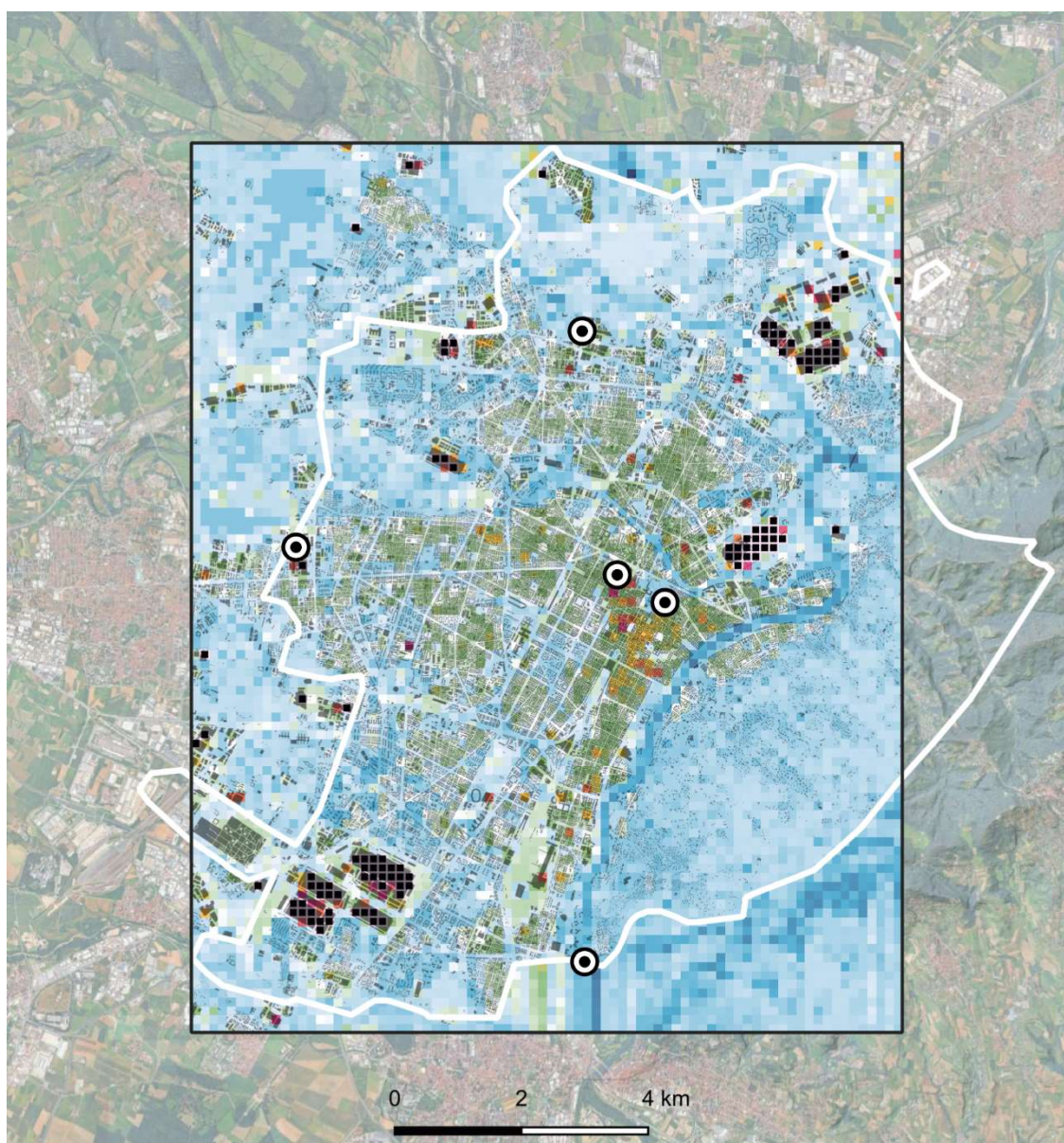
Ora	TG	ARPA	SM obs	TG-ARPA	TG - SM Obs
00:00:00	23.7	26.2	25.7	-2.5	-2.0
01:00:00	22.0	25.8	25.2	-3.8	-3.1
02:00:00	21.6	25.7	24.7	-4.1	-3.1
03:00:00	21.0	25.3	24.1	-4.3	-3.1
04:00:00	20.5	25.0	23.8	-4.4	-3.2
05:00:00	21.5	24.9	23.8	-3.4	-2.3
06:00:00	24.6	25.7	25.0	-1.1	-0.4
07:00:00	27.0	27.0	26.6	0.0	0.4
08:00:00	28.5	28.4	28.2	0.1	0.3
09:00:00	30.2	30.1	29.6	0.1	0.5
10:00:00	31.3	31.9	31.0	-0.6	0.3
11:00:00	32.3	33.4	32.0	-1.1	0.4

12:00:00	33.4	34.8	32.9	-1.4	0.5
13:00:00	33.8	35.4	33.5	-1.6	0.2
14:00:00	34.4	35.1	34.0	-0.7	0.4
15:00:00	34.5	33.7	34.0	0.7	0.5
16:00:00	33.9	33.2	33.8	0.7	0.1
17:00:00	33.0	31.3	33.4	1.8	-0.4
18:00:00	30.9	30.6	31.3	0.3	-0.4
19:00:00	28.5	30.2	29.5	-1.7	-1.0
20:00:00	26.9	29.6	28.3	-2.7	-1.4
21:00:00	25.9	28.6	27.6	-2.6	-1.6
22:00:00	24.6	26.9	26.8	-2.3	-2.2
23:00:00	24.0	26.3	25.9	-2.3	-1.9

Dal Grafico 4 del confronto tra i dati osservati e quelli prodotti da ARPA e da TARGET è possibile notare come quest'ultimo si caratterizza con valori più distaccati nelle ore notturne rispetto agli altri due; ma come, invece, la tendenza nelle ore diurne sembra ricalcare in modo coincidente i dati con quelli osservati (linea verde e arancione). Infatti, si evidenzia che ARPA registra dei picchi nella giornata differenti rispetto agli altri due andamenti e, in generale, per le ore finali della giornata si evidenzia una difficoltà per entrambi i modelli di riportare le temperature reali.

Grafico 4 - Confronto tra l'andamento della temperatura media oraria delle Stazioni meteo (SM_obs), quella di TARGET (TG) e quella ARPA per il periodo di luglio 2022





Legenda

21 -27 luglio 2022
media diurna



Null Data

Elementi di base

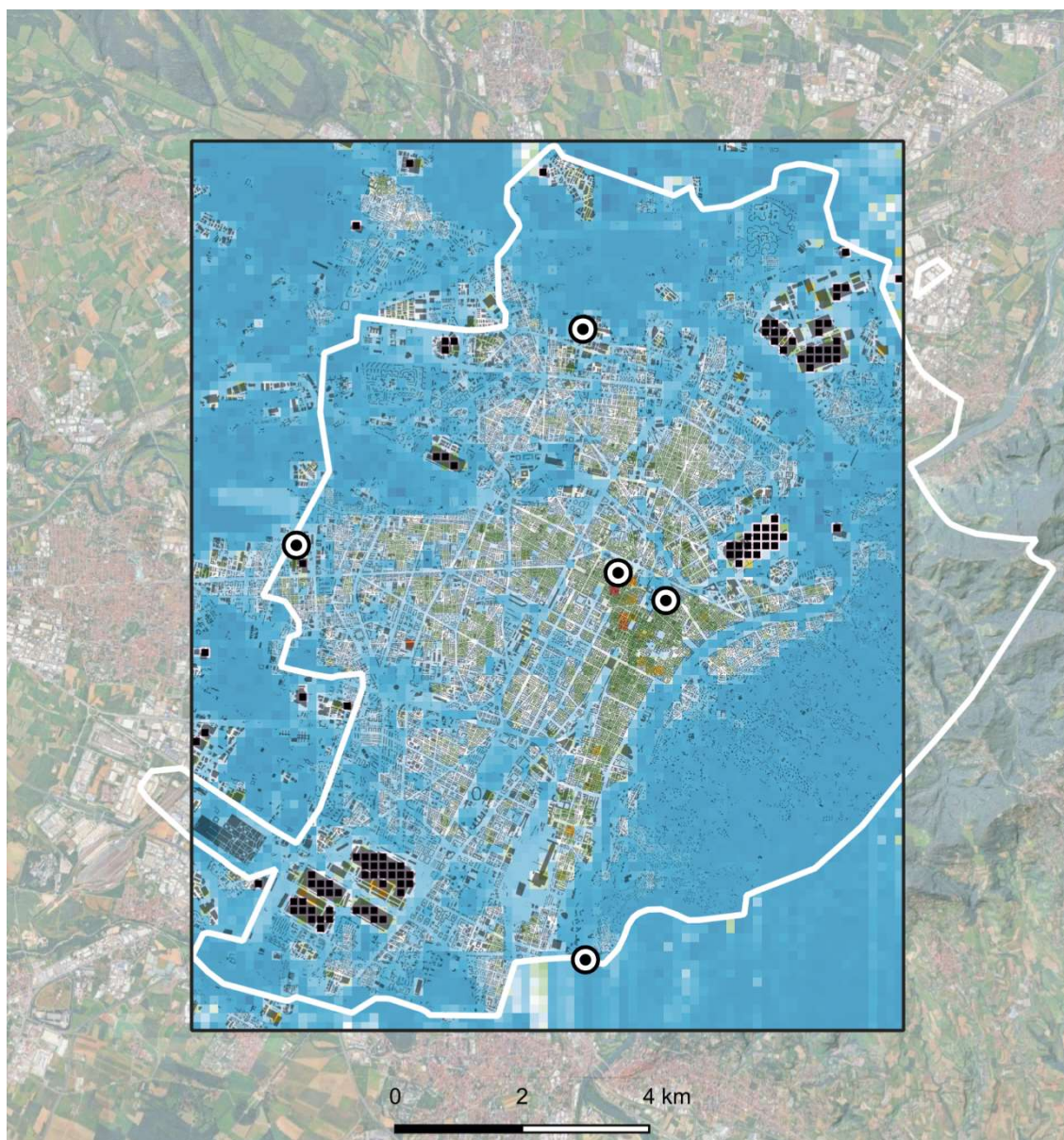
Edificato BDTRE2023

Area di studio

Confini comunali Torino

Stazioni meteorologiche

Figura 34 - Simulazione TARGET dal 22 al 27 luglio 2022 per il periodo diurno



Legenda

21-27 luglio 2022
media notturna



-4 0 5

Null Data

Elementi di base

Edificato BDTRE2023

Area di studio

Confini comunali Torino

Stazioni meteorologiche

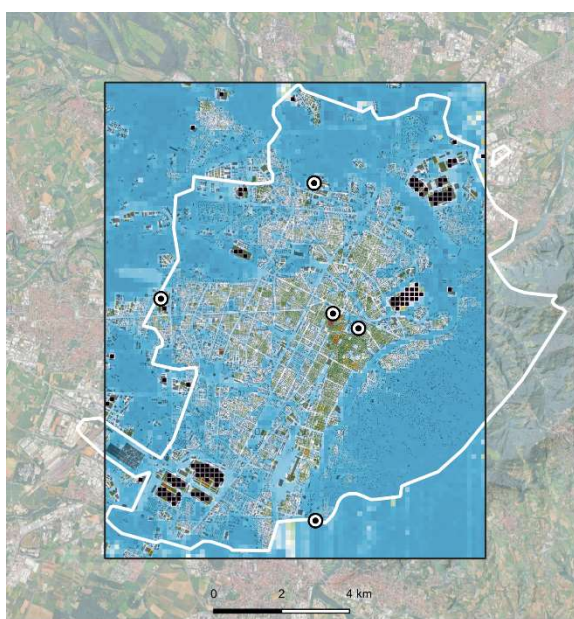
Figura 35 - Simulazione TARGET dal 22 al 27 luglio 2022 per il periodo notturno

Entrambe le rappresentazioni riportano, nuovamente, una concentrazione di differenze di temperature positive al centro del contesto costruito. La fascia compresa tra la ferrovia e il fiume Po, che si protrae fino ad arrivare al centro cittadino, presenta un maggior numero di celle con valori superiori rispetto al riferimento rurale.

Ad una prima analisi sembrerebbe che la mappa diurna non riproduca le anomalie presentate nel caso di giugno 2022 e, anzi, che questa registri delle differenze di temperature coerenti con la destinazione d'uso coincidente. Anche i parchi urbani e i corsi d'acqua sono rappresentati effettivamente con una gradazione inferiore, indicando una zona più fresca rispetto al contesto. Contrariamente nelle aree densamente costruite, dove ci si aspetterebbe una maggiore temperatura rispetto al contesto rurale, vi sono valori negativi.

La mappa del periodo notturno (Figura 35), mostra ancora una volta una concentrazione di valori positivi nei quartieri di Barriera di Milano, di Parella e quelli che costeggiano il fiume principale; mentre, le restanti zone ad alta urbanizzazione presentano temperature minori con alcune aree che emergono, creando degli hotspot locali per ogni quartiere. Infine, dalle rappresentazioni non emerge nessuno scostamento di gradiente né per le infrastrutture blu né per gli assi viari rispetto alle celle limitrofe.

Confronto con le carte e valori ARPA



Legenda
21-27 luglio 2022
media notturna

Null Data

Area di studio

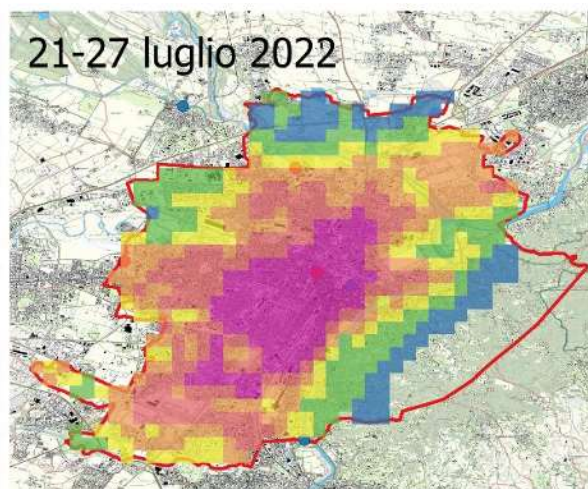
Confini comunali Torino

Stazioni meteorologiche

Elementi di base
Edificato BD TRE2023

-4 0 5

riportata - Simulazione TARGET dal 22 al 27 luglio 2022
per il periodo notturno



UHI notturna (° C)

Figura 19: Carta ARPA sull'intensità dell'Isola di Calore dal 21 al 27 luglio 2022 per il periodo notturno (ARPA Piemonte, 2024, fig. 12)

<= 0.5000
0.5000 - 1.0000
1.0000 - 1.5000
1.5000 - 2.0000
2.0000 - 2.5000
2.5000 - 3.0000
3.0000 - 3.5000
3.5000 - 4.0000
> 4.0000

Dal confronto con la carta prodotta da ARPA la rappresentazione presenta differenze ben visibili sia nella gradazione che nella distribuzione dei valori.

Per Target si registra la differenza più negativa di -1.9°C, in un'area con forte prevalenza vegetativa, per la cella 4904. Il valore massimo si registra nuovamente nel centro storico per la stessa cella con differenza maggiore del periodo di giugno, con un valore però di +2.9°C. La media -1.0 rimane sempre negativa.

Dalle rappresentazioni di TARGET sembra vi sia un aumento dell'escursione dei dati rispetto al primo periodo; mentre, se si osservano le carte dell'ARPA sembra l'opposto, con un'area minore colpita da valori molto alti. Nuovamente, in quest'ultima non vi è la presenza di escursioni negative, al contrario del modello in analisi, con un massimo di 3.5°C per tutta l'area baricentrica della città.

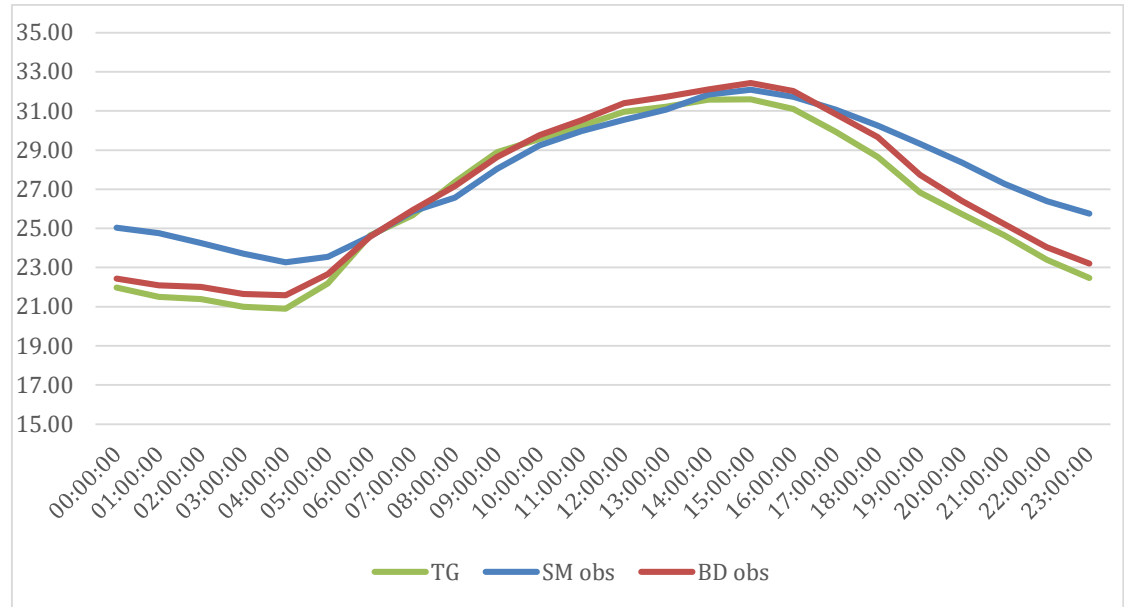
Ondata di calore dal 15 al 22 luglio 2023

La terza ondata di calore studiata è relativa all'anno 2023 e comprende il periodo dal 15 al 22 luglio. La temperatura media è di 27.7°C, con una massima registrata dalle stazioni urbane meteorologiche per questo periodo è stata di 32.1 °C alle 15:00, mentre, la temperatura minima è stata di 23.3 °C alle 04:00. Anche per questa ondata di calore, come riportato nella Tabella 11 e nel Grafico 5, è riscontrabile il fenomeno UHI, con notti più calde di massima +2.7°C rispetto alla zona rurale. TARGET rappresenta l'andamento di Bauducchi con una buona corrispondenza, visibile nel grafico, dimostrando ancora una volta la sottostima nelle ore notturne.

Tabella 11 - Temperatura media oraria per il periodo di luglio 2023: differenza tra la media delle Stazioni meteo (SM) e la stazioni meteo di Bauducchi

Ora	SM obs	BD obs	Diff.: SM- BD.
00:00:00	25.04	22.4	2.6
01:00:00	24.75	22.1	2.7
02:00:00	24.25	22.0	2.2
03:00:00	23.71	21.6	2.1
04:00:00	23.28	21.6	1.7
05:00:00	23.55	22.7	0.9
06:00:00	24.59	24.6	0.0
07:00:00	25.88	25.9	-0.1
08:00:00	26.57	27.2	-0.6
09:00:00	28.04	28.7	-0.6
10:00:00	29.23	29.8	-0.5
11:00:00	29.97	30.5	-0.6
12:00:00	30.55	31.4	-0.8
13:00:00	31.06	31.7	-0.7
14:00:00	31.83	32.1	-0.3
15:00:00	32.10	32.4	-0.3
16:00:00	31.72	32.0	-0.3
17:00:00	31.07	30.8	0.2
18:00:00	30.26	29.7	0.6
19:00:00	29.33	27.7	1.6
20:00:00	28.36	26.4	2.0
21:00:00	27.27	25.2	2.1
22:00:00	26.39	24.0	2.3
23:00:00	25.76	23.2	2.6

Grafico 5 - Confronto tra l'andamento della temperatura media delle Stazioni meteo (SM), quella di TARGET (TG) e quella di Bauducchi per il periodo di luglio 2023



Le temperature reali sono nuovamente rappresentate per le ore che registrano radiazione solare e quelle senza hanno un discostamento notevole.

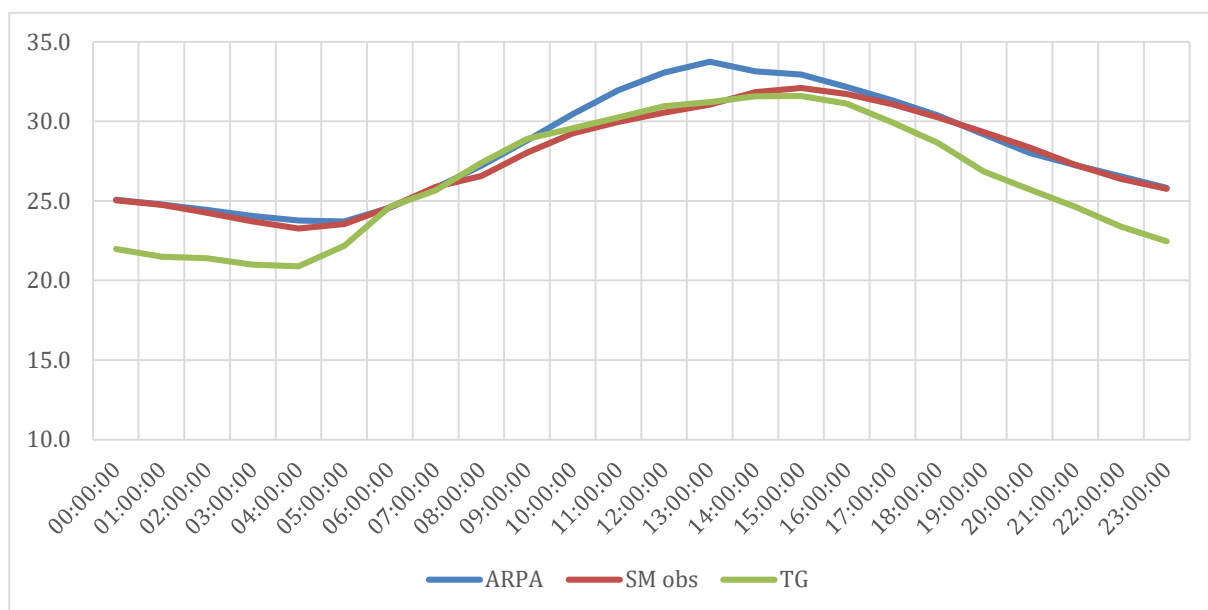
L'ARPA rappresenta meglio nuovamente l'andamento delle temperature reali (Grafico 6), specialmente nella notte, nonostante faccia nuovamente delle sovrastime dei valori durante i picchi diurni. Al contrario TARGET, oltre alle già sottolineati difficoltà per le ore marginali, durante le altre segue con la curva delle temperature delle stazioni meteo. Lo scarto maggiore è registrato alle 23, con un valore di -3.29°C rispetto a Bauducchi.

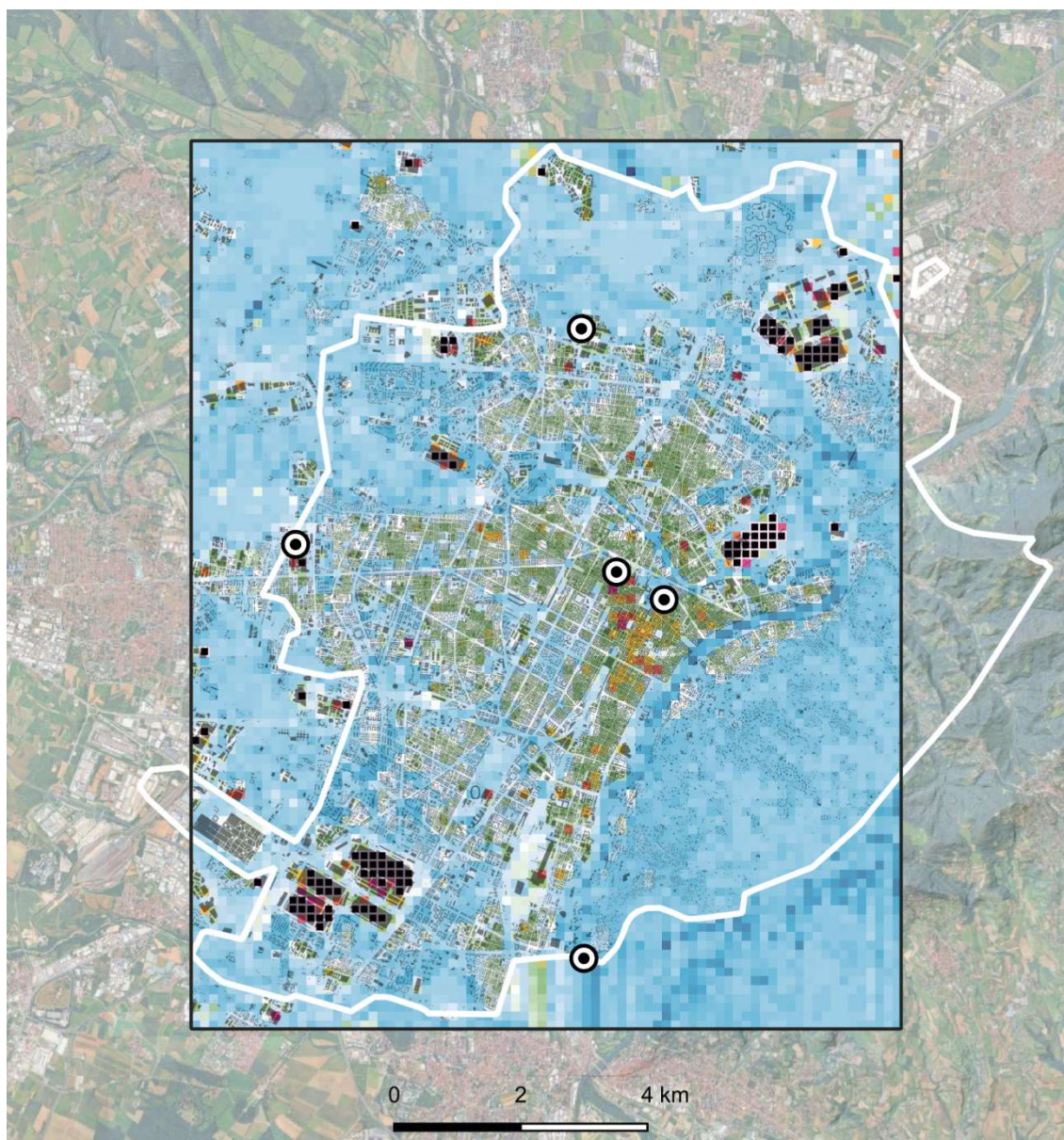
Tabella 12 - Valori medi orari di temperatura registrati dalle Stazioni Meteo (SM obs), da TARGET e da ARPA per il periodo di luglio 2023

Ora	TG	ARPA	SM obs	TG-ARPA	TG - SM Obs
00:00:00	22.0	25.1	25.0	-3.1	-3.1
01:00:00	21.5	24.8	24.8	-3.3	-3.2
02:00:00	21.4	24.4	24.2	-3.0	-2.9
03:00:00	21.0	24.1	23.7	-3.1	-2.7
04:00:00	20.9	23.8	23.3	-2.9	-2.4
05:00:00	22.2	23.7	23.5	-1.5	-1.4
06:00:00	24.6	24.6	24.6	0.1	0.1
07:00:00	25.7	25.8	25.9	-0.2	-0.2
08:00:00	27.4	27.2	26.6	0.2	0.8
09:00:00	28.9	28.8	28.0	0.1	0.9
10:00:00	29.6	30.5	29.2	-0.9	0.3
11:00:00	30.2	32.0	30.0	-1.7	0.3
12:00:00	31.0	33.1	30.6	-2.1	0.4
13:00:00	31.2	33.7	31.1	-2.5	0.2
14:00:00	31.6	33.1	31.8	-1.6	-0.3
15:00:00	31.6	32.9	32.1	-1.3	-0.5

16:00:00	31.1	32.2	31.7	-1.0	-0.6
17:00:00	29.9	31.3	31.1	-1.4	-1.1
18:00:00	28.6	30.4	30.3	-1.7	-1.6
19:00:00	26.8	29.2	29.3	-2.3	-2.5
20:00:00	25.7	28.0	28.4	-2.3	-2.6
21:00:00	24.6	27.3	27.3	-2.6	-2.6
22:00:00	23.4	26.5	26.4	-3.2	-3.0
23:00:00	22.5	25.8	25.8	-3.4	-3.3

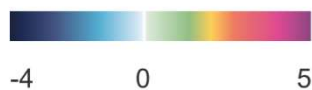
Grafico 6 - Confronto tra l'andamento della temperatura media oraria delle Stazioni meteo (SM obs), quella di TARGET (TG) e quella ARPA per il periodo di luglio 2023





Legenda

15-22 luglio 2023
media diurna



Null Data

Elementi di base

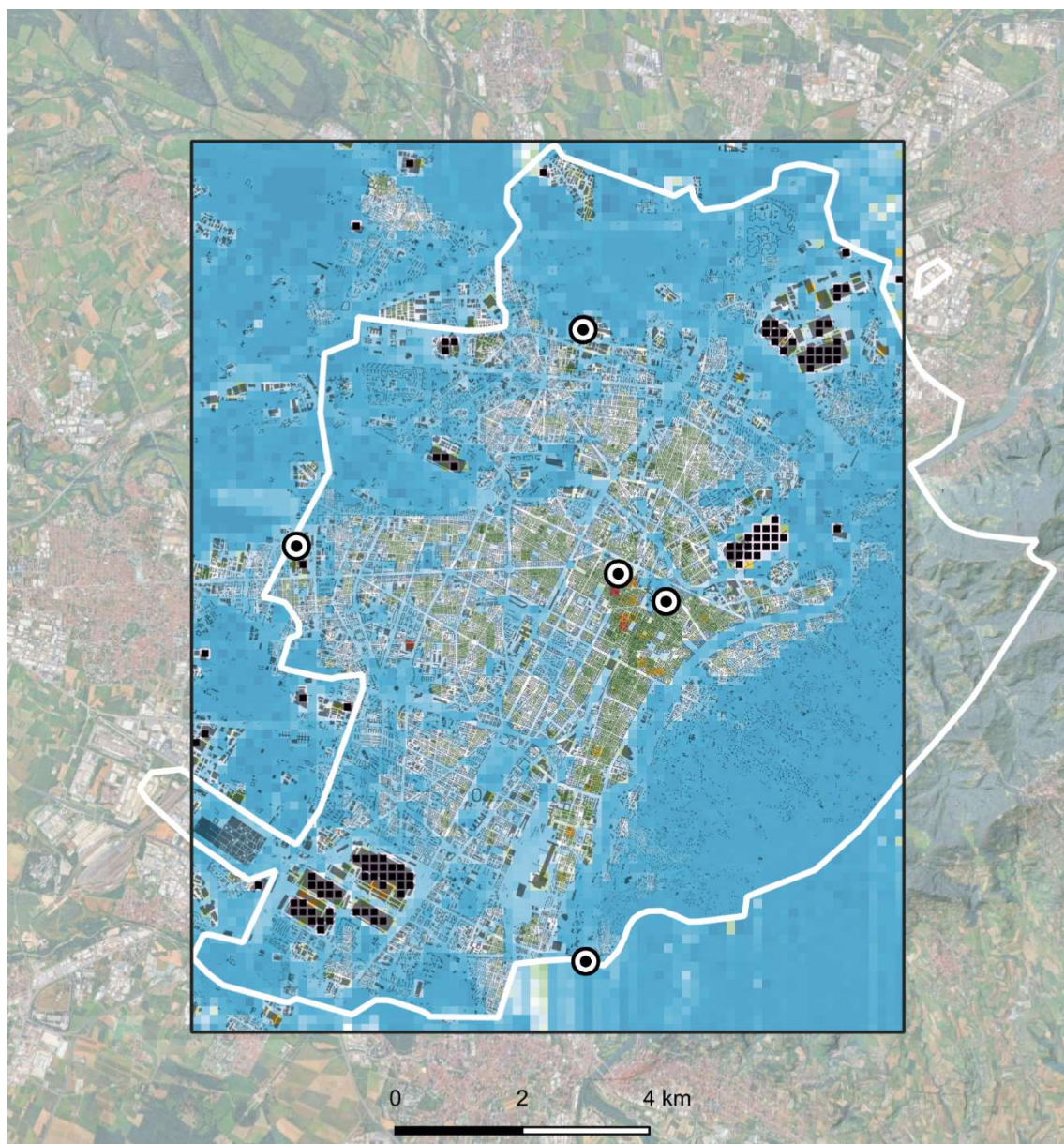
Edificato BDTRE2023

Area di studio

Confini comunali Torino

Stazioni meteorologiche

Figura 36 - Simulazione TARGET dal 15 al 22 luglio 2023 per il periodo diurno



Legenda

15-22 luglio 2023
media notturna



-4 0 5

 Null Data

Elementi di base

 Edificato BDTRE2023

 Area di studio

 Confini comunali Torino

 Stazioni meteorologiche

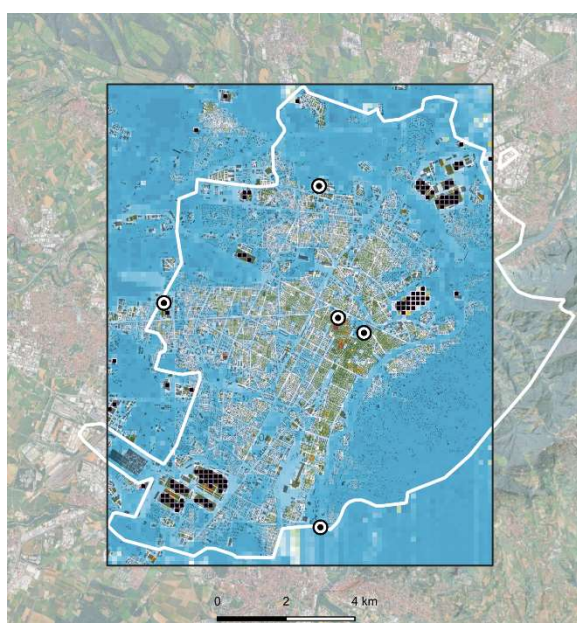
Figura 37 - Simulazione TARGET dal 15 al 22 luglio 2023 per il periodo notturno

Le mappe prodotte da TARGET mostrano la consueta Isola di Calore del contesto più costruito e lo stesso andamento termico per l'intero territorio in analisi, similmente alla simulazione del luglio 2023.

La differenza diurna e notturna sembra meno evidente in questo caso. Le aree verdi al confine del costruito presentano valori contenuti, in linea con le temperature di Bauducchi, anche se sempre minori nella seconda carta.

Anche qui aree densamente cementificate vengono individuate con una temperatura inferiore alla stazione rurale per entrambi i periodi, dove emergono nuovamente alcune celle con valori molto più elevati rispetto al contesto in cui ricadono, rappresentando un'anomalia nella rappresentazione.

Confronto con le carte e valori ARPA



Legenda
15-22 luglio 2023
media notturna
-4 0 5
Null Data
Elementi di base
Edificato BDIRE2023
Area di studio
Confini comunali Torino
Stazioni meteorologiche

riportato - Simulazione TARGET dal 15 al 22 luglio 2023
per il periodo notturno

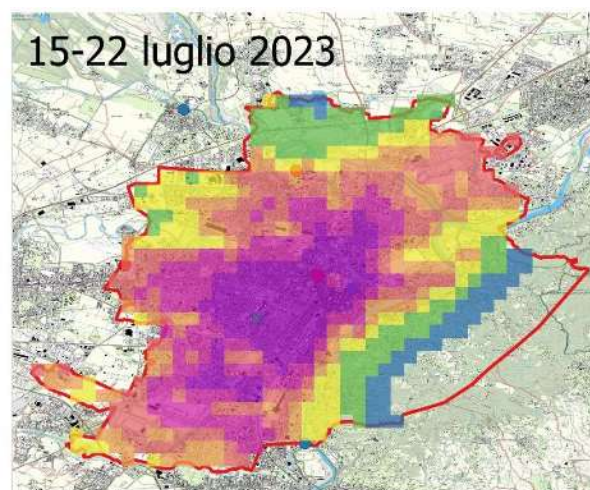


Figura 38 - Carta ARPA sull'intensità dell'Isola di Calore dal 15 al 22 luglio 2023 per il periodo notturno (ARPA Piemonte, 2024, fig. 12)

UHI notturna (° C)
≤ 0.5000
0.5000 - 1.0000
1.0000 - 1.5000
1.5000 - 2.0000
2.0000 - 2.5000
2.5000 - 3.0000
3.0000 - 3.5000
3.5000 - 4.0000
> 4.0000

L'ondata di calore simulata dall'ARPA per luglio 2023 registra un'intensità massima di 4°C ed un'estensione dell'area che raggiunge questi picchi più estesa di quella del periodo di analisi precedente.

La media delle differenze di TARGET è di -1.0°C seguendo la tendenza delle altre simulazioni, con gli estremi registrati nelle stesse celle della simulazione di luglio 2022, ma con valori leggermente differenti: con la minima di -1,8°C e una massima di +3.0°C.

La comparazione delle due carte evidenzia nuovamente la discrepanza nell'intensità delle simulazioni dei due modelli.

Ondata di calore dal 16 al 23 agosto 2023

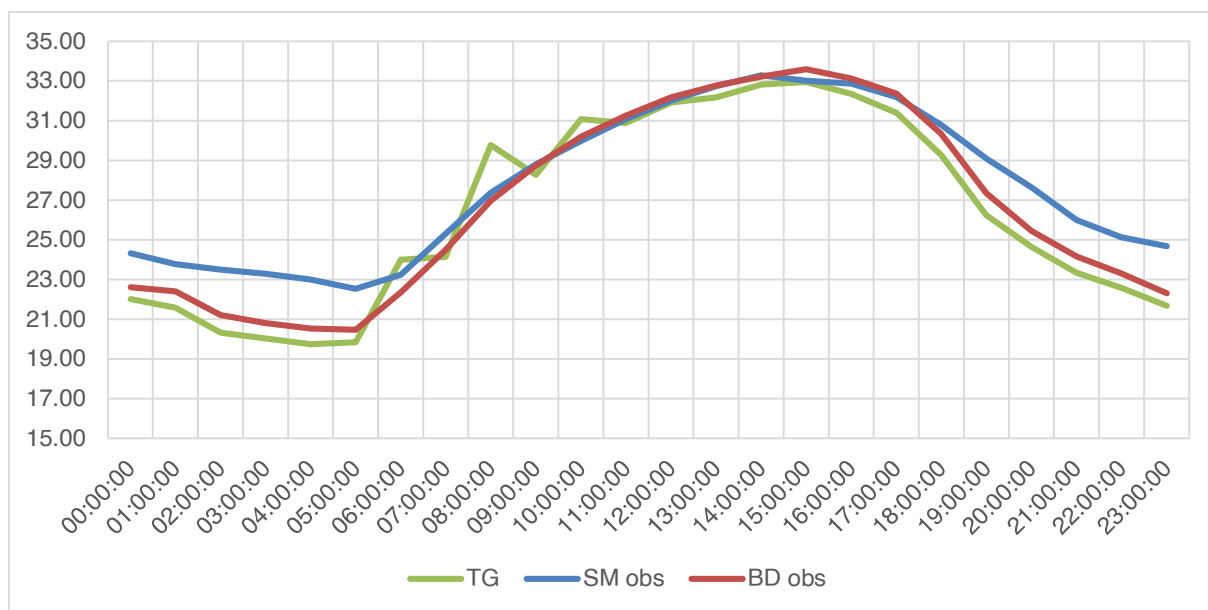
L'ultima ondata di calore analizzata è quella che va dal 16 al 23 agosto 2023. In questo caso la temperatura media massima registrata è di 33.3 °C alle 14:00 del pomeriggio e la media minima registrata è di 22.5 C° alle 05:00 del mattino. Anche in quest'ultimo caso il fenomeno dell'Isola di Calore è subito visibile sia numericamente (Tabella 13) che graficamente (Grafico 7). Esso, infatti, mostra come dalle ore 00:00 alle ore 06:00 e poi a partire dalle ore 19:00 si crei un distacco tra le temperature urbane e quelle rurali.

Analizzando, invece, l'andamento delle temperature modulate da TARGET è evidente che vi sia ancora una volta difficoltà nel rappresentare tale fenomeno. Inoltre, è possibile notare dei picchi "anomali" alle 06:00 e alle 08:00, dei valori calcolati dal tool.

Tabella 13 - Temperatura media oraria per il periodo di agosto 2023: differenza tra la media delle Stazioni meteo (SM) e la stazioni meteo di Bauducchi

Ora	SM obs	BD obs	Diff.: SM- BD.
00:00:00	24.32	22.6	1.7
01:00:00	23.76	22.4	1.4
02:00:00	23.50	21.2	2.3
03:00:00	23.28	20.8	2.5
04:00:00	23.00	20.5	2.5
05:00:00	22.53	20.5	2.1
06:00:00	23.24	22.3	0.9
07:00:00	25.30	24.5	0.8
08:00:00	27.36	27.0	0.4
09:00:00	28.80	28.7	0.1
10:00:00	29.97	30.2	-0.2
11:00:00	31.07	31.2	-0.2
12:00:00	32.00	32.2	-0.2
13:00:00	32.74	32.8	0.0
14:00:00	33.29	33.2	0.1
15:00:00	33.01	33.6	-0.6
16:00:00	32.86	33.1	-0.3
17:00:00	32.19	32.4	-0.2
18:00:00	30.78	30.3	0.5
19:00:00	29.09	27.3	1.7
20:00:00	27.65	25.4	2.2
21:00:00	25.99	24.2	1.8
22:00:00	25.13	23.3	1.8
23:00:00	24.67	22.3	2.4

Grafico 7 - Confronto tra l'andamento della temperatura media delle Stazioni meteo (SM), quella di TARGET (TG) e quella di Bauducchi per il periodo di agosto 2023



Lo strumento di simulazione mostra, come nei casi precedenti, una forte difficoltà a stimare i dati reali in ambito urbano, continuando a sottostimare i dati

Dalla Tabella 14, è chiaramente visibile la sottostima delle ore notturne sia in confronto ai dati ARPA che quelli osservati, con un picco di distacco massimo pari a -5.0 °C alle 23:00, rispetto ai dati dell'ente. Al contrario si nota come il modello sovrastimi i dati intorno alle 08:00 del mattino.

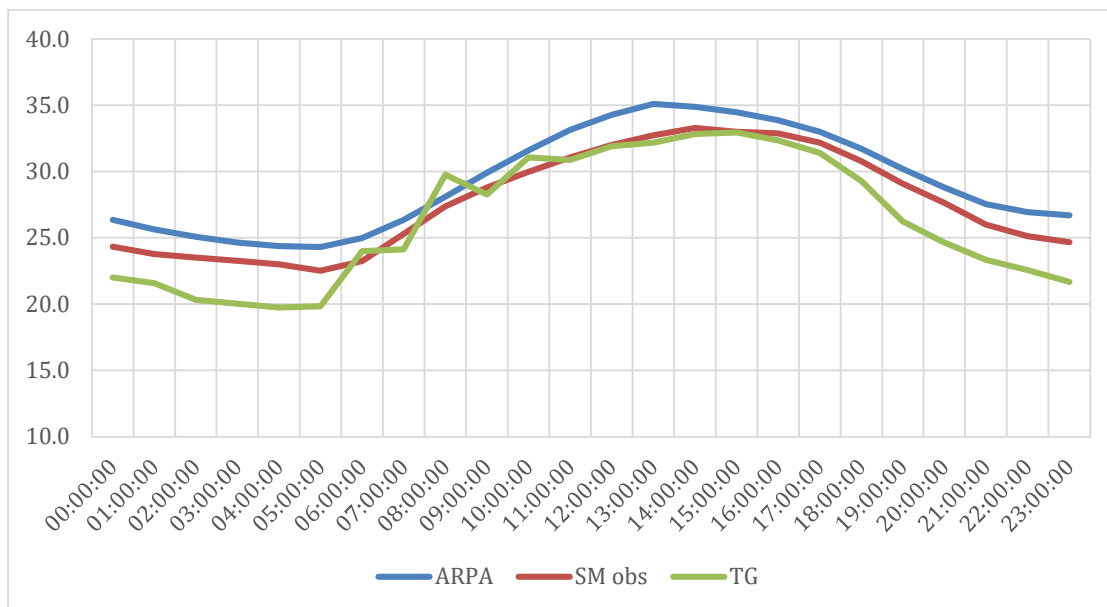
In modo analogo agli esempi precedenti, i dati ARPA e i dati osservati (grafico 8) hanno un andamento regolare, con l'ente che è in grado di riprodurre temperature più alte ma con stesso andamento rispetto ai dati SM. Mentre i dati di TARGET sono in grado di riprodurre fedelmente le temperature diurne, eccetto per l'anomalia dei picchi già citati, ma non riesce a far emergere il fenomeno delle isole attraverso le sue stime, riportando invece un raffreddamento della città.

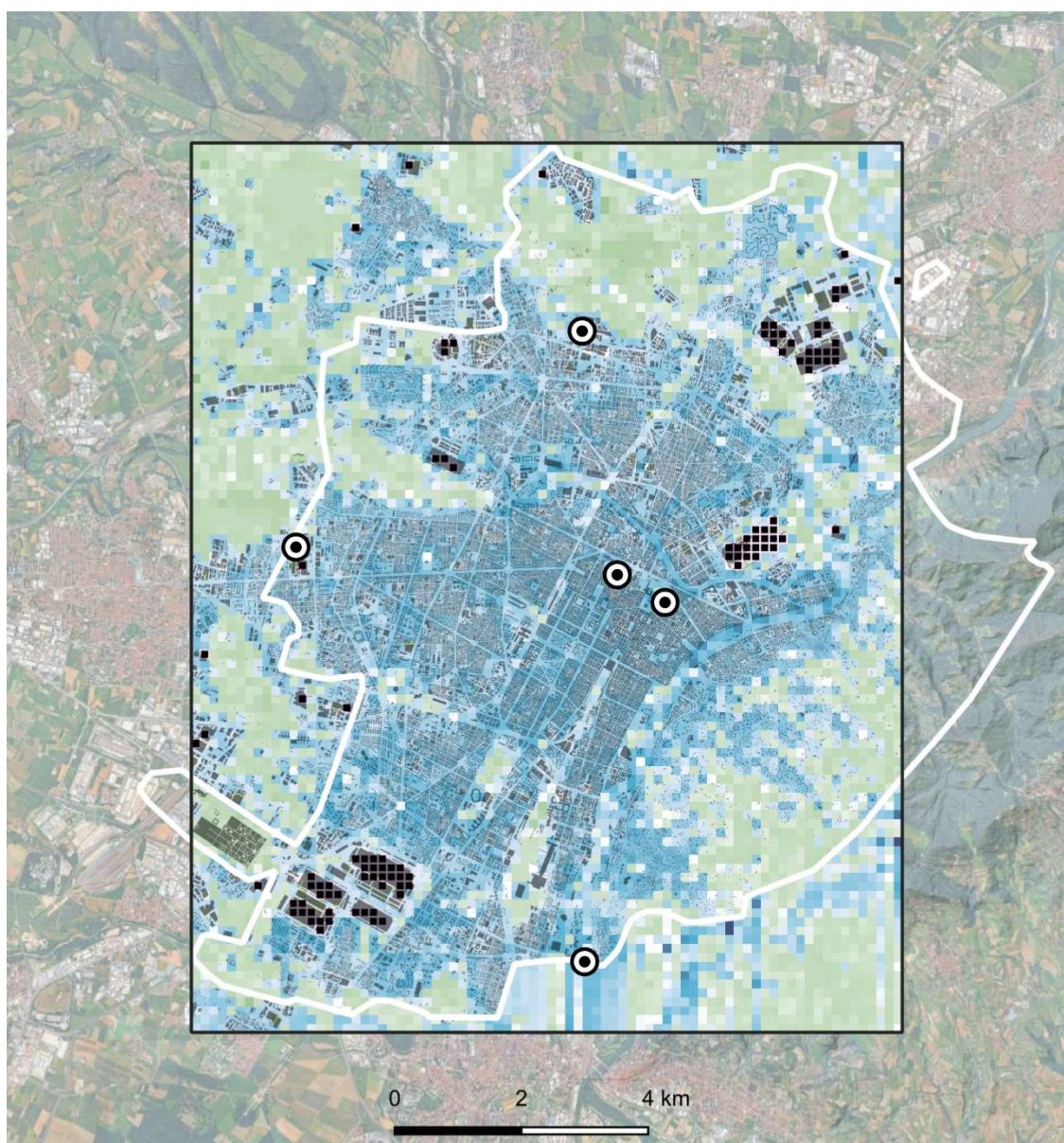
Tabella 14 - Valori medi orari di temperatura registrati dalle Stazioni Meteo (SM obs), da TARGET e da ARPA per il periodo di agosto 2023

Ora	TG	ARPA	SM obs	TG-ARPA	TG - SM Obs
00:00:00	22.0	26.3	24.3	-4.3	-2.3
01:00:00	21.6	25.6	23.8	-4.1	-2.2
02:00:00	20.3	25.1	23.5	-4.8	-3.2
03:00:00	20.0	24.6	23.3	-4.6	-3.2
04:00:00	19.8	24.4	23.0	-4.6	-3.2
05:00:00	19.8	24.3	22.5	-4.5	-2.7
06:00:00	24.0	25.0	23.2	-1.0	0.8
07:00:00	24.1	26.3	25.3	-2.2	-1.2
08:00:00	29.8	28.1	27.4	1.7	2.4
09:00:00	28.3	29.9	28.8	-1.6	-0.5
10:00:00	31.1	31.6	30.0	-0.5	1.1

11:00:00	30.9	33.1	31.1	-2.3	-0.2
12:00:00	31.9	34.3	32.0	-2.4	-0.1
13:00:00	32.2	35.1	32.7	-2.9	-0.6
14:00:00	32.8	34.9	33.3	-2.1	-0.5
15:00:00	32.9	34.5	33.0	-1.5	-0.1
16:00:00	32.3	33.9	32.9	-1.5	-0.5
17:00:00	31.4	33.0	32.2	-1.6	-0.8
18:00:00	29.3	31.7	30.8	-2.4	-1.5
19:00:00	26.2	30.2	29.1	-4.0	-2.9
20:00:00	24.6	28.8	27.6	-4.2	-3.0
21:00:00	23.3	27.5	26.0	-4.2	-2.7
22:00:00	22.6	26.9	25.1	-4.4	-2.6
23:00:00	21.7	26.7	24.7	-5.0	-3.0

Grafico 8 - Confronto tra l'andamento della temperatura media oraria delle Stazioni meteo (SM_obs), quella di TARGET (TG) e quella ARPA per il periodo di agosto 2023





Legenda

16-23 agosto 2023
media diurna



 Null Data

Elementi di base

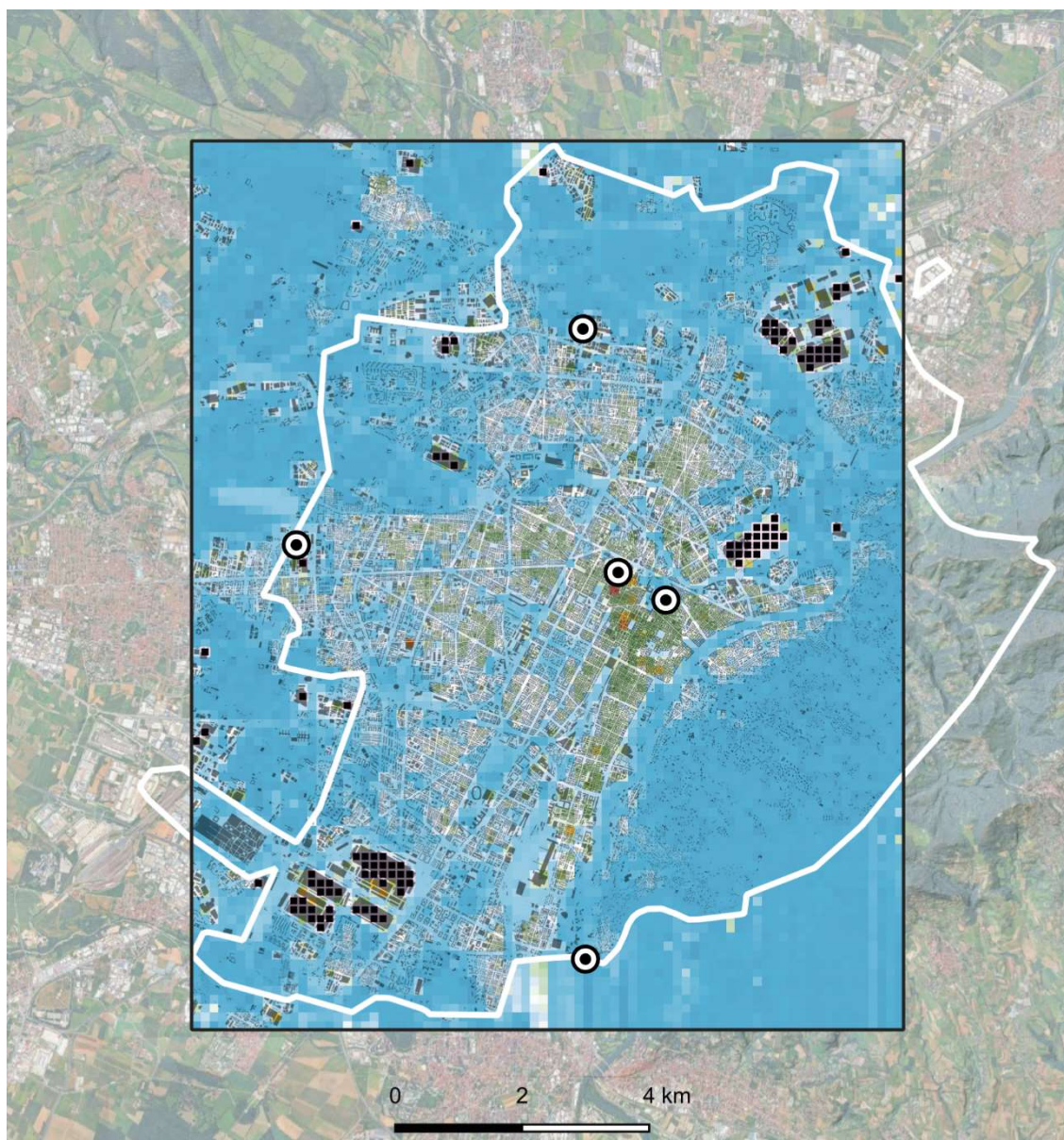
 Edificato BDTRE2023

 Area di studio

 Confini comunali Torino

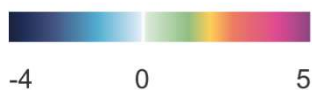
 Stazioni meteorologiche

Figura 39 -Simulazione TARGET dal 16 al 23 agosto 2023 per il periodo diurno



Legenda

16-23 agosto 2023
media notturna



Null Data

Elementi di base

Edificato BDTRE2023

Area di studio

Confini comunali Torino

Stazioni meteorologiche

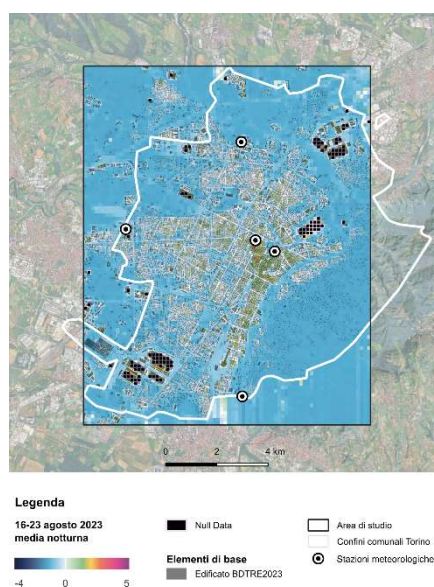
Figura 40 - Simulazione TARGET dal 16 al 23 agosto 2023 per il periodo notturno

La rappresentazione grafica delle carte, in questo caso, presenta un andamento differente dalle altre simulazioni.

In particolare, per il periodo diurno, non emergono differenze positive per le aree che costeggiano il fiume Po. Al contrario delle altre simulazioni, sono i contesti rurali esterni alla città densamente costruita che registrano le differenze maggiori con Bauducchi. Questo risulta nella realtà un'alternativa poco probabile, proprio per la natura del fenomeno e per le temperature che ne hanno mostrato numericamente la presenza (Tabella 13 sopra riportata).

La carta della notte, al contrario, si comporta in linea con le simulazioni dei periodi precedenti, dove l'area di San Salvario e del centro storico, emergono rispetto al resto del costruito. Oltre a queste, altre celle posizionate in quartieri più esterni si presentano come punti caldi isolati nei loro contesti.

Confronto con le carte e valori ARPA



riportata - Simulazione TARGET dal 16 al 23 agosto 2023
per il periodo notturno

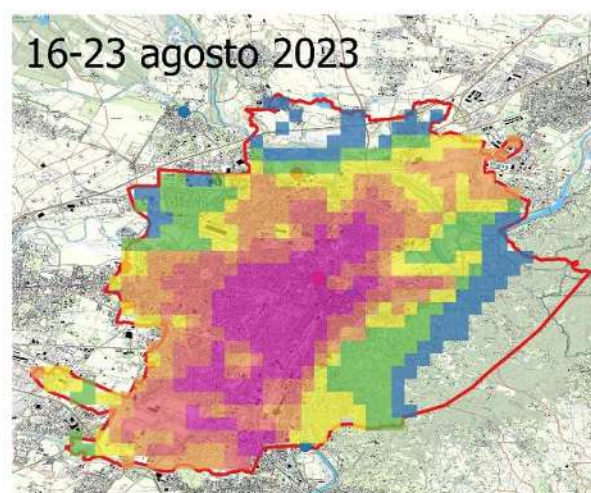
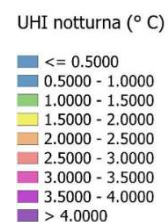


Figura 41 - Carta ARPA sull'intensità
dell'Isola di Calore dal 16 al 23
agosto 2023 per il periodo notturno
(ARPA Piemonte, 2024, fig. 12)



La mappa dell'intensità dell'Isola di Calore prodotta dall'ente raggiunge valori fino a +3.5°C.

Anche TARGET stima un massimo di +2.8°C (Sempre per la cella 4751) ma la distribuzione è nuovamente più contenuta rispetto all'ARPA. Infatti, la grandezza dell'isola rimane marginale rispetto al contesto urbano.

Il minimo che registra è di -1.7°C (cella 719), con una media per l'area di studio di -0.9°C rispetto al riferimento rurale.

Resoconto Conclusivo:

Le elaborazioni prodotte con TARGET e confrontate con quelle di ARPA restituiscono una rappresentazione dell'intensità delle isole di calore diversa.

L'ente rappresenta l'Isola di Calore sempre con una concentrazione delle maggiori temperature nel baricentro della città, andando a diminuire gradualmente le temperature verso l'esterno dei confini. Il modello realizzato, al contrario, ha un andamento più eterogeneo, sia tra due periodi diversi, dove sembra che stessi usi del suolo abbiano restituzioni differenti, che tra punti limitrofi collocati nello stesso contesto morfologico.

Entrando nel merito delle rappresentazioni prodotte con TARGET si evidenzia che la concentrazione delle celle con una temperatura maggiore rispetto a Bauducchi è sempre coincidente con l'area dei quartieri di San Salvario e del centro storico cittadino.

Negli altri quartieri non vengono mostrati discostamenti o concentrazioni ugualmente forti, come ad esempio quelli che ci si aspetterebbe per le aree densamente edificate di Mirafiori.

Per gli assi viari, in particolare, la temperatura che si individua è sempre uguale o tendente allo zero. Per la loro caratteristica composizione di asfalto e cemento, che afferma Mohajerani, A. et al. (2017) rappresenta la principale causa del maggiore calore in città dettato dal loro colore scuro e alla loro alta densità, si dovrebbero comportare diversamente.

Inoltre, vengono individuate differenti anomalie nella distribuzione della temperatura da parte del plug-in, specialmente per le ore diurne dei mesi di giugno 2022 e agosto 2023. Nel primo caso le aree verdi, specialmente quelle periferiche, vengono individuate come aree ancora più calde rispetto al resto del contesto. Nel caso di agosto, invece, non viene individuata nessuna temperatura maggiore rispetto al contesto esterno.

5.2. Casi studio: Correlazione tra i valori simulati e i valori mediati

A seguito dell'analisi quantitativa e qualitativa condotta sugli interi intervalli temporali delle ondate di calore, questa sezione si pone l'obiettivo di approfondire il comportamento del modello concentrandosi sulle singole date specifiche, corrispondenti alle giornate assunte come caso studio e già analizzate dall'ARPA: 9 giugno 2022, 21 luglio 2022, 15 luglio 2023 e 16 agosto 2023. L'analisi sarà strutturata in una prima fase di confronto e analisi delle mappe elaborate da TARGET e, successivamente, in una comparazione degli andamenti termici: prima si confronterà TARGET con il riferimento rurale; successivamente, si compareranno i valori simulati con quelli predetti dall'ARPA e con quelli reali. I valori di riferimento per TARGET corrispondono alla media dei valori simulati per le celle in cui ricadono le stazioni meteo.

Caso studio: 9 giugno 2022

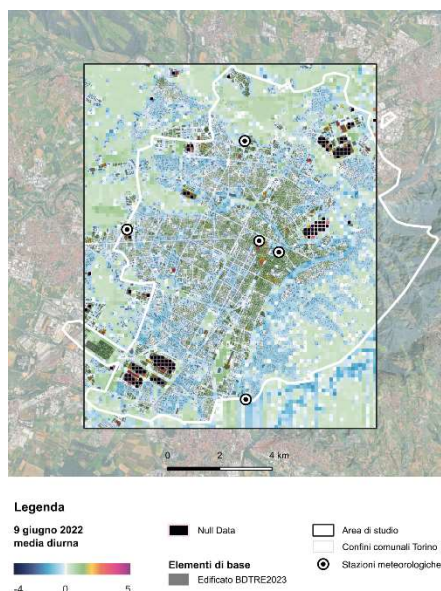


Figura 42 - Simulazione per periodo diurno del 9 giugno 2022

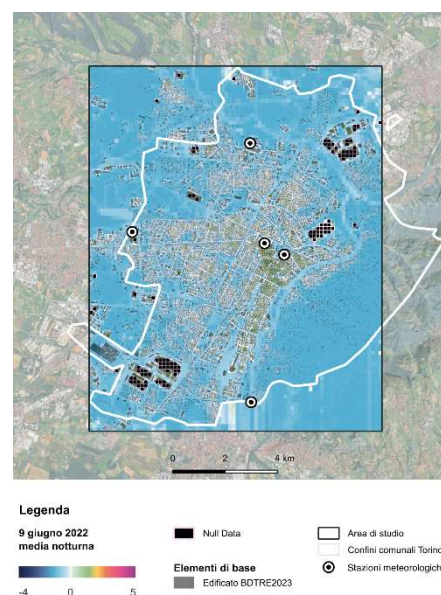


Figura 43 - Simulazione per periodo notturno del 9 giugno 2022

Nella giornata del 9 giugno la concentrazione di temperatura nella parte a ovest del fiume, non mostra dinamiche estremamente diverse rispetto a quelle già descritte per il periodo intero. Anche qui si evidenziano anomalie verso l'esterno del costruito, per il periodo diurno, dove si registrano temperature di circa un grado superiore rispetto sia alla stazione di riferimento che rispetto anche ad alcune aree interne del costruito della città. Dalla cartografia si può notare come il tool sia in grado di rappresentare correttamente le aree dei parchi all'interno del contesto edificato, come il parco del grattacielo San Paolo, o quello dei giardini reali, visibili dai colori più freddi rispetto al contesto in cui ricadono.

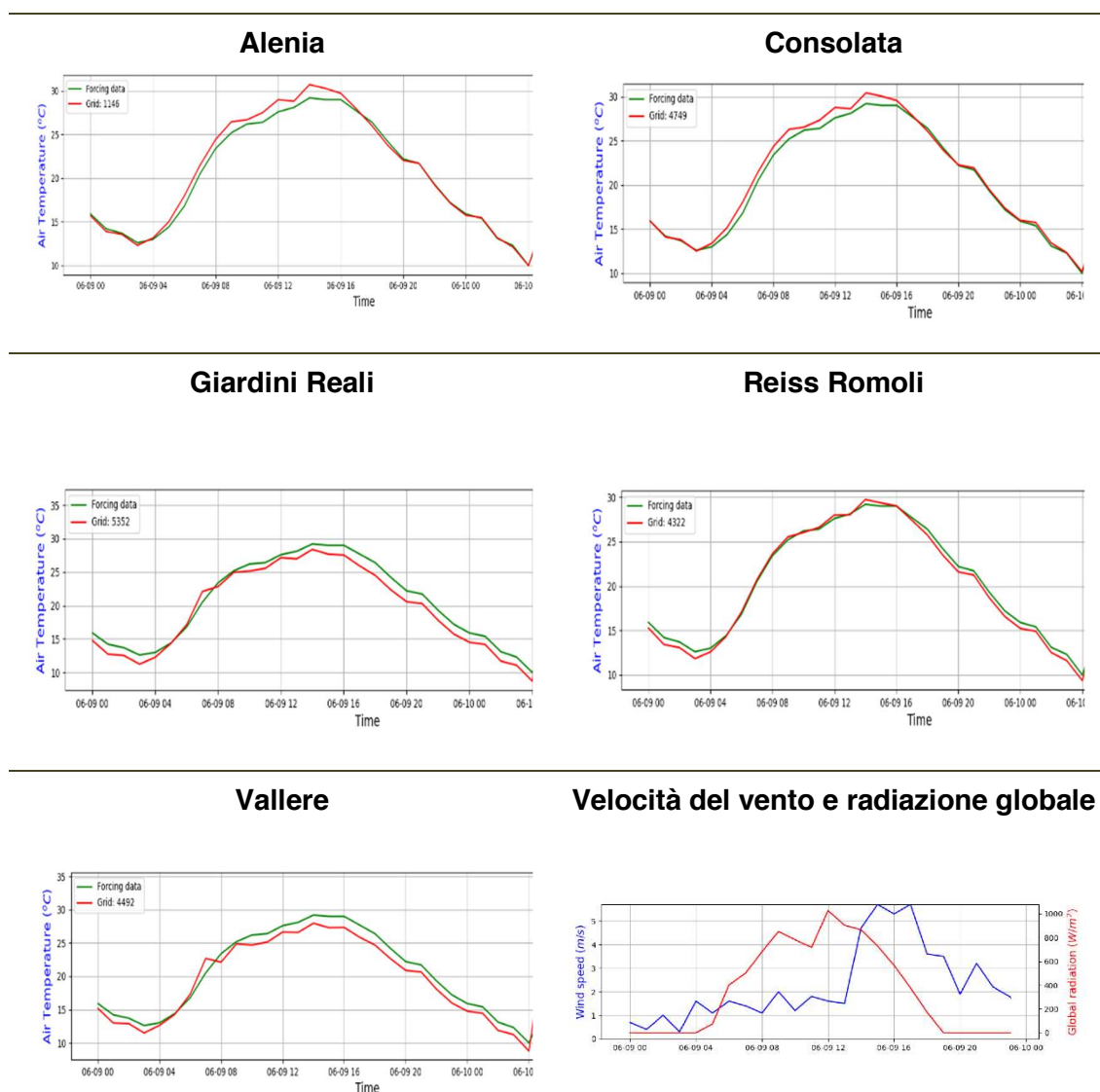
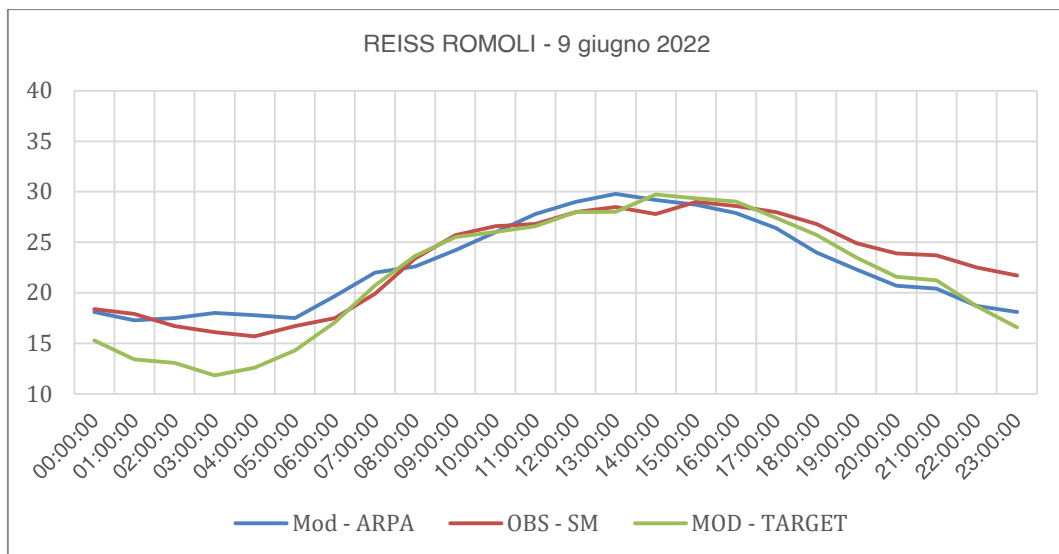
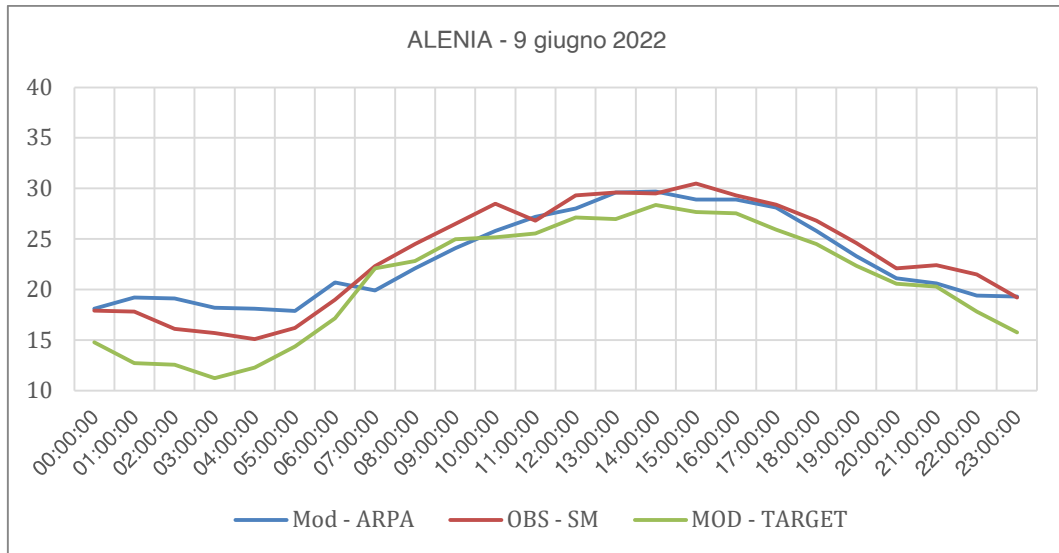


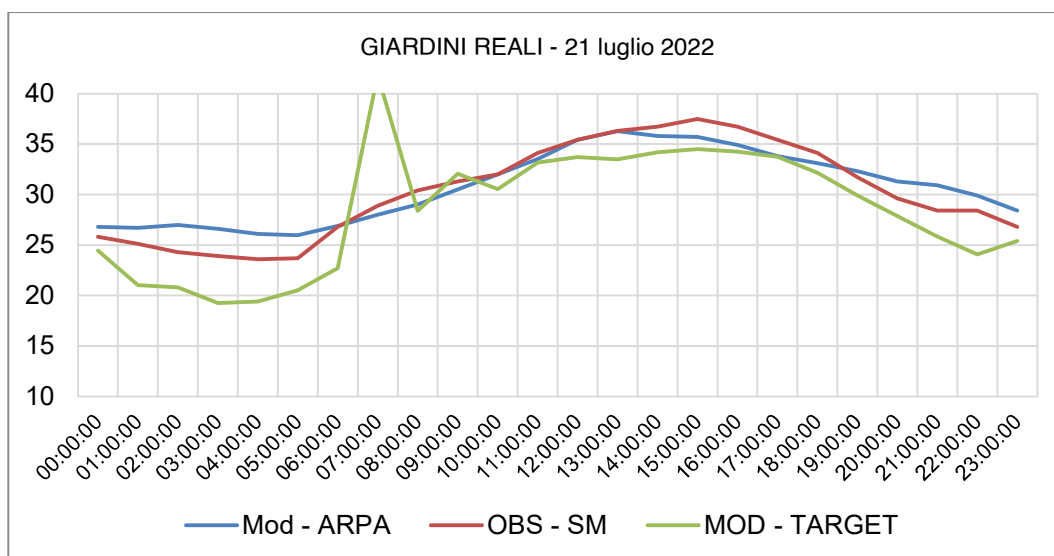
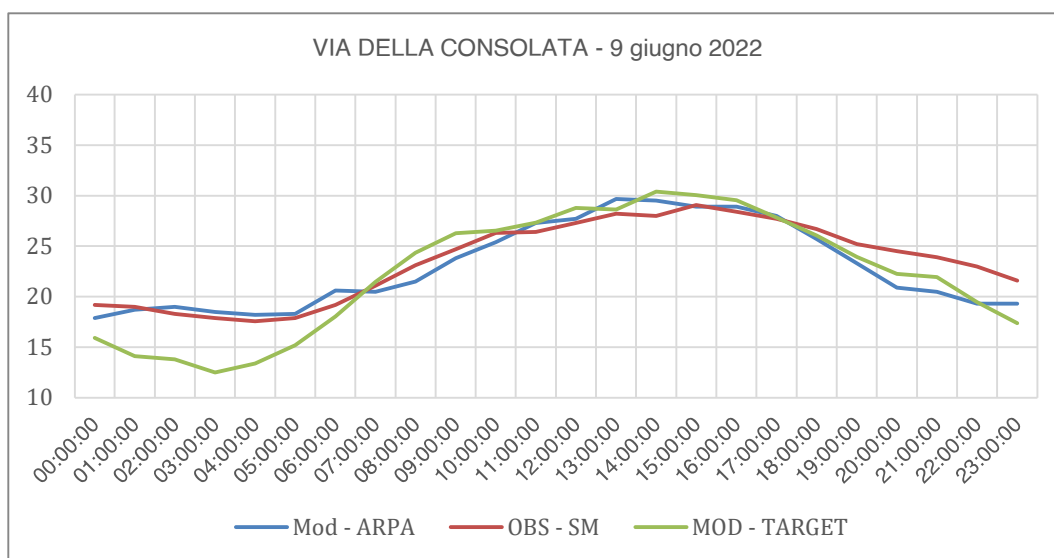
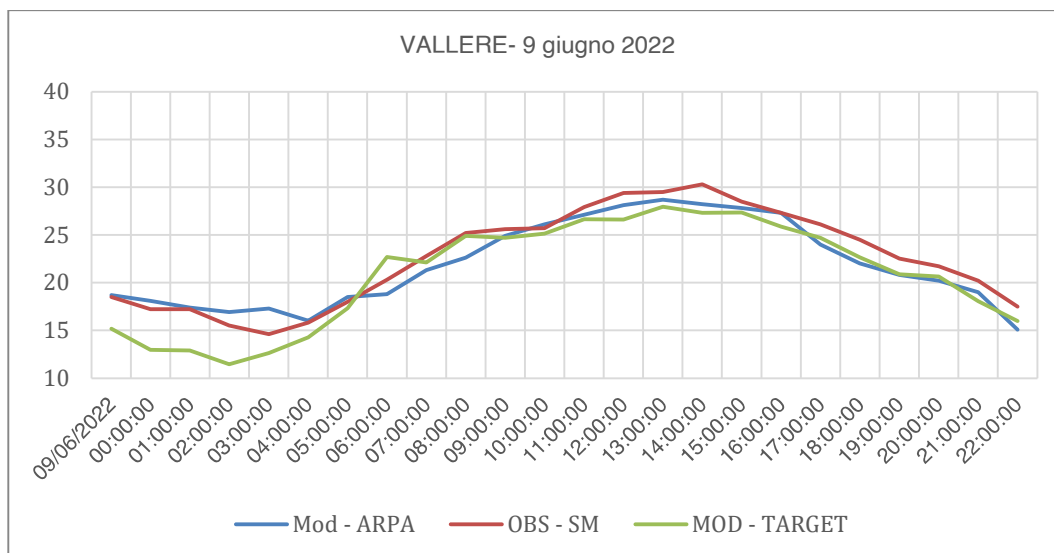
Tabella 15 - Grafici delle temperature osservate (Bauducchi) e simulate (TARGET) con andamento del vento e della radiazione globale per il 9 giugno 2022.

I grafici riportati provengono direttamente dall'output del post processore *TARGET: analyzer* della barra di Stato del software. Questi permettono di mettere a confronto i dati osservati dalla stazione Bauducchi e i dati dedotti con TARGET; al contempo permette di comprenderli insieme all'andamento della velocità del vento e della radiazione che caratterizzano il giorno preso in esame. Per ognuno di questi la linea verde mostrerà i dati della stazione di riferimento, mentre quella rossa individua le temperature simulate.

L'andamento delle temperature per tutte le stazioni meteo segue generalmente quello di Bauducchi. Le stazioni di Alenia, Consolata e Reiss Romoli, in particolare, sembrano avere una sovrastima, o meglio, mostrano un andamento che eccede quello registrato dalla stazione meteo di riferimento. Al contrario, il dato dei Giardini Reali e di Vallere differisce in negativo, scostandosi visivamente di qualche decimo di grado. Se paragonate al grafico che riporta l'andamento del vento (linea blu) e all'andamento della radiazione solare (linea rossa) è evidente che i picchi di temperatura, per entrambi i casi, sono registrati quando si presenta il massimo della radiazione e del vento. Questo in particolare, si verifica immediatamente dopo l'abbassamento della radiazione: fenomeno

molto comune, causato dall'inversione termica che si verifica quando il suolo inizia a ricevere gradualmente meno energia, interrompendo il rimescolamento verticale tra gli strati dell'atmosfera (Oke, 1987; Stull, 1988)





Grafici 1 - Confronto per ogni stazione meteo delle temperature osservate reali (obs - SM) e simulate da TARGET e ARPA per il 9 giugno 2022

Nei grafici riportati, dove per ogni stazione meteorologica sono riportate le temperature rilevate e quelle simulate dai due modelli presi a confronto, si presentano andamenti non completamente omogenei. L'analisi generale dei grafici evidenzia che, per il periodo notturno, Target è la simulazione fra le due che sottostima nettamente i valori reali, mentre Arpa sembra sovrastimarli, però registrando un valore assoluto più contenuto rispetto alla stima negativa di Target. Infatti, anche le differenze medie con i valori reali mostrano sempre trend fortemente negativi: Alenia -2.75°C, Giardini Reali -3.31°C, Reiss Romoli - 3.60°C, Vallere - 2,69°C e Via della Consolata - 3.80°C.

Durante le ore diurne, invece, si verificano sempre andamenti differenti che sembra varino in base alla collocazione della stazione meteo, se in un'area verde o se collocata in un ambito urbano.

Tutte le simulazioni dei due modelli per la stazione meteo di Alenia risultano sovrastimare i valori diurni in modo importante, dove però Arpa (+0.99°C) riesce mediamente a tenerli più contenuti rispetto a Target (+1.59°C).

I Giardini Reali, che rappresentano il primo riferimento collocato in area verde, mostrano che Target sottostima nettamente i valori reali (-1.95°C), nonché quelli di Arpa (-0.79°C), che a loro volta sono più simili a quelli della stazione meteo, ma comunque non ricalcano completamente l'andamento delle temperature reali.

Per Reiss Romoli si presenta un andamento di entrambi i modelli che risulta ricalcare quasi correttamente le temperature vere registrate dalla stazione meteo; rispetto a Target (che registra -0.24°C), Arpa ha un andamento migliore, con una media di -0.07°C

Le Vallere, la seconda ed ultima stazione meteo nel contesto di un parco urbano, va a riprendere l'andamento che ha avuto anche Giardini Reali: Target e Arpa sottostimano nuovamente l'andamento e i valori delle temperature (rispettivamente -1.11°C e -1.03°C), ma senza riscontrare grandi distacchi fra i due valori con mediamente -0,8°C per il periodo in considerazione.

Via della Consolata riprende gli andamenti delle stazioni dentro il contesto costruito e registra il modello ARPA migliore con una media diurna di -0,01 °C rispetto alla stazione meteo. Target al contrario, visibilmente di discosta, e registra mediamente +0.35°C con massimi di +2.41°C e 1.59°C.

Caso studio: 21 luglio 2022

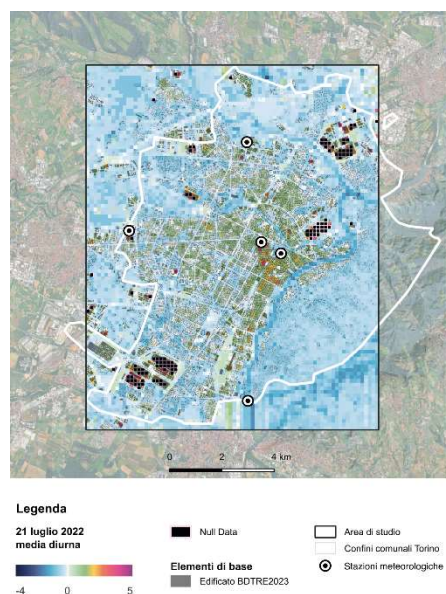


Figura 44 - Simulazione per periodo diurno del 21 luglio 2022

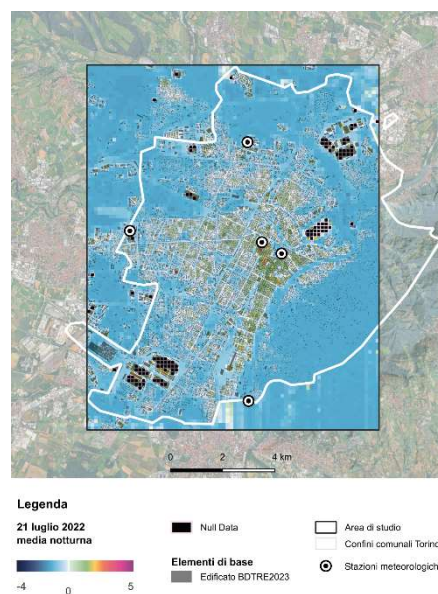


Figura 45 - Simulazione per periodo notturno del 21 luglio 2022

Le carte per il giorno 21 luglio 2022 ricalcano l'andamento rispetto alle rappresentazioni sull'intero periodo.

Durante la giornata, le aree fortemente costruite emergono in modo molto evidente ad eccezione di alcuni contesti più marginali, come nella zona ad ovest della circoscrizione 5 o Mirafiori, dove anche nelle aree urbanizzate non vi è una concentrazione di celle con valori positivi. Anche durante la notte la temperatura sembra seguire questo andamento, anche se con una presenza minore di celle con una differenza positiva.

I grafici del 21 luglio 2022 rispecchiano quelli mostrati già per il caso studio precedente. In particolare, per le stazioni meteo collocate in aree all'interno del contesto urbanizzato, le stime di target seguono ed eccedono l'andamento rispetto Bauducchi, specialmente durante le ore diurne. In quelle notturne, al contempo, il comportamento cambia in base alla stazione meteo. Le altre stazioni, cioè Vallere e Giardini Reali, collocate in contesti verdi, vengono sottostimate dal modello, e, generano un picco anomalo nella temperatura simulata per le 7:00 di mattina, dove TARGET stima una temperatura di 41.83°C per Giardini Reali e di 37.62°C per Vallere.

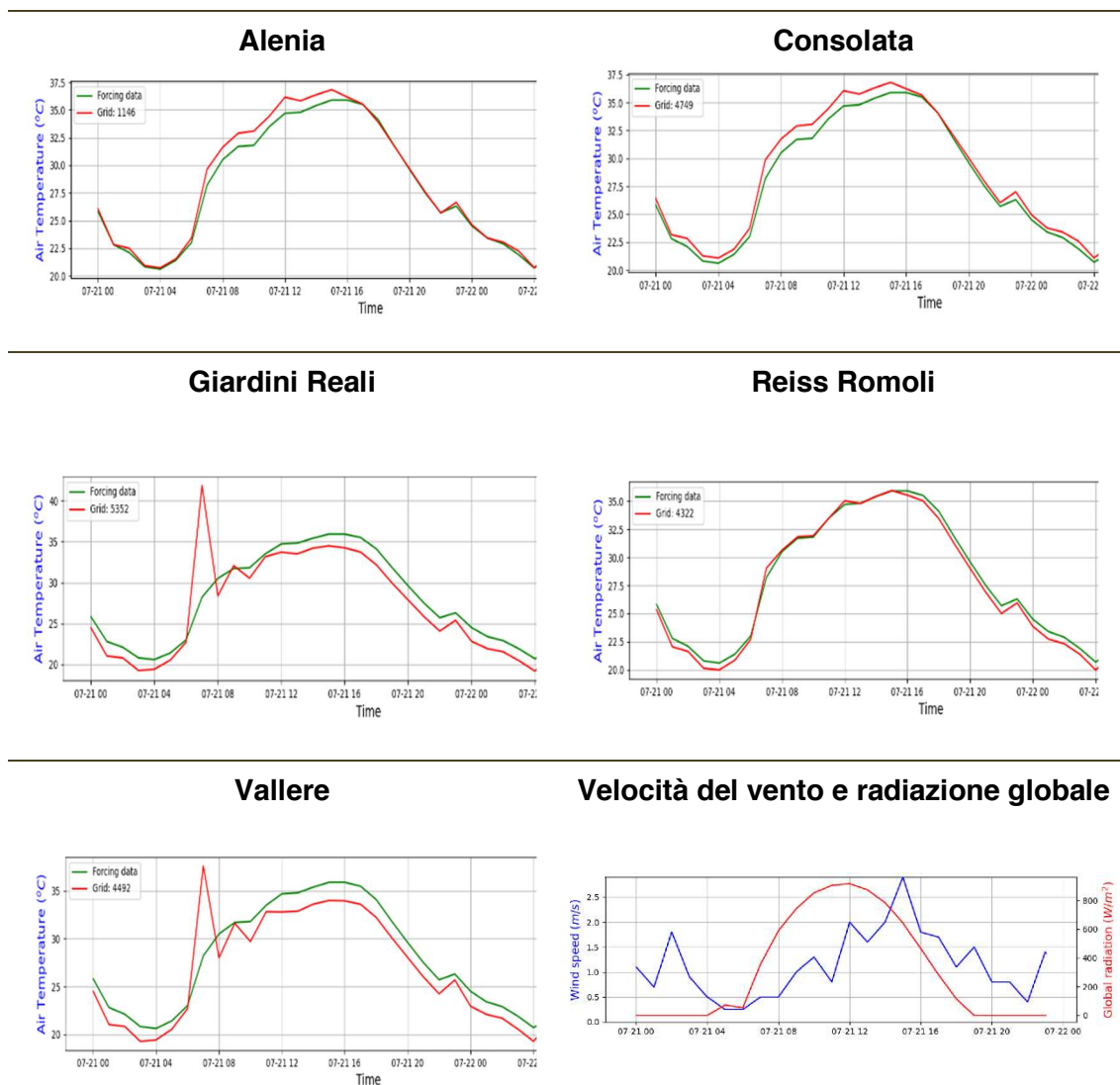
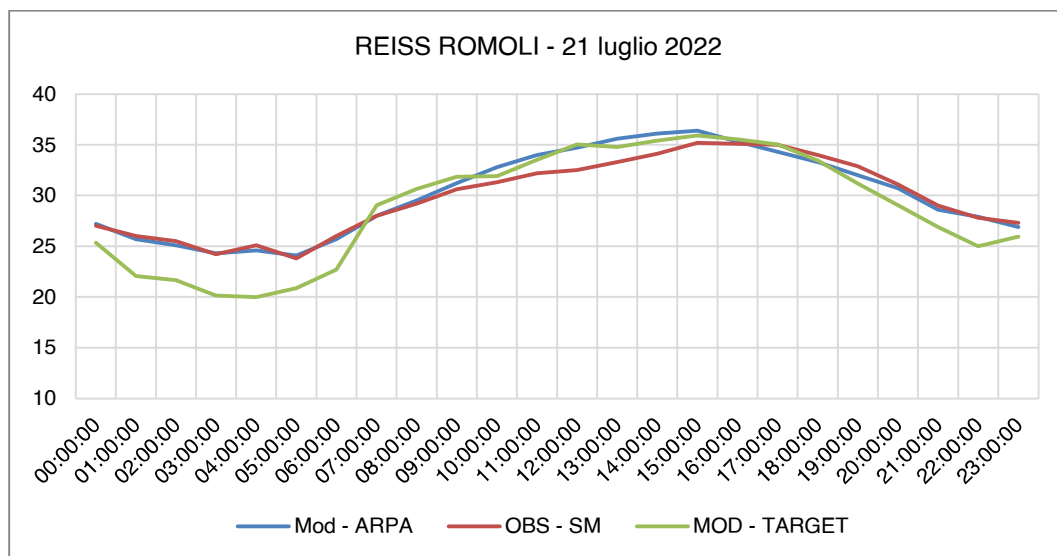
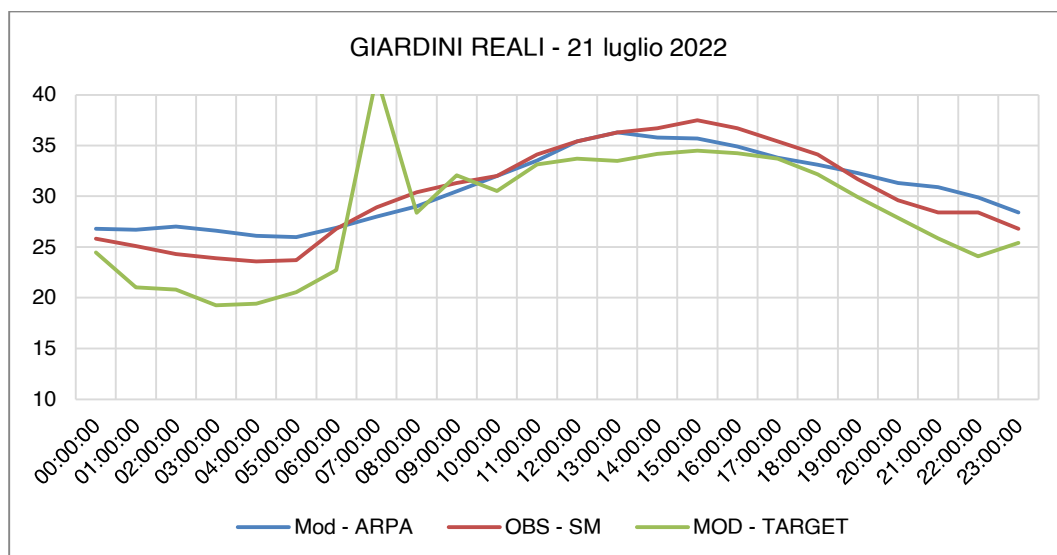
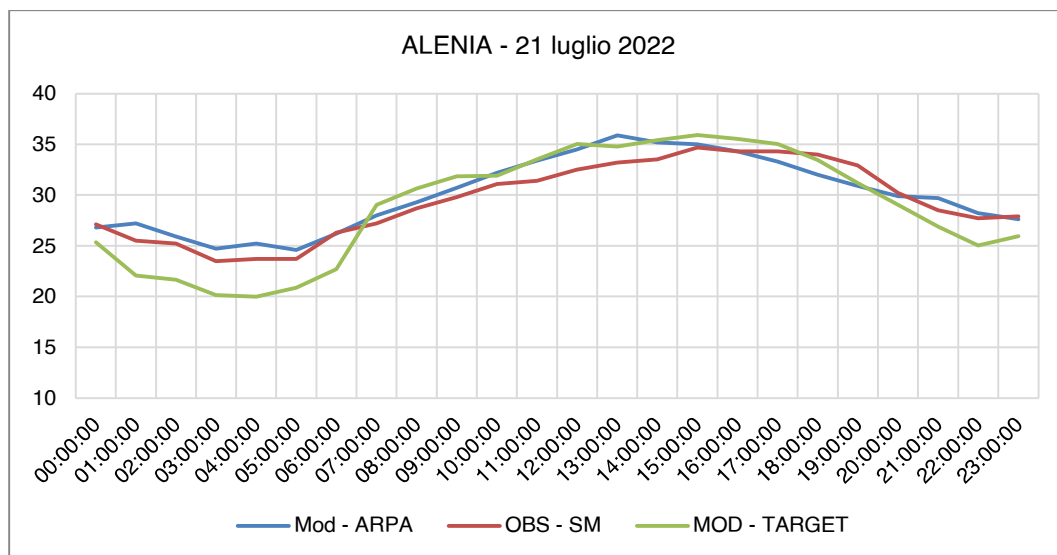
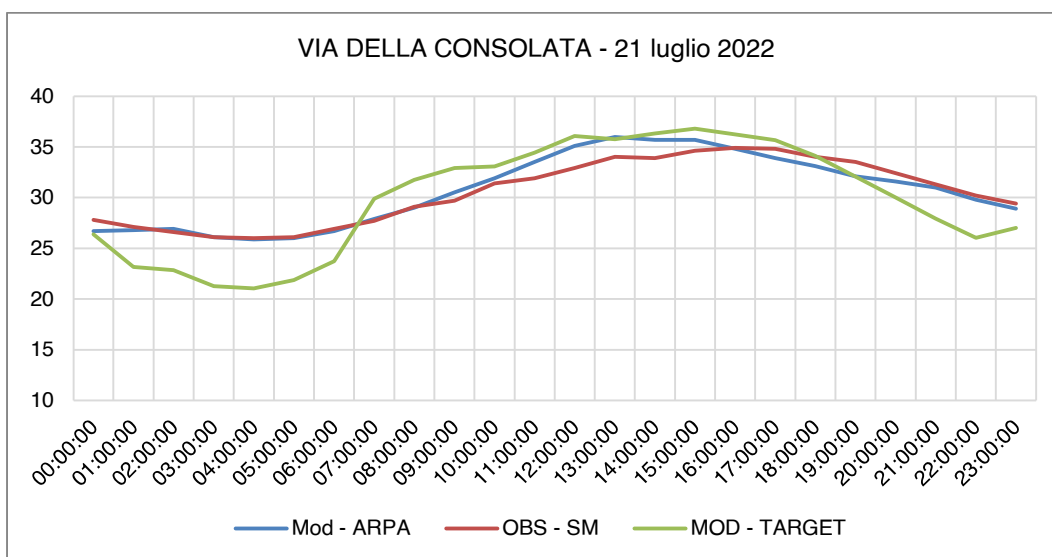
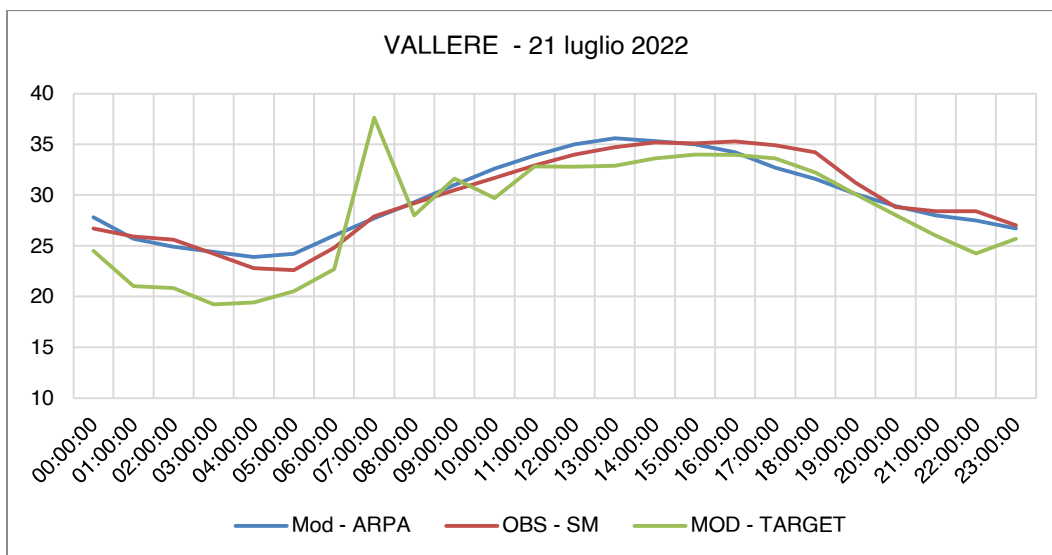


Grafico 9 - Grafici delle temperature osservate (Bauducchi) e simulate (TARGET) con andamento del vento e della radiazione globale per il 21 luglio 2022.

Confrontando i valori simulati con le temperature reali Come nel caso precedente durante le ore notturne ARPA riesce a modellare le misurazioni molto similmente a quelle reali per Reiss Romoli e Via della Consolata (rispettivamente -0.22°C e -0.36°C mediata sul periodo). Le altre stazioni presentano andamenti e valori simili: Alenia +0.66°C, Giardini Reali +1.98°C e Vallere che mediamente performa meglio delle altre, con -0.003°C. TARGET per il periodo notturno registra mediamente su tutte le stazioni, -3.07°C. Durante le ore diurne si ripresenta la correlazione tra la posizione della stazione meteo e i valori simulati, da parte di entrambi i modelli. Per Alenia (massimo di +2.52°C alle 12:00), Reiss Romoli (massimo di +2.52°C alle 12:00) e Via della Consolata (massimo di +3.21°C alle 12:00), Target sovrastima le temperature e Arpa, nonostante il suo andamento non sembra seguire quello reale specialmente per le ore centrali della giornata, riesce ad imitare meglio la temperatura reale con uno scarto di: Alenia +0.5°C, Giardini Reali -0.53°C, Reiss Romoli 0.65°C, Vellere +0.002°C e vai della consolata con +0.6°C.





Grafici 2 - Confronto per ogni stazione meteo delle temperature osservate reali (obs - SM) e simulate da TARGET e ARPA per il 21 LUGLIO 2022

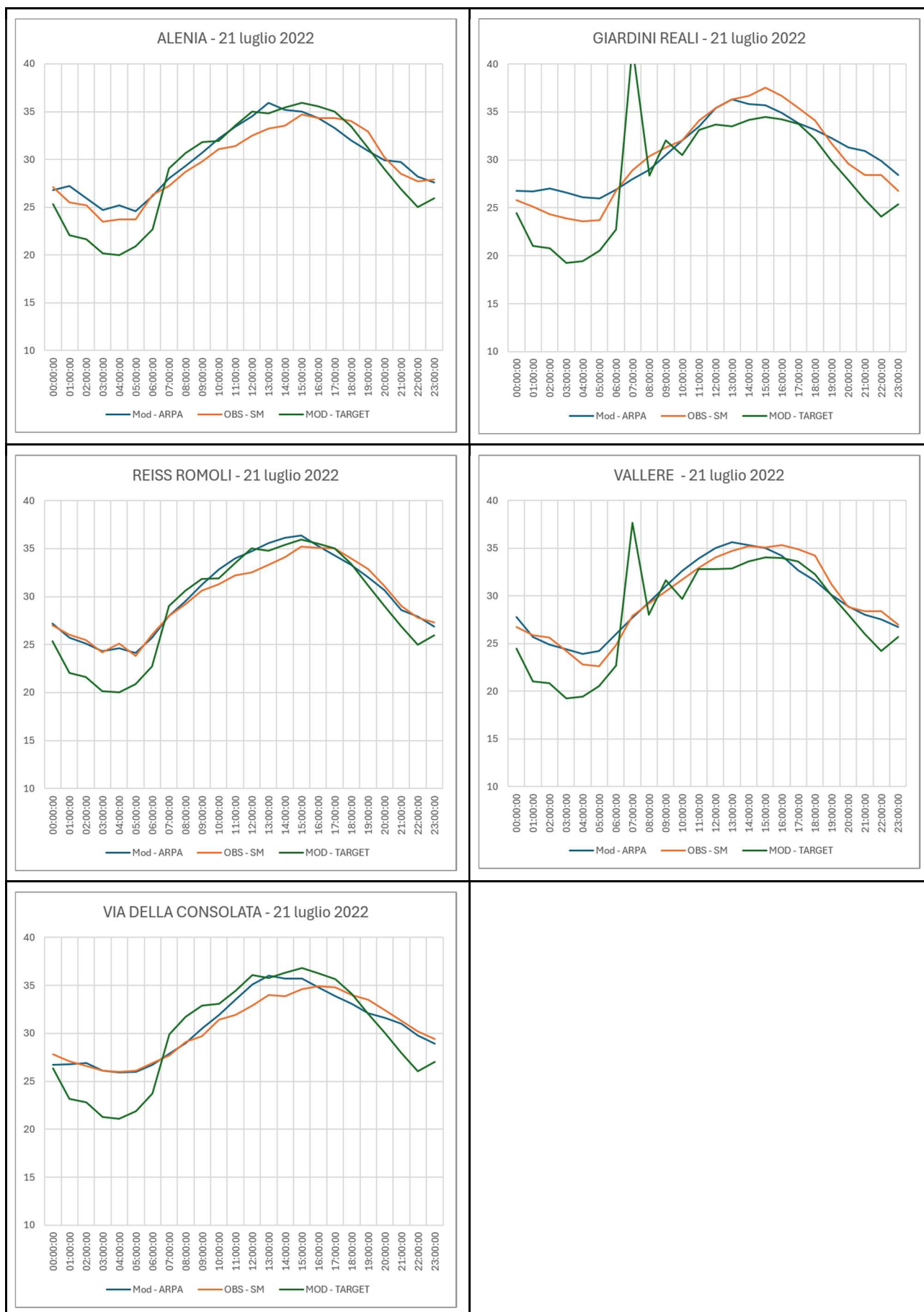


Tabella 16 - Grafici per ogni stazione meteo presa a riferimento delle temperature osservate (Bauducchi) e simulate (TARGET e ARPA) per il 21 luglio 2022

Confrontando i valori simulati con le temperature reali. Come nel caso precedente durante le ore notturne ARPA riesce a modellare le misurazioni molto similmente a quelle reali per Reiss Romoli e Via della Consolata (rispettivamente -0.2°C e -0.4°C mediata sul periodo). Le altre stazioni presentano andamenti e valori simili: Alenia $+0.7^{\circ}\text{C}$, Giardini Reali $+2.0^{\circ}\text{C}$ e Vallere che mediamente performa meglio delle altre, con -0.003°C . TARGET per il periodo notturno registra mediamente su tutte le stazioni, -3.1°C .

Durante le ore diurne si ripresenta la correlazione tra la posizione della stazione meteo e i valori simulati, da parte di entrambi i modelli.

Per Alenia (massimo di $+2.5^{\circ}\text{C}$ alle 12:00), Reiss Romoli (massimo di $+2.5^{\circ}\text{C}$ alle 12:00) e Via della Consolata (massimo di $+3.2^{\circ}\text{C}$ alle 12:00), Target sovrastima le temperature e Arpa, nonostante il suo andamento non sembra seguire quello reale specialmente per le ore centrali della giornata, riesce ad imitare meglio la temperatura reale con uno scarto di: Alenia $+0.5^{\circ}\text{C}$, Giardini Reali -0.5°C , Reiss Romoli 0.7°C , Vallere $+0.002^{\circ}\text{C}$ e via della consolata con $+0.6^{\circ}\text{C}$.

Caso studio: 15 luglio 2023

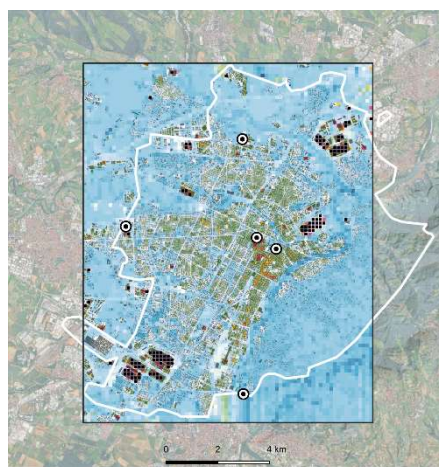


Figura 46 - Simulazione per periodo diurno del 15 luglio 2023

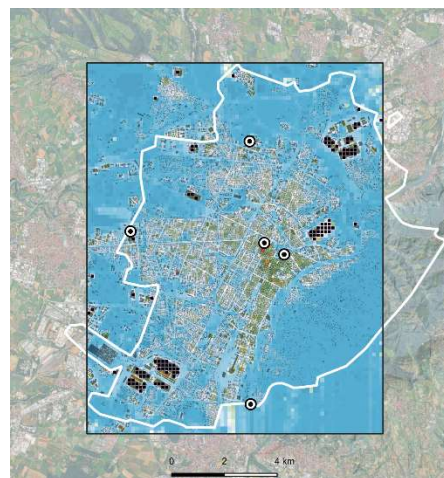
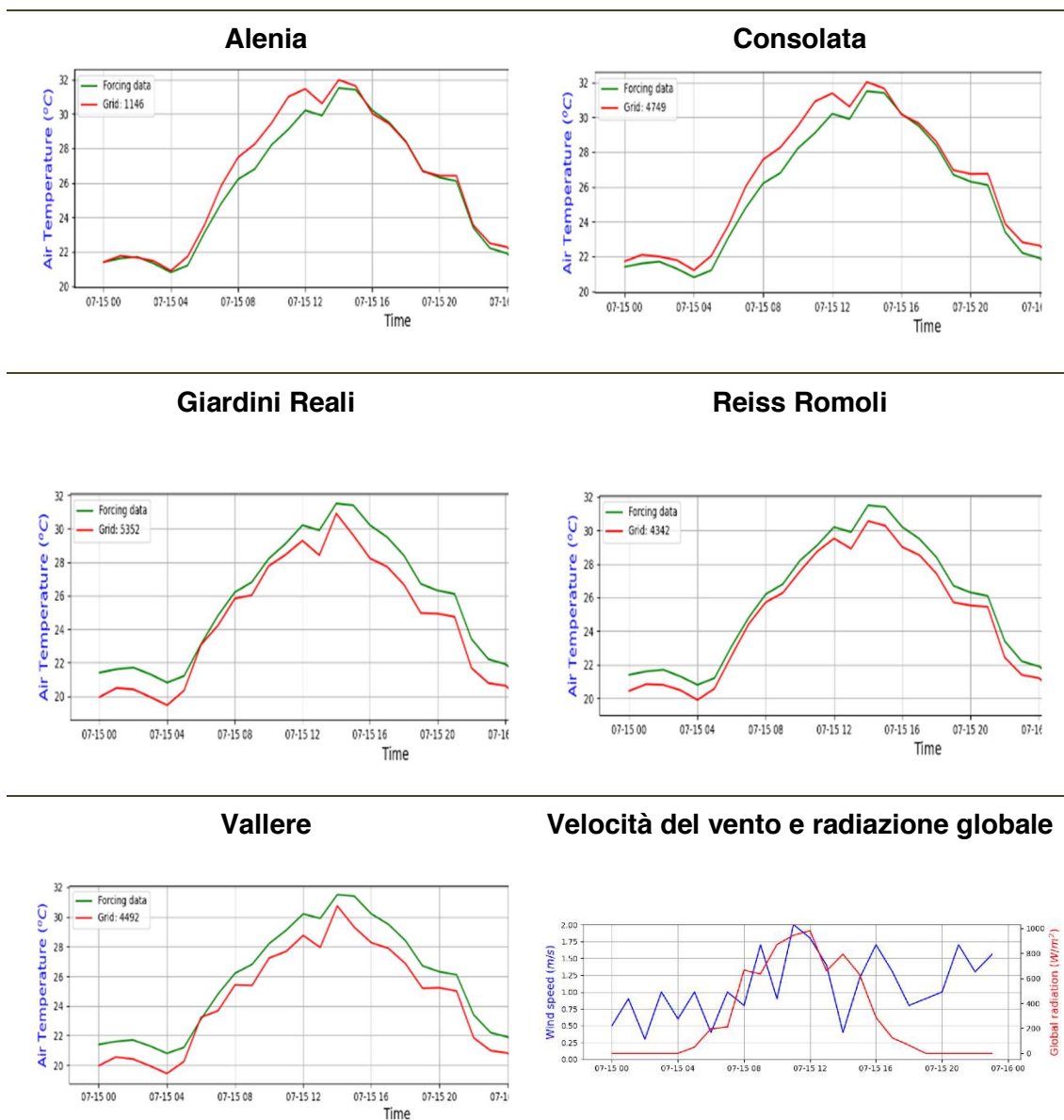


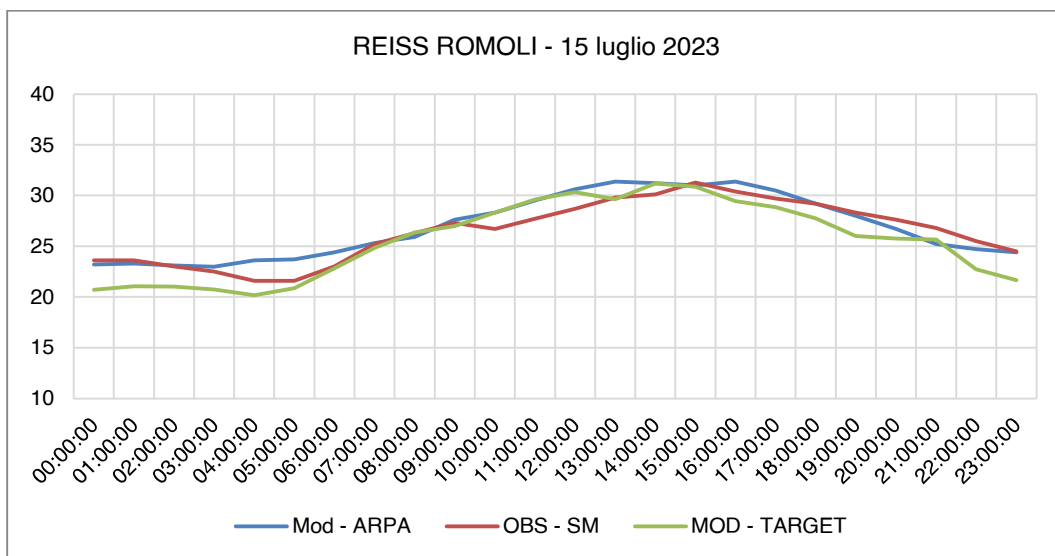
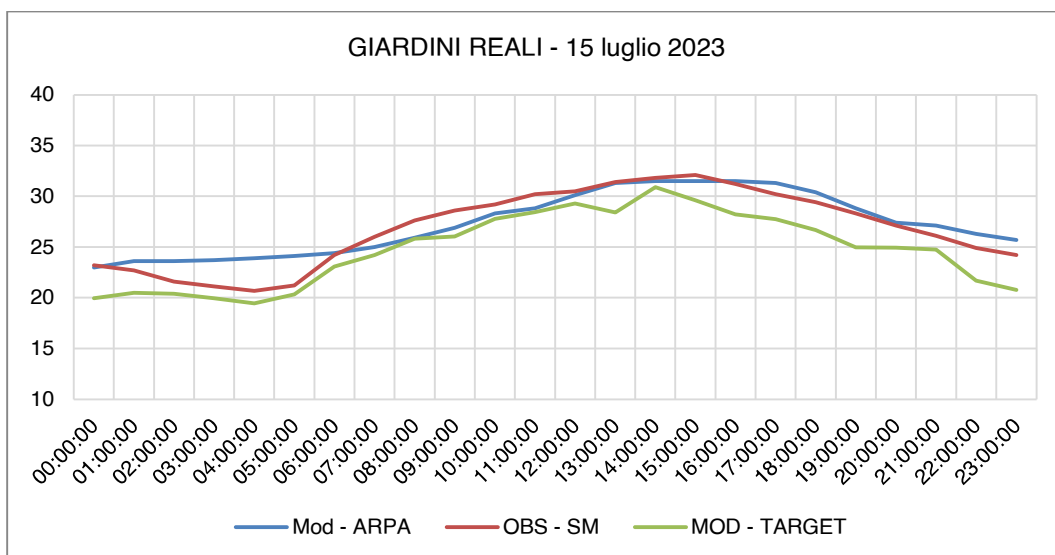
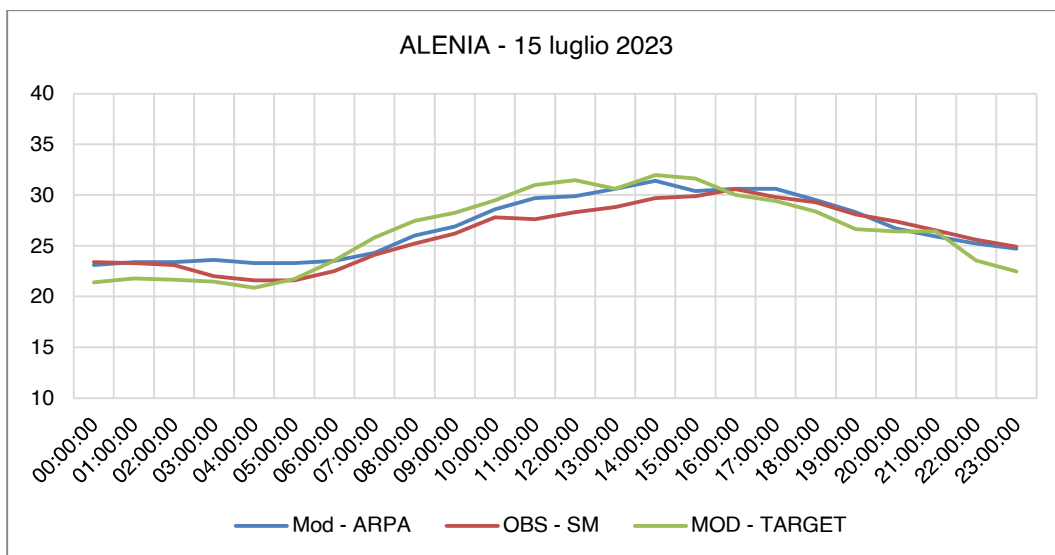
Figura 47 - Simulazione per periodo notturno del 15 luglio 2023

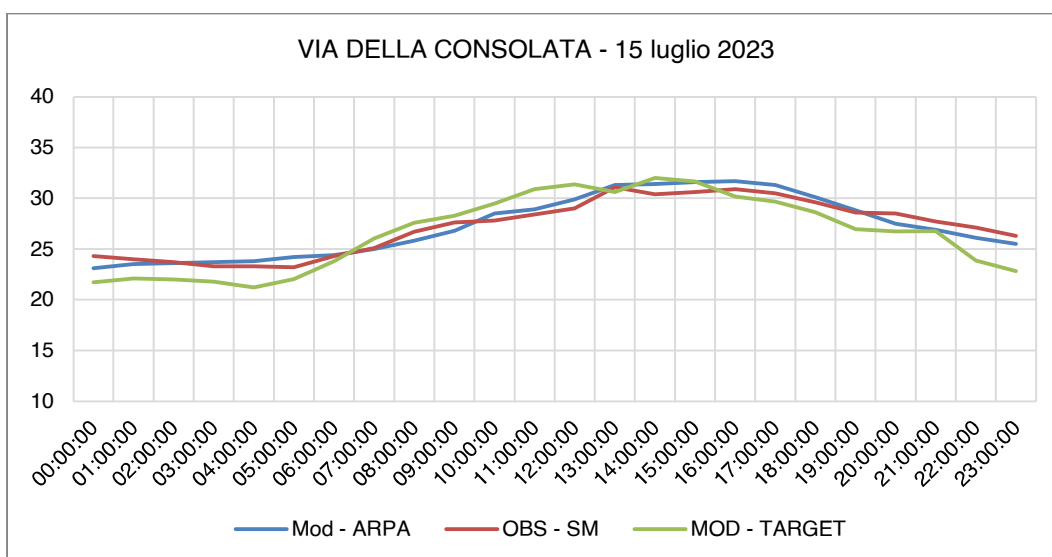
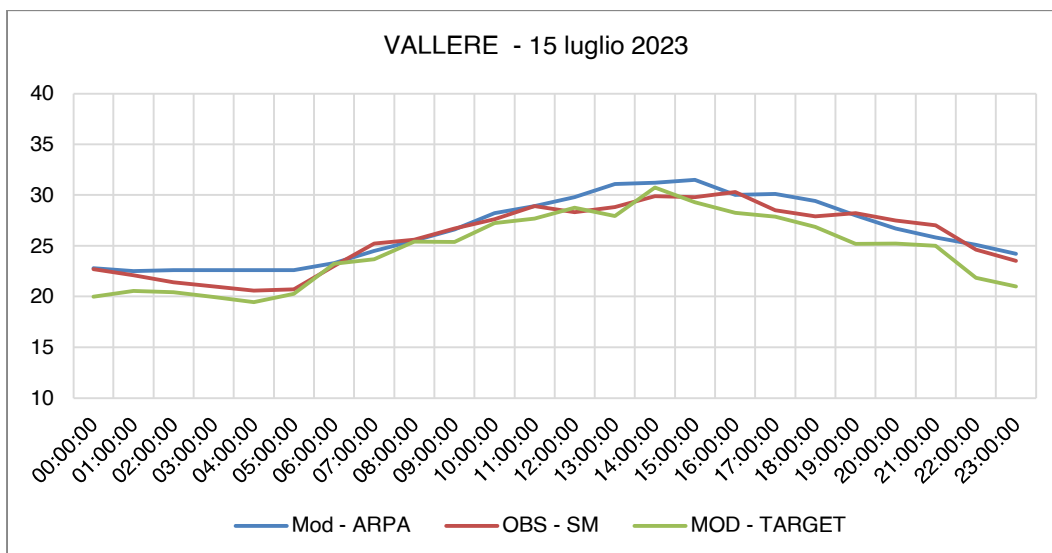
Anche il confronto per la simulazione del 15 luglio 2023 non presenta forti scostamenti rispetto alla previsione sull'intero periodo. Si riporta infatti la stessa concentrazione delle alte temperature nel contesto densamente costruito. La rappresentazione mostra un trend simile al caso precedente; anche in questa simulazione, ad esempio, sono visibili le aree dei parchi all'interno del contesto edificato, come il parco del grattacielo San Paolo, o quello dei Giardini Reali, rappresentano luoghi effettivamente più freddi rispetto al contesto in cui ricadono.



Grafici 3 - temperature osservate (Bauducchi) e simulate (TARGET) con andamento del vento e della radiazione globale per il 15 luglio 2023

Le simulazioni per la giornata del 15 luglio del 1023 mostrano una particolarità in più rispetto a quelle dei casi studio precedenti, infatti, oltre alle stazioni localizzate nei parchi, anche Reiss Romoli registra temperature inferiori rispetto a Bauducchi. Alenia e Consolata, invece, rimangono con la linea della temperatura che ricalca e sovrastima quella di Bauducchi.





Grafici 4 - Confronto per ogni stazione meteo delle temperature osservate reali (obs - SM) e simulate da TARGET e ARPA per il 16 luglio 2023

Le ore notturne simulate dai due modelli riportano sempre gli scostamenti negli stessi orari delle prove precedenti, anche se questi hanno valori mediamente inferiori, specialmente per TARGET (media per tutte le stazioni uguale a -1.92°C). ARPA si accosta al contrario, di più alle temperature reali nelle prime ore della giornata, con valori che rimangono contenuti in $\pm 1^{\circ}\text{C}$, per poi amplificare il distacco quando inizia il periodo diurno.

Durante il periodo diurno gli andamenti in tutte le stazioni meteorologiche non si differenziano nettamente rispetto alla posizione geografica, come accadeva nei casi studio precedenti. In questo caso solo Giardini Reali sembra comportarsi con un andamento inferiore rispetto alle temperature misurate e al modello ARPA. Qui, infatti, la discrepanza media tra TARGET e le temperature reali è di -2.03°C , con una punta minima di -3.34°C . Al contempo ARPA evidenzia una media di -0.14°C , ma con una massima ($+2.9^{\circ}\text{C}$) e una minima (-1.7°C) che si distanziano molto fra di loro. Per le altre postazioni si nota invece: Alenia presenta un valore medio di $+1.19^{\circ}\text{C}$, toccando però un picco di 3.39°C ; Reiss Romoli si attesta su una media di 0.098°C , denotando comunque

un massimo di 1.89°C e un minimo di -2.31°C; Vallere segue con una media di 0.776°C e Consolata con 0.36°C.

Caso studio: 16 agosto 2023

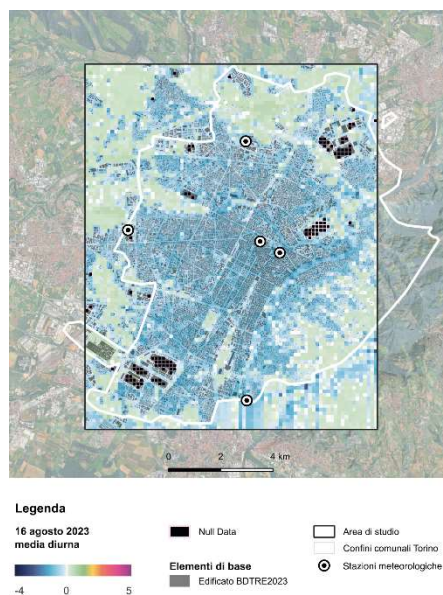


Figura 48 - Simulazione per periodo diurno del 16 agosto 2023

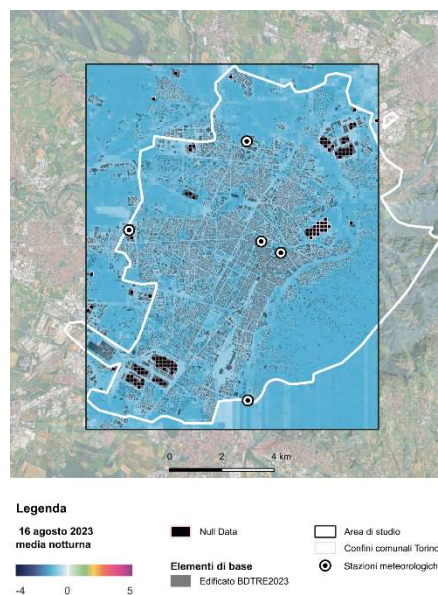


Figura 49 - Simulazione per periodo notturno del 16 agosto 2023

La particolare distribuzione spaziale riscontrata per l'intero arco diurno si ripropone anche in questo caso: gli scostamenti più rilevanti si localizzano all'esterno del centro abitato, mentre nel contesto urbano i modelli restituiscono temperature nettamente inferiori rispetto ai dati reali.

La discrepanza tra le rappresentazioni di agosto 2023 emerge in modo marcato nella simulazione notturna, in cui si osserva una totale assenza di valori positivi.

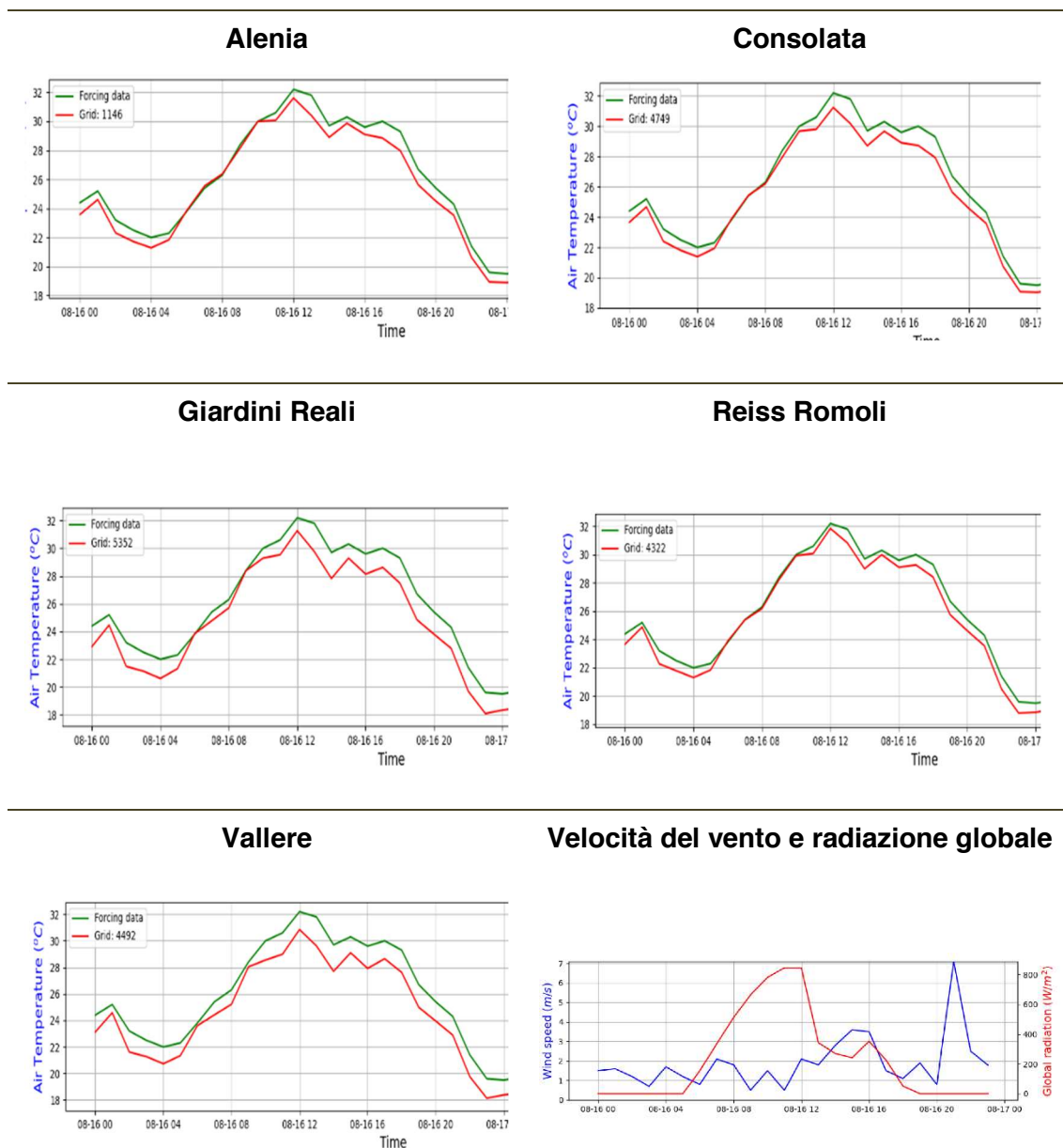
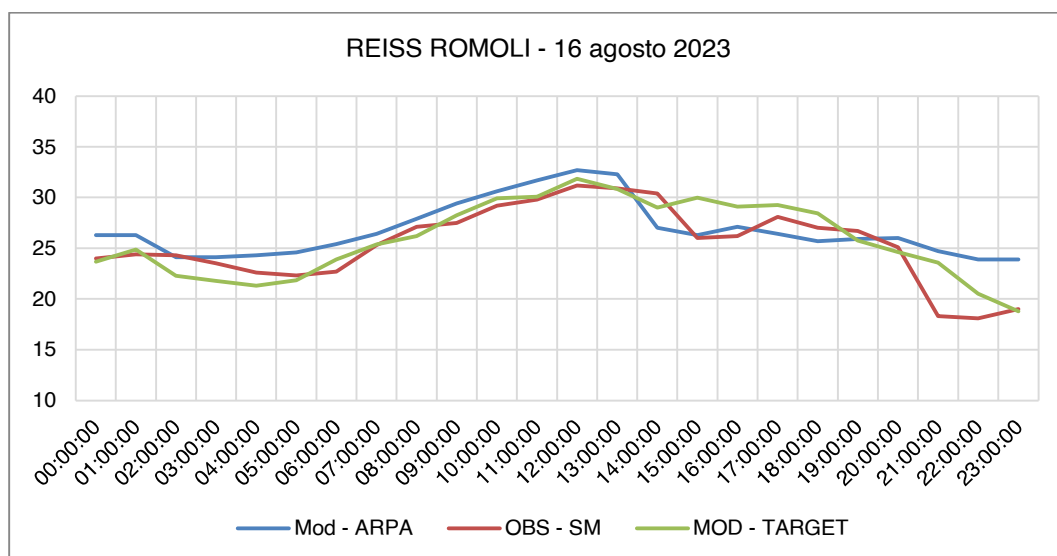
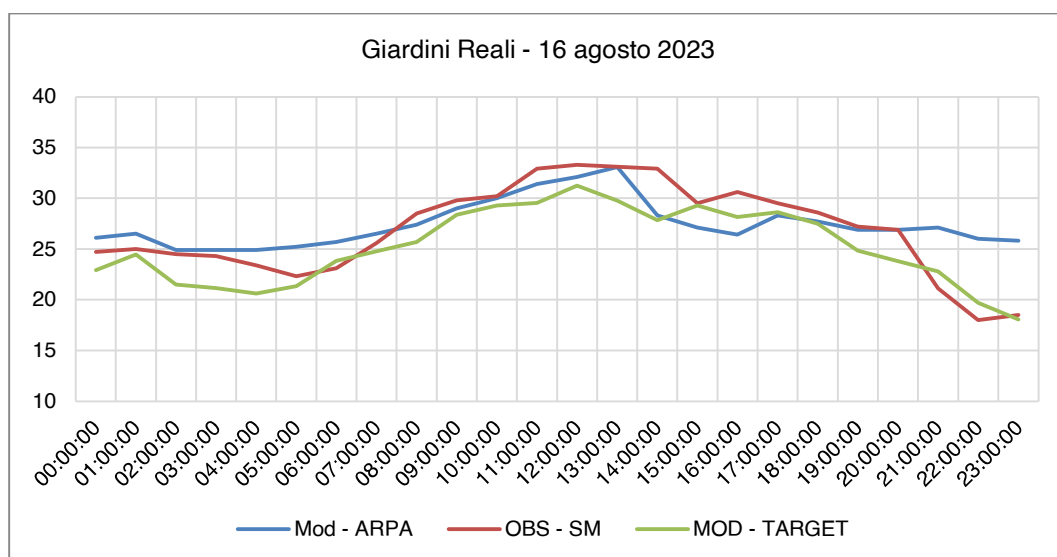
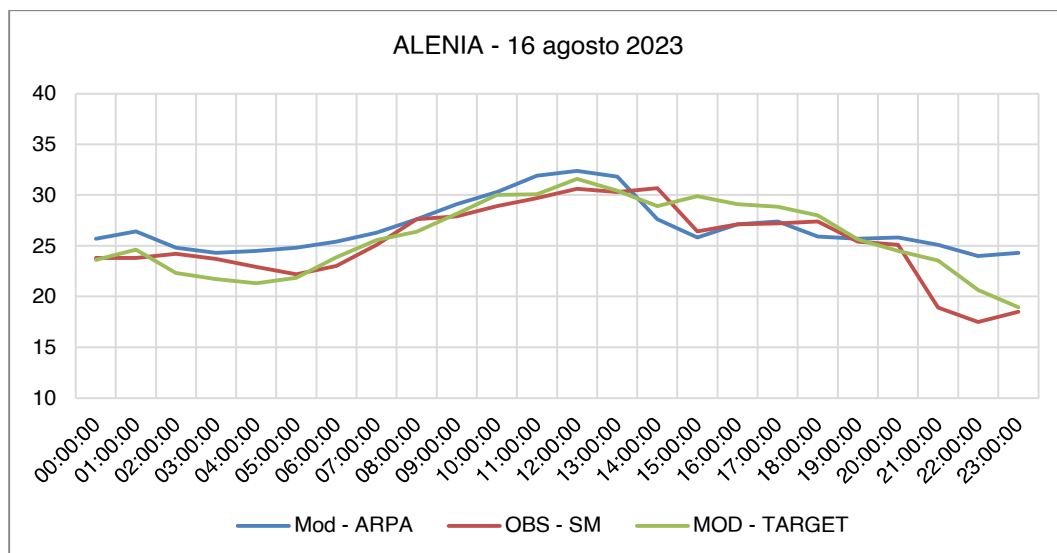
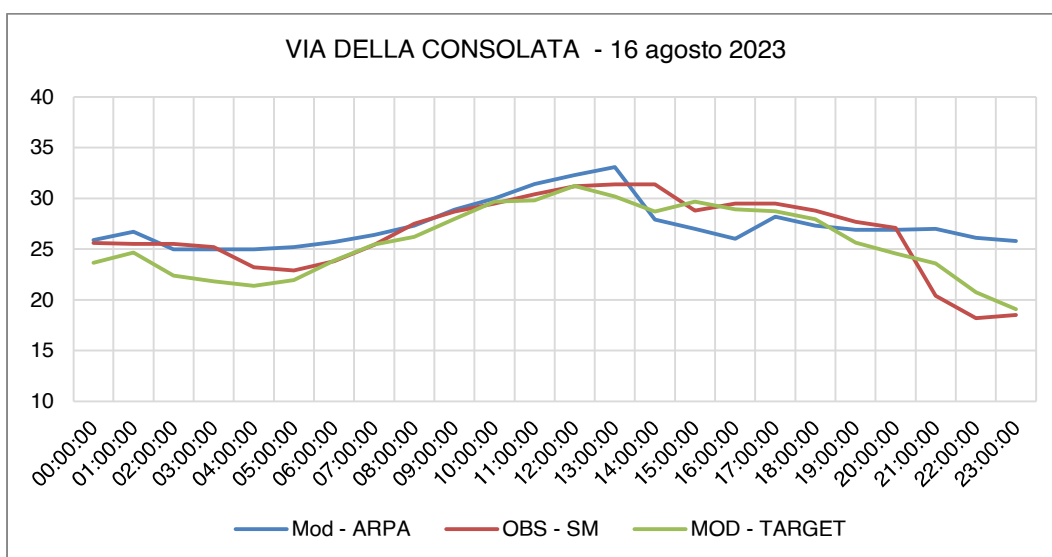
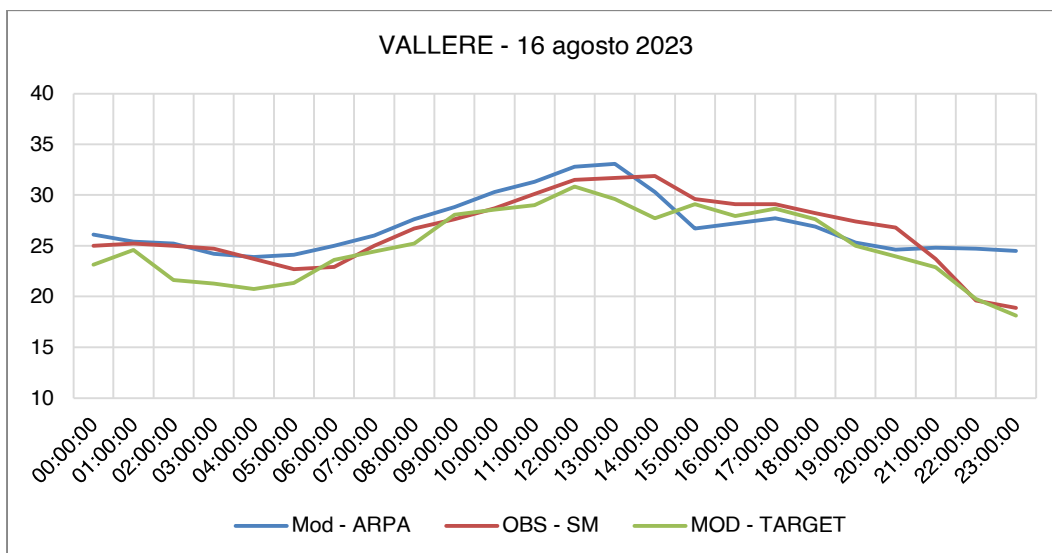


Tabella 17 - Grafici delle temperature osservate (Bauducchi) e simulate (TARGET) con andamento del vento e della radiazione globale per il 16 agosto 2023

Il caso studio relativo ad agosto 2023 denota valori simulati da TARGET costantemente inferiori rispetto a quelli reali (Grafici 5), ponendosi in netto contrasto con l'andamento evidenziato nelle prove precedenti. Invece di seguire un profilo lineare, caratterizzato da temperature contenute durante la notte e più elevate nei momenti di massima radiazione solare, il dato termico subisce brusche oscillazioni.

Tale instabilità e la mancata linearità potrebbero essere giustificate da un improvviso episodio di maltempo che potrebbe aver comportato la copertura del cielo e perciò meno radiazione solare, ristagno di umidità e alterazione della velocità del vento. Questo potrebbe aver causato anche le temperature poco costanti.





Grafici 5 - Confronto per ogni stazione meteo delle temperature osservate reali (obs - SM) e simulate da TARGET e ARPA per il 16 agosto 2023

Analizzando i dati rilevati dalle stazioni meteo, si nota come entrambi i modelli non riescano a replicare fedelmente il profilo termico reale. Oltre ai rilevatori collocati nei parchi, anche via della Consolata evidenzia una sottostima marcata rispetto agli scenari precedenti.

Il modello ARPA, nelle ore finali (grafici 5), presenta uno scostamento medio di $+4.49^{\circ}\text{C}$, con picchi che toccano i 7.3°C e gli 8.00°C ai Giardini Reali. Al contrario, durante le prime ore notturne, il modello si attesta su una media di $+0.91^{\circ}\text{C}$, pur rilevando un massimo di $+2.3^{\circ}\text{C}$ presso la Consolata.

Anche TARGET fatica a ricalcare l'andamento reale avendo lo stesso comportamento dell'altro modello per le prime e ultime ore della giornata. Nei parchi, i rilievi notturni mostrano: per le Vallere una media di -1.84°C (minima -3.43°C) e per i Giardini Reali una media di -1.27°C (minima -3.16°C). Per le restanti postazioni, i dati non divergono significativamente: la Consolata registra una media di -0.82°C , con una forbice compresa tra -3.39°C e $+3.18^{\circ}\text{C}$; Reiss Romoli mantiene una media notturna di $+0.23^{\circ}\text{C}$,

pur segnando un picco di $+5.26^{\circ}\text{C}$ alle ore 20:00; infine, Alenia si assesta su una media di $+0.30^{\circ}\text{C}$, con una massima di $+4.64^{\circ}\text{C}$, sempre in corrispondenza delle 20:00.

Durante le ore diurne, le simulazioni non evidenziano trend univoci. La divergenza media per ARPA è di $+0.125^{\circ}\text{C}$ e, in quasi tutti i siti, eccetto i Giardini Reali, si osserva un'inversione verso valori negativi dopo le ore 14:00. Un fenomeno analogo caratterizza il modello TARGET, dove le ore 14:00 segnano un punto di svolta e anche in questo caso, i Giardini Reali costituiscono l'unica eccezione con una media di -1.80°C (minima di -5.08°C per l'orario precedentemente citato. A completare il quadro, la stazione di Alenia per il modello TARGET rileva un picco di $+3.47^{\circ}\text{C}$ alle ore 15:00, a fronte di una media di $+0.58^{\circ}\text{C}$, evidenziando per questo modello le discrepanze che crescono sensibilmente nelle fasi conclusive della giornata.

5.3. Confronto statistico

L'analisi di ogni singola simulazione ha portato a risultati contrastanti sia sull'effettiva capacità del modello di essere più prestante rispetto al modello creato da ARPA e sia sulla sua capacità di rappresentare la realtà degli andamenti delle temperature. Per poter constatare quantitativamente la teoria, nel paragrafo seguente saranno calcolati tre parametri statistici che permettono di comprendere meglio i risultati ottenuti.

Grazie all'analisi del (Mean Bias, Root Mean Square Error, Coefficiente di Correlazione), è possibile valutare con maggiore precisione il comportamento e l'attendibilità dei modelli in esame. Questi sono stati elaborati incrociando i risultati ottenuti nelle celle corrispondenti alla posizione geografica delle stazioni meteorologiche (Tabella 2) con i dati reali registrati dalle stesse, solo per i casi studio considerati.

Gli orari delle analisi prese in considerazione sono stati resi coincidenti con quelli considerati dall'ARPA, in modo da rendere effettivamente confrontabili i dati e i risultati, i quali, si ricorda, risultano compresi tra le 22:00 e le 06:00, ora locale.

5.3.1. GLI INDICATORI STATISTICI

Per comprendere i risultati riportati, è bene ricordare, anche se brevemente, il loro significato fisico e matematico nonché, come si interpretano.

Il parametro Mean Bias (MB o Errore Medio) serve per comprendere la tendenza del modello a sottostimare o sovrastimare rispetto ai valori reali. Questo viene calcolato attraverso la media aritmetica delle differenze tra i valori misurati e quelli osservati. Ne risulta che più i valori si discostano dallo zero, più il modello prevede con poca precisione la realtà. Bisogna tenere anche conto, però, della possibilità che grandi errori positivi compensino quelli negativi, andando ad inficiare sulla veridicità del parametro, per questo è sempre necessario leggerlo insieme ad altri indicatori.

Il Root Mean Square Error (RMSE) permette di osservare l'errore in termini assoluti. Per esso si eleva al quadrato la differenza delle temperature predette ed osservate, ne fa la media ed infine la radice quadrata. Indicativamente, più si avvicina allo zero più la previsione è accurata.

L'ultimo parametro, il Coefficiente di Correlazione R, misura la direzione e forza della relazione lineare tra i valori osservati e predetti, andando a descrivere così l'andamento sequenziale invece che il valore effettivo. Questo è descritto dal suo valore che varia da 1, cioè lo rappresenta perfettamente, 0, nessuna correlazione, e -1, ha una correlazione perfettamente inversa.

5.3.2. VALUTAZIONE DEI RISULTATI

Tabella 18 - Valori dei principali parametri statistici riportati dal documento ARPA e calcolati per dataset TARGET

Simulazione	Periodo	ARPA			TARGET		
		MB	RMSE	R	MB	RMSE	R
09/06/22	Giorno	-0.04	1.62	0.89	-0.27	1.66	0.92
09/06/22	Notte	0.00	1.92	0.87	-2.35	3.44	0.95
21/07/22	Giorno	0.24	2.24	0.74	0.22	2.80	0.79
21/07/22	Notte	0.95	1.74	0.84	-2.19	3.21	0.92
15/07/23	Giorno	0.44	1.65	0.87	-0.27	1.61	0.84
15/07/23	Notte	-0.05	1.27	0.82	-1.18	2.09	0.93
16/08/23	Giorno	1.04	1.95	0.90	0.12	1.84	0.79
16/08/23	Notte	1.56	2.21	0.80	-0.95	2.40	0.57

È ora possibile comprendere al meglio i valori ottenuti all'interno della Tabella 18.

Osservando i valori ottenuti, emerge marcatamente la discrepanza tra le simulazioni diurne e quelle notturne, per il modello in esame.

Le simulazioni di TARGET per le ore del giorno registrano valori di MB bassi, prossimi allo zero, indicando un errore sistematico minimo e prestazioni comparabili, se non migliori al modello ARPA. Per le ore della notte, al contrario, sottostima il fenomeno, registrando valori di MB fortemente negativi, anche fino a -2.4. Se paragonati con quelli dell'ARPA, questi ultimi hanno valori nettamente inferiori, anche uguali a 0, indicando una maggiore affidabilità di questo rispetto al modello in esame.

RMSE evidenzia nuovamente la difficoltà del modello nella previsione dei valori notturni. Al contempo, quelli diurni, ottengono valori in linea con quelli registrati dall'ente regionale, dimostrando una buona affidabilità quantitativa. Con la presenza dell'irraggiamento solare le previsioni rientrano in parametri accettabili. Durante la notte, appunto, i valori raggiungono picchi molto elevati superando anche la soglia di 3.0°C, mentre l'ente regionale riesce a mantenere un errore abbastanza stabile e contenuto. Questi valori sono fortemente correlati a quelli registrati per l'MB in quanto, la sottostima sistematica operata da TARGET, viene amplificata dallo stesso parametro statistico, portando a valori molto maggiori quando già il Bias è grande.

Interessante però osservare il parametro di correlazione R. Nonostante i grossi errori registrati nei due parametri precedenti, qui sembra risultare che TARGET riesca a rappresentare, con un buon grado di affidabilità, l'andamento delle temperature reali. Con valori spesso superiori a 0,9, sembra che il modello sia in grado di riprodurre fedelmente la dinamica temporale notturna, migliorando talvolta anche le stime dell'ARPA. Fatta eccezione per il caso della notte di agosto che non permette di dire che sussiste una correlazione: infatti, gli altri casi registrano sempre valori maggiori di 0.8.

Sembra che i dati dimostrano che le stime calcolate con il plug-in subiscono una grande distorsione durante le ore notturne, come evidenziano i valori di MB e di RMSE. Nonostante ciò, la dinamica dell'andamento della temperatura sembra essere catturata fedelmente dal processore, anche meglio della metodologia ARPA per le ore notturne.

Tabella 19 - Parametri statistici delle celle coincidenti con le stazioni meteo

giorno	Periodo	TORINO ALENIA			TORINO REISS ROMOLI		
		MB	RMSE	R	MB	RMSE	R
09/06/2022	Giorno	1.59	2.02	0.98	-0.24	1.00	0.98
09/06/2022	Notte	-1.72	3.02	0.94	-2.33	3.71	0.97
21/07/2022	Giorno	1.44	2.45	0.92	0.24	1.64	0.95
21/07/2022	Notte	-1.28	2.06	0.99	-2.32	3.23	0.96
15/07/2023	Giorno	1.19	1.87	0.87	-0.10	1.16	0.92
15/07/2023	Notte	-0.60	1.51	0.93	-1.43	2.22	0.95
16/08/2023	Giorno	1.80	2.22	0.88	0.88	1.66	0.87
16/08/2023	Notte	0.16	2.69	0.54	-0.67	2.31	0.56

giorno	Periodo	TORINO VALLERE			TORINO VIA DELLA CONSOLATA		
		MB	RMSE	R	MB	RMSE	R
09/06/2022	Giorno	-1.11	1.63	0.96	0.35	1.32	0.97
09/06/2022	Notte	-2.53	3.66	0.95	-2.40	4.13	0.98
21/07/2022	Giorno	-0.54	2.91	0.76	1.01	2.42	0.89
21/07/2022	Notte	-2.82	3.55	0.90	-1.89	3.65	0.94
15/07/2023	Giorno	-0.77	1.23	0.93	0.36	1.35	0.89
15/07/2023	Notte	-1.38	2.01	0.96	-0.85	2.27	0.92
16/08/2023	Giorno	-1.04	1.56	0.91	0.79	1.21	0.94
16/08/2023	Notte	-2.03	2.25	0.86	-0.26	2.48	0.65

Analizzando nel dettaglio i comportamenti per le singole stazioni meteorologiche (Tabella 19) si evidenzia che il Bias si mantiene sistematicamente negativo quasi ovunque, specialmente per le ore notturne dove vengono registrati discostamenti elevati, ad esempio per le stazioni Giardini Reali, che registra punte di -2.79, e Vallere, con invece -2,82. Questa tendenza conferma la sottostima sistematica delle temperature da parte di TARGET, o comunque valori che si discostano dal dato reale registrato. Solo per le ore diurne nelle stazioni Romoli, Vallere e Consolata, si trovano dei Bias vicini allo 0.

L'errore assoluto (RMSE) subisce forti oscillazioni nei valori che restano comunque abbastanza elevati, indicando poca affidabilità delle previsioni. Le ore diurne hanno un comportamento migliore rispetto alle notti che registrano valori alti, anche di oltre 3°C.

Per il periodo diurno, l'RMSE si attesta solitamente su valori inferiori o di poco superiori a 2, confermando una discreta aderenza del modello; al contrario, le ore notturne presentano costantemente valori più alti, il che denota una minore precisione. Fanno eccezione alcuni casi del 21 luglio 2022, come Alenia (2.45), Vallere (2.91), Via della Consolata (2.42) e, in ultimo, Giardini Reali, che con 4.03 emerge come l'andamento peggiore.

Anche il parametro R mostra un comportamento coerente con le analisi precedenti, rimanendo migliore per i dati predetti durante le ore di sole rispetto a quelle notturne. Tutti i casi analizzati registrano una correlazione superiore a 0.80, a eccezione della simulazione notturna del 16 agosto 2023, che non riesce a seguire l'andamento reale, nonostante altri parametri, specialmente l'MB, abbiano un andamento non troppo negativo. Questo è stato riconnesso al fenomeno temporalesco avvenuto in quella giornata, che ha comportato una variazione nei valori di radiazione solare, umidità relativa e velocità del vento, come dimostrato dai valori registrati dalle stazioni meteo.

Analizzando il comportamento del modello in relazione alle celle coincidenti con le stazioni, emerge una connessione con la morfologia urbana. Infatti, utilizzando la classificazione LCZ, utilizzata anche dall'ARPA per la definizione di alcuni suoi parametri di input, è possibile osservare dei comportamenti legati alla classe di appartenenza in cui queste ricadono. In particolare, dal dataset emergono due macrogruppi delle LCZ: tessuto urbano compatto, LCZ 2, e LCZ 13 corrispondente a coperture naturali e vegetative. Nella Tabella 20 sono sintetizzate le stazioni con la rispettiva classe di appartenenza.

Tabella 20 - Corrispondenza tra le classi delle LCZ con le stazioni meteorologiche

Categoria Morfologica (LCZ)	Stazioni incluse	Giorno	Periodo	media		
				MB	RMSE	R
LCZ 2 (Tessuto compatto)	Alenia, Consolata, Reiss Romoli	09/06/22	Giorno	0.57	1.44	0.98
		09/06/22	Notte	-2.15	3.62	0.97
		21/07/22	Giorno	0.90	2.17	0.92
		21/07/22	Notte	-1.83	2.98	0.96
		15/07/23	Giorno	0.48	1.46	0.89
		15/07/23	Notte	-0.96	2.00	0.94
		16/08/23	Giorno	1.16	1.70	0.90
		16/08/23	Notte	-0.26	2.49	0.58
LCZ 13 (Aree vegetative)	Giardini Reali, Vallere	09/06/22	Giorno	-1.53	1.86	0.97
		09/06/22	Notte	-2.66	3.72	0.96
		21/07/22	Giorno	-0.80	3.47	0.69
		21/07/22	Notte	-2.73	3.44	0.92
		15/07/23	Giorno	-1.40	1.70	0.95
		15/07/23	Notte	-1.52	2.17	0.93
		16/08/23	Giorno	-1.43	1.93	0.91
		16/08/23	Notte	-2.00	2.25	0.82

Grazie al raggruppamento operato, è possibile confermare le dinamiche descritte nelle analisi dei periodi e dei casi studio. Lo evidenzia il Bias: mentre nel tessuto compatto (LCZ 2) il modello tende a sovrastimare leggermente le temperature diurne (con valori positivi fino a 1.16 il 16 agosto 2023) e a sottostimare quelle notturne, nelle aree verdi (LCZ 13) si registra una sottostima sistematica per tutte le simulazioni, sia di giorno che di notte. In queste ultime, gli scostamenti risultano particolarmente marcati, con picchi negativi di -2.73 per la notte del 21 luglio 2022 e -2.66 per il 9 giugno 2022. Questi dati suggeriscono che TARGET fatichi maggiormente a simulare il raffrescamento delle celle caratterizzate da vegetazione rispetto a quelle del contesto costruito.

Analizzando il parametro RMSE, la discrepanza tra i gruppi LCZ 13 e LCZ 2 non appare altrettanto marcata. Infatti, il parametro evidenzia un'incertezza generale del modello durante le ore notturne per entrambe le classi, con valori che superano il 3.50 per la notte del 9 giugno 2022 in entrambi i gruppi. Si riscontra un andamento critico per la giornata del 21 luglio 2022 nelle aree vegetate, dove l'RMSE diurno arriva a 3.47 a fronte del 2.17 registrato nelle aree urbane. Complessivamente, l'errore quadratico medio sembra penalizzare leggermente i contesti non impermeabilizzati, indicando una difficoltà strutturale del modello.

Per il parametro R, emergere una maggiore correlazione nonché capacità predittiva in base al contesto urbano. Nonostante si registrino ottimi valori di correlazione per la maggior parte delle simulazioni, emergono delle anomalie: per le LCZ 13 il valore diurno del 21 luglio 2022 scende a 0.69, mentre per le LCZ 2 si registra un calo a 0.58 nella notte del 16 agosto 2023. Fatta eccezione per queste criticità puntuali, il parametro evidenzia una predittività diffusa per tutti i contesti.

5.4. Sintesi delle performance del modello e limiti metodologici

Dalle analisi riportate e discusse nei capitoli precedenti, si evince che il modello TARGET implementato in UMEP restituisce performance contrastanti. Accostando il parametro di correlazione R^2 , con la risoluzione spaziale adottata, emerge che il modello ha un'ottima capacità di riprodurre le dinamiche temporali del fenomeno delle isole di calore, permettendo di far emergere il gradiente termico interno alla città, facendo emergere anche le infrastrutture blu e ai parchi urbani. Al contrario, trova difficoltà nell'individuare gli assi viari, che dovrebbero rappresentare elementi con una temperatura maggiore rispetto al resto del tessuto circostante.

Emerge però una marcata limitazione quantitativa dei risultati simulati da TARGET. I parametri MB e RMSE dimostrano, sia per le singole giornate analizzate che per le singole stazioni meteorologiche, un'importante discrepanza tra quelli simulati del processore rispetto alle misurazioni reali e alle temperature calcolate dal modello ARPA. Tuttavia, è possibile ricondurre questi particolari andamenti ad approssimazioni sia intrinseche nel modello numerico sia connesse ai dati di input. In particolare, lo shapefile del land cover inserito in input, non presentava geometria riconducibili agli alberi, limitando la precisione del processore nel calcolo dell'ombreggiamento e, conseguentemente, del bilancio energetico.

Il confronto fra il modello TARGET e quello di ARPA ha prodotto nuovamente risultati discordanti, imputabili alle differenze intrinseche dei due, i quali analizzano livelli atmosferici differenti. Il modello ARPA, infatti, è stato progettato per valutazioni a meso-scala e, tiene anche in considerazione l'intera massa d'aria sovrastante la città. Al contrario, il modello in analisi (TARGET) opera a micro-scala (Urban Canopy Layer): esso effettua le proprie stime attraverso il calcolo del bilancio energetico, considerando esclusivamente le dinamiche interne alla singola cella, senza tenere conto dell'effetto di scambio termico con le celle limitrofe.

Inoltre, uno dei vantaggi rispetto al modello ARPA, è il dettaglio maggiore degli output. L'utilizzo di dati spaziali con una risoluzione, potenzialmente, più accurata, dovrebbe permettere di valutare dettagliatamente le dinamiche che avvengono in un certo luogo. Infatti, ARPA trae i parametri morfologici dalle LCZ che rimangono comunque una classificazione che generalizza le informazioni. TARGET, al contrario, evita questo passaggio di categorizzazione e dovrebbe riuscire a descrivere la complessità delle categorie urbane direttamente tramite una Land cover. I risultati ottenuti, tuttavia, non permettono di evidenziare la capacità maggiore di TARGET di predire il comportamento delle temperature.

Infine, è stata inserita una tabella di riepilogo per un confronto immediato tra i due modelli.

Tabella 21 - riepilogo del confronto tra i modelli di ARPA e TARGET

Caratteristica	Modello ARPA (COSMO+TERRA_URB)	Modello TARGET (Plugin UMEP)
Scala di analisi	Mesoscala	Blocco urbano
Risoluzione spaziale	300 metri	150 metri
Dettaglio geografico	Media i valori su aree ampie	Identifica gradienti tra strade/isolati
Punto di forza	Stabilità notturna, visione d'insieme	Individuazione di hotspot e cold-spot locali
Limiti riscontrati	Generalizzazione	Sottostima notturna (MB negativo)
Input necessari	Parametri meteorologici regionali complessi	DTM, DSM, stazione meteo di riferimento
Complessità d'uso	Alta	Bassa (ambiente QGIS, facile reperibilità dati)
Obiettivo primario	Previsione meteorologica a larga scala	Supporto alla pianificazione e mitigazione locale

Dalle analisi riportate, si evince che il modello TARGET ha una spiccata abilità nel leggere nel tempo l'evoluzione della temperatura, ma resta in difficoltà nel prevedere con precisione i valori assoluti, sottostimandoli notevolmente. Il fenomeno dell'Isola di Calore viene per questo rappresentato, con una distribuzione spaziale dettagliata e rilegata ad aree densamente costruite.

Osservando più ampiamente come il modello si è comportato, sembra che la discrepanza quantitativa, specialmente durante le ore notturne, possa trovare una spiegazione del come il modello gestisce il bilancio energetico. Se le notti sono molto distanti dai valori reali, è perché il modello imita evidentemente l'andamento delle temperature di riferimento e, al contempo, sottostimando l'accumulo del calore ΔQ_S . Infatti, sembra che ci sia uno scambio energetico insufficiente fra i materiali e l'atmosfera, portando a pensare che non vi sia un adeguato accumulo di calore nel processo di

TARGET per molte aree dentro i contesti densamente urbanizzati (LCZ 2), come mostrato da tutte le mappe.

In conclusione, TARGET rappresenta uno strumento qualitativamente valido per la pianificazione spaziale a scala di quartiere, sebbene i suoi limiti quantitativi ne limitino parzialmente l'applicabilità immediata. Conseguentemente, a fronte dei bias riscontrati nelle analisi statistiche, si ritiene che l'affidabilità del modello in questo campo possa essere significativamente migliorata attraverso una ricalibrazione postuma dei valori, basata su un'analisi sistematica del Mean Bias (MB) riscontrato.

6. Conclusioni

In un contesto in cui le aree urbane registrano temperature sempre maggiori, risultano fondamentali strumenti di pianificazione capaci di prevedere e indirizzare le azioni di mitigazione nei punti più critici del territorio. L'obiettivo di questo elaborato è stato proprio quello di valutare l'efficacia di uno strumento di facile accessibilità, che richiede in input dati morfologici facilmente reperibili. La scelta è ricaduta su TARGET, un modello che permette di operare in ambiente open-source tramite QGIS e il plug-in UMEP, senza necessitare di licenze o risorse computazionali inaccessibili.

Per il contesto in analisi, Torino e parti di comuni limitrofi, la classificazione LCZ indica un tessuto urbano compatto e densamente abitato per il nucleo centrale e la presenza di aree che sfumano verso una maggiore dispersione nelle zone periferiche. A questo si aggiunge una posizione geografica sfavorevole: la collocazione all'imbocco della Pianura Padana, stretta tra le Alpi e la collina torinese, determina un regime di venti stagnante che ostacola il ricircolo e il rapido raffrescamento notturno.

I dati storici evidenziano il trend in crescita delle temperature, con ondate di calore più incidenti e persistenti rispetto agli ultimi 40 anni. Le previsioni future delineano uno scenario che rende indispensabile l'azione climatica. Secondo il recente rapporto CMCC (2024) per la città di Torino, analizzando gli scenari RCP 4.5 (contenimento delle emissioni) e RCP 8.5 (scenario peggiore), si stima al 2100 un aumento minimo di 40 giorni di ondate di calore nel periodo estivo, che potrebbero arrivare a 74 nel caso più pessimistico (tabella 22). Il prezzo più alto verrà pagato dalle fasce di popolazione vulnerabile, in particolare gli over 65 (tabella 23). Il rapporto prevede infatti per il periodo 2041-2070 un aumento del 117% della mortalità attribuibile alle ondate di calore, percentuale che rischia di quadruplicarsi a fine secolo nello scenario più severo.

Tabella 22 - "INDICATORI RAPPRESENTATIVI DELLA FREQUENZA DELLE ONDATE DI CALORE" LEDDA ET AL. (2021)

Indicatore	Scenario	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Massima lunghezza ondate di calore	RCP 4.5	4.8	10.6	16.9
	RCP 8.5	4.6	18.8	46.7
Variazione del numero di giorni rispetto al controllo	RCP 4.5	11.4	28.7	36.5
	RCP 8.5	10.7	39.3	70.8
N° giorni estivi in ondata di calore	RCP 4.5	15.3	32.6	40.4
	RCP 8.5	14.6	43.2	74.7

Tabella 23 – “VALUTAZIONE NEL NUMERO DI MORTI ATTRIBUITI AL CALORE E VARIAZIONE PERCENTUALE DEGLI ECCESSI DI MORTALITÀ PER SCENARIO RCP4.5 E RCP8.5. PERIODO DI RIFERIMENTO 1971-2000” LEDDA ET AL. (2021)

Anni	Scenario	Numero di morti 'over 65' attribuibile alle ondate di calore	% scostamento rispetto a 30 anni precedenti
2011- 2040	RCP 4.5	187	–
	RCP 8.5	184	–
2041- 2070	RCP 4.5	406	117
	RCP 8.5	541	193
2071- 2100	RCP 4.5	505	170
	RCP 8.5	940	410

È in questo scenario che si inserisce la validazione del modello TARGET. Entrando nel merito delle analisi effettuate e del confronto tra i parametri statistici calcolati per TARGET e i dati ARPA, emerge una fondamentale discrepanza nell'affidabilità del modello tra le ore diurne e quelle notturne. Se per le ore diurne TARGET riesce ad avvicinarsi fedelmente alle temperature osservate (media casi studio Arpa +0.3; media TARGET -0.05), durante le ore notturne il modello ARPA risulta migliore, sia per quanto riguarda il parametro MB (casi studio: media Arpa +0.62; media TARGET -1.67) che per l'RMSE (casi studio: media Arpa 1.79; media TARGET +2.79). Nonostante ciò, se si analizzano i valori del coefficiente di correlazione R calcolati per TARGET e li si confronta con quelli dell'ente regionale, il modello in esame sembra comportarsi allo stesso modo (media Arpa diurna 0.85 e media TARGET diurna 0.84; media Arpa notturna 0.83 e media TARGET notturna 0.84). TARGET riesce quindi a rappresentare l'andamento lineare delle temperature con un'ottima approssimazione, con la sola eccezione della notte dell'ultima prova effettuata, che non presenta correlazione registrando un R di 0,57.

Osservando come TARGET modella i valori per ogni specifica stazione meteorologica, si ritrova lo stesso andamento generale, confermando buoni valori di correlazione (R). Si nota, tuttavia, che il modello incontra qualche difficoltà in più nel rappresentare l'andamento termico diurno nei contesti caratterizzati da coperture naturali e vegetative (LCZ 13), in particolare durante la giornata del 21 luglio 2022 (Vallere: 0.76; Giardini Reali: 0.63). A questo, si contrappone la notte del 16 agosto dove registrano, per le stazioni ricadenti nelle LCZ 2, valori di R inferiori a 0.75.

Questi riscontri statistici trovano conferma anche nell'analisi visiva delle mappe prodotte, che individuano un'area con una temperatura maggiore ma la distribuzione nello spazio non è rappresentativa per alcune aree ad alta densità edilizia. Inoltre, la maglia più fine nonché la risoluzione degli output finali prodotti da TARGET, rispetto a quelli di ARPA, permettono di osservare la distribuzione del dato più puntualmente.

Le dinamiche riscontrate attraverso le analisi hanno portato a pensare che il bilancio energetico operato da TARGET sottostimi la capacità di accumulo dei materiali della città, non restituendo il calore durante la notte e, perciò, non individuando una forte differenza tra le diverse aree del contesto urbano e le aree rurali.

6.1. Limiti della ricerca e sviluppi futuri.

Lo strumento presenta diversi limiti evidenziati nel corso della stesura dell'elaborato.

Partendo dall'uso del suolo, il modello richiede in ingresso un dettaglio specifico non reperibile se non direttamente prodotto dall'utente. In particolare, si sta facendo riferimento alla collocazione degli alberi e il la loro tipologia, come specificato dalla Tabella 5 - *Corrispondenza delle classi dell'uso del suolo di TARGET con quelle UMEP*. Infatti, non tutte le municipalità hanno prodotto e reso disponibile un file che localizzasse gli alberi e gli arbusti, ad eccezione del comune di Torino.

Infatti, come emerso da una verifica condotta direttamente sulle Basi Dati Topografiche Regionali (BDTRE) dei singoli comuni ricadenti nell'area di studio, non tutte le municipalità hanno prodotto e reso disponibile un file che localizzasse gli alberi e gli arbusti, ad eccezione del comune di Torino. Sebbene tale mancanza potesse essere teoricamente superata ricorrendo all'impiego del dataset europeo del livello *Street Tree Layer* fornito da Urban Atlas, la sua integrazione all'interno della mappa del land cover avrebbe, tuttavia, richiesto tempi e capacità computazionali della macchina di lavoro notevoli, a causa della quantità delle geometrie vettoriali contenute. Questa opzione è stata, perciò, esclusa e la motivazione risiede nell'intento intrinseco dell'elaborato, cioè la volontà di valutare, con le risorse e i dati liberamente accessibili, se lo strumento TARGET potesse essere un'innovazione per la previsione delle Isole di Calore.

Ne consegue che, nonostante le limitazioni e le accortezze metodologiche, i risultati di TARGET hanno potenzialità nel supporto all'azione pianificatoria. Effettivamente, sebbene il modello sia in grado di individuare delle aree con una temperatura maggiore rispetto al riferimento rurale, tale scostamento non è predetto uniformemente sul territorio: il processore, infatti, fallisce nel prevedere l'anomalia termica in molte altre zone in cui, al contrario, le misurazioni reali confermano chiaramente la presenza del fenomeno.

Altri rallentamenti sono derivati direttamente dal plugin, in relazione ad alcune rigidità nella gerarchia di strutturazione delle cartelle dei dati di input/output. La presenza di un sito dei tutorial ha semplificato le operazioni ma non del tutto delucidate. Per questo motivo, bisogna necessariamente sottolineare l'importanza dell'AI nel raggiungimento dei risultati, nel comprenderne il processo e nello scomporre gli errori generati. Senza questo strumento di supporto, molte dinamiche legate alla struttura del codice sorgente, i calcoli e dati contenuti al suo interno, e soprattutto, la modifica delle righe python del *post-processore: Target Analyzer*, non sarebbero stati possibili.

Questo evidenzia la grande forza dei programmi open source e di TARGET: rendere accessibile agli utenti la struttura del codice sorgente permette di modificare, correggere o, se si volesse, ampliare le funzionalità.

Tutte queste limitazioni rappresentano un possibile punto di partenza futuro per la ricerca: la possibilità di indagare metodi e dataset per nuovi risultati di TARGET, potrebbe portare a una metodologia efficace in tutte le sue parti.

6.2. Esito finale dell'elaborato

Il confronto dei risultati prodotti con TARGET con i valori prodotti con modello COSMO TERRA Urb di ARPA restituiscono un'immagine del modello poco affidabile. Nonostante ciò, la capacità di riprodurre valori, sporadicamente adeguata alla realtà, e molto più affidabile nel rappresentare l'andamento temporale delle temperature, non sembra poter permettere di preferire TARGET al modello dell'ente Regionale.

La grande capacità, però, che ha registrato nel riprodurre l'andamento, è una qualità fondamentale per previsioni preliminari pianificatorie.

L'importanza e l'utilità nello sviluppo di TARGET, perciò, risiede in questo ambito. La possibilità di poter prevedere in modo generale i luoghi dove si registrano maggiori temperature dentro il contesto cittadino può comunque permettere a un pianificatore, che possiede come unico strumento il software open-source Qgis, di individuare aree d'interesse per l'applicazione di azioni di mitigazione.

7. Bibliografia

Agenzia Europea dell'Ambiente (2023) *Calore - Effetti sulla salute*. Climate-ADAPT, Osservatorio europeo del clima e della salute. Disponibile su: <https://climate-adapt.eea.europa.eu/it/observatory/evidence/health-effects/heat-and-health> (Consultato il 2 luglio 2026).

Allegrini, J., Dorer, V. e Carmeliet, J. (2015) 'Wind tunnel measurements of natural ventilation performance of a scale model building in a simulated urban environment', *Building and Environment*, 85, pp. 272-286.

ARPA Piemonte (2024) *Isola di Calore urbana - Città di Torino*. Torino: Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale.

ARPA Piemonte (2026) *Mappa sensori*. Disponibile su: https://www.arpa.piemonte.it/rischi_naturali/snippets_arpa_graphs/map_sensor/ (Consultato il 23 giugno 2026).

ARPA Piemonte (s.d.) *Analisi sul lungo periodo - temperature*. Disponibile su: <https://www.arpa.piemonte.it/scheda-informativa/analisi-sul-lungo-periodo-temperature> (Consultato il 1 luglio 2026).

Basiran, M.N. *et al.* (2024) 'Impact of urban heat island on human health: a systematic review', *International Journal of Public Health*, 13(2), pp. 145-156. Disponibile su: https://www.researchgate.net/publication/381185617_IMPACT_OF_URBAN_HEAT_ISLAND_ON_HUMAN_HEALTH_A_SYSTEMATIC_REVIEW (Consultato il 2 luglio 2026).

Broadbent, A.M. *et al.* (2019) 'The Air-temperature Response to Green/blue-infrastructure Evaluation Tool (TARGET v1.0): an efficient and user-friendly model of city cooling', *Geoscientific Model Development*, 12(2), pp. 785-803. Disponibile su: <https://gmd.copernicus.org/articles/12/785/2019/> (Consultato il 23 giugno 2026).

Bunker, A. *et al.* (2016) 'Effects of air temperature on climate-sensitive mortality and morbidity outcomes in the elderly; a systematic review and meta-analysis of epidemiological evidence', *EBioMedicine*, 6, pp. 258-268. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.ebiom.2016.02.034>.

Castellani, W. e Chiostrì, M. (2025) 'Malattie respiratorie e ondate di calore notturno: fenomeno da non sottovalutare', *Toscana Medica*. Disponibile su: <https://www.toscanamedica.org/malattie-respiratorie-e-ondate-di-calore-notturno-fenomeno-da-non-sottovalutare/> (Consultato il 22 giugno 2026).

Chen, J. *et al.* (2026) 'An open-source GIS user interface for the TARGET climate model in the Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP) tool', *Environmental Modelling & Software*, 182, p. 106437. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2026.106437> (Consultato il 23 giugno 2026).

Erell, E., Pearlmutter, D. e Williamson, T. (2011) *Urban Microclimate: Designing the Spaces Between Buildings*. London: Earthscan.

Fondazione CMCC (2024) *Analisi del rischio - I cambiamenti climatici in sei città italiane: Torino*. Disponibile su: <https://www.cmcc.it/it/report-torino> (Consultato il 23 giugno 2026).

Fong, C.S. *et al.* (2026) 'A Systematic Review of Urban Heat Island (UHI) Impacts and Mitigation: Health, Equity, and Policy', *Systems*, 14(1), p. 82. Disponibile su: <https://www.mdpi.com/2079-8954/14/1/82>.

Google (2026) *Ortofoto satellitare globale della città di Torino e dintorni*. Basemap estratta tramite software QGIS, versione 3.40.15, plugin QuickMapServices. (Consultato il 2 luglio 2026).

Grimmond, C.S.B. e Oke, T.R. (2002) 'Turbulent Heat Fluxes in Urban Areas: Observations and a Local-Scale Urban Meteorological Parameterization Scheme (LUMPS)', *Journal of Applied Meteorology*, 41(7), pp. 792–810.

Hersbach, H. *et al.* (2020) 'The ERA5 global reanalysis', *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), pp. 1999–2049. Disponibile su: <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.

Howard, L. (1833) *The Climate of London: Deduced from Meteorological Observations Made in the Metropolis and at Various Places around It*. Vol. 1. London: Harvey and Darton.

IPCC (2022) 'Chapter 6: Cities, settlements and key infrastructure', in *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.

Kjellstrom, T. *et al.* (2016) 'Heat, Human Performance, and Occupational Health: A Key Link in the Potential Impacts of Climate Change', *Global Health Action*, 9, p. 33061. Disponibile su: <https://doi.org/10.3402/gha.v9.33061>.

Ledda, A. *et al.* (2021) *Torino e i suoi strumenti di adattamento ai cambiamenti climatici*. Fondazione CMCC. Disponibile su: <https://www.cmcc.it/it/report-torino> (Consultato il 2 luglio 2026).

Lindberg, F. *et al.* (2018) 'Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP): An integrated tool for city-based climate services', *Environmental Modelling & Software*, 99, pp. 70-87.

Masson, V. (2006) 'Urban Surface Modeling and the Meso-scale Simulation of Urban Climates', *Meteorology and Atmospheric Physics*, 91, pp. 7–22.

Milelli, M., Bassani, F., Garbero, V. e Ridolfi, L. (2023) 'Characterization of the Urban Heat and Dry Island effects in the Turin metropolitan area', *Urban Climate*, 47, p. 101397.

Ministero della Salute (2026) *L'Isola di Calore*. Disponibile su: <https://www.salute.gov.it/new/it/tema/ondate-di-calore/lisola-di-calore/> (Consultato il 2 luglio 2026).

Mohajerani, A. *et al.* (2017) 'The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete', *Journal of Environmental Management*, 197, pp. 522-538.

NASA/USGS (2022) *Landsat Legacy: Five Decades of Earth Observation*. National Aeronautics and Space Administration. Disponibile su: <https://science.nasa.gov/mission/landsat-1/> (Consultato il 2 luglio 2026).

Oke, T.R. (1982) 'The energetic basis of the urban heat island', *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), pp. 1-24.

Oke, T.R. (1987) *Boundary Layer Climates*. 2^a ed. London: Routledge.

Perkins-Kirkpatrick, S.E. e Lewis, S.C. (2020) 'Increasing trends in regional heatwaves', *Nature Communications*, 11(1), p. 3357.

Rahman, M.M. *et al.* (2022) 'Effects of Co-Exposure to Extreme Heat and Particulate Matter Air Pollution on Mortality', *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 206(9), pp. 1110-1117. Disponibile su: <https://doi.org/10.1164/rccm.202204-0655OC>.

Regione Piemonte (2023) *Allegato 1 DGR consumo suolo volume*. Disponibile su: https://www.regione.piemonte.it/web/sites/default/files/media/documenti/2023-04/Allegato%201%20DGR%20consumo%20suolo_volume.pdf (Consultato il 1 luglio 2026).

Regione Piemonte (2024) *Land cover Piemonte 2023*. Geoportale Piemonte. Disponibile su: https://www.geoportale.piemonte.it/geonetwork/serv/api/records/r_piemon:35df8a16-5d89-461f-a0f2-abc2180713d2 (Consultato il 23 giugno 2026).

Regione Piemonte (s.d.) *Cambiamento climatico in Piemonte*. Disponibile su: <https://www.regione.piemonte.it/web/temi/ambiente-territorio/cambiamento-climatico/cambiamento-climatico-piemonte> (Consultato il 2 luglio 2026).

Romanello, M. *et al.* (2021) 'The 2021 report of the Lancet Countdown on health and climate change: code red for a healthy future', *The Lancet*, 398, pp. 1619-1662. Disponibile su: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)01787-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)01787-6).

Royé, D. (2018) 'The effects of hot nights on mortality in Barcelona, Spain', *International Journal of Biometeorology*, 62, pp. 2105-2117. Disponibile su: <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1611-z>.

Santamouris, M. (2015) 'Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions', *Science of the Total Environment*, 512, pp. 582-598.

Stewart, I.D. e Oke, T.R. (2012) 'Local climate zones for urban temperature studies', *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), pp. 1879–1900.

Stull, R.B. (1988) *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Dordrecht: Springer.

The BMJ (2021) 'Urban heat: an increasing threat to global health', *BMJ*, 375, p. n2467. Disponibile su: <https://doi.org/10.1136/bmj.n2467>.

UMEP-dev (s.d.) *UMEP-dev: Urban Multi-scale Environmental Predictor*. GitHub. Disponibile su: <https://github.com/UMEP-dev> (Consultato il 19 giugno 2026).

Voogt, J.A. e Oke, T.R. (2003) 'Thermal remote sensing of urban climates', *Remote Sensing of Environment*, 86(3), pp. 370-384. Disponibile su: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8).

Xu, R. *et al.* (2023) 'Extreme Temperatures, Fine Particulate Matter, and Fatal Myocardial Infarction: A Case-Crossover Study in China', *Circulation*, 148(4), pp. 312-

321.

Disponibile

su:

<https://www.ahajournals.org/doi/10.1161/CIRCULATIONAHA.123.065572>.

Xu, Z. *et al.* (2012) 'Impact of ambient temperature on children's health: a systematic review', *Environmental Research*, 117, pp. 120-131. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2012.07.002>.

8. ALLEGATO 1

Posizione del file:

%APPDATA%\QGIS\QGIS3\profiles\default\python\plugins\UMEP-SuPy-QGIS3\target_analyser

Codice cancellare:	codice nuovo:
<pre> data1 = data1[np.where(data1[:, 14] < 1.), :] # include only nighttime. 14 is position for global radiation data1 = data1[0][:] # cut ref data if endD > np.max(dataref[:, 1]): ending = np.max(np.where(dataref[:, 1] == endD - 1)) else: ending = np.min(np.where(dataref[:, 1] == endD)) data2 = dataref[start:int(ending + 12), :] # + 12 to include whole final night data2 = data2[np.where(data2[:, 14] < 1.), :] # include only nighttime. 14 is position for global radiation data2 = data2[0][:] </pre>	<pre> # cut ref data first so we have the initial data2 array if endD > np.max(dataref[:, 1]): ending = np.max(np.where(dataref[:, 1] == endD - 1)) else: ending = np.min(np.where(dataref[:, 1] == endD)) data2 = dataref[start:int(ending + 12), :] # + 12 to include whole final night # Applica il filtro in base alla selezione dell'utente if self.dlg.radioButtonDaytime_3.isChecked(): data1 = data1[np.where(data1[:, 14] >= 1.0), :] data1 = data1[0][:] data2 = data2[np.where(data2[:, 14] >= 1.0), :] data2 = data2[0][:] elif self.dlg.radioButtonNighttime_3.isChecked(): data1 = data1[np.where(data1[:, 14] < 1.0), :] data1 = data1[0][:] data2 = data2[np.where(data2[:, 14] < 1.0), :] data2 = data2[0][:] # Se radioButtonDiurnal_3 è selezionato (o nessuno dei due sopra), # non applichiamo nessun filtro e teniamo i dati completi. </pre>