Mapping and Monitoring of Urban Heat Islands in Piedmont - M²UHIP

Giorgio Roberto Pelassa[1], Enrico Suozzi[2]

1 [Settore A1624A – Sviluppo energetico sostenibile della Direzione Ambiente, Energia e Territorio, Regione Piemonte, Torino, Italia] – [giorgio.pelassa@regione.piemonte.it]
2 [Staff della Direzione Ambiente, Energia e Territorio, Regione Piemonte, Torino, Italia] – [enrico.suozzi@regione.piemonte.it]

Abstract. Le isole di calore urbane (Urban Heat Islands, UHI) costituiscono una delle principali alterazioni microclimatiche associate all'urbanizzazione. Il fenomeno deriva dall'interazione tra proprietà radiativo-termiche delle superfici, morfologia urbana, riduzione della copertura vegetale e calore antropico [2, 14, 15]. L'urbanizzazione e la conseguente presenza delle UHI intensifica localmente l'effetto delle ondate di calore aggravando l'esposizione della popolazione e gli effetti sanitari avversi, soprattutto nei gruppi vulnerabili [10, 18]. In questo contesto è stato sviluppato dalla Regione Piemonte il progetto M²UHIP, nell'ambito del programma Innovation for Downstream Preparation – Public Administrations (I4DP_PA) dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI). Il lavoro propone un servizio downstream prototipale fondato sull'integrazione di osservazioni satellitari, modellistica termo-climatica e dati socio-economici. Attraverso un'architettura modulare, M²UHIP mira a supportare la mappatura delle superfici, la stima del rischio UHI e i processi di pianificazione territoriale e adattamento climatico.

Parole chiave: Urban Heat Island (UHI), Servizi downstream, Telerilevamento, Adattamento climatico, Rischio socio-sanitario

1 Introduzione

Le isole di calore urbane (Urban Heat Islands, UHI) costituiscono una delle principali alterazioni microclimatiche legate ai processi di urbanizzazione. Il fenomeno si manifesta attraverso anomalie termiche positive nelle aree urbane rispetto ai contesti rurali circostanti ed è determinato dall'interazione tra proprietà radiativo-termiche delle superfici, morfologia urbana, riduzione della copertura vegetale ed emissione di calore antropico [2, 14]. L'intensità dell'UHI varia in funzione della morfologia urbana, della stagione, delle condizioni meteorologiche e della scala spaziale considerata [15]. In presenza di ondate di calore, tali condizioni possono aumentare l'esposizione della popolazione e gli effetti sanitari avversi, con particolare riferimento ai gruppi vulnerabili [10, 18].

In questo quadro si inserisce il progetto M²UHIP, promosso da Regione Piemonte con un partenariato formato da ENEA, ARPA Piemonte, CNR e Università degli Studi di Torino e finanziato dal programma Innovation for Downstream Preparation – Public Administrations (I4DP_PA) dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) nell'ambito dell'iniziativa "Città resilienti". Il progetto mira a ridurre la frammentazione dei flussi informativi necessari al monitoraggio e alla valutazione del rischio UHI in ambito regionale.

M²UHIP propone un servizio downstream prototipale per la Regione Piemonte, basato sull'integrazione di dati satellitari multispettrali e iperspettrali, modellistica termo-climatica e indicatori socio-economici in un workflow quantitativo. Le finalità comprendono la mappatura della temperatura superficiale, la caratterizzazione dei materiali urbani, la valutazione delle infrastrutture verdi e la stima della vulnerabilità socio-sanitaria. Il sistema è concepito come supporto alla pianificazione territoriale, alle valutazioni ambientali e alle politiche di adattamento climatico.

2 Stato dell'arte

2.1 Telerilevamento, LST e materiali urbani

L'osservazione della Terra e il telerilevamento termico sono strumenti consolidati per la caratterizzazione della temperatura superficiale (Land Surface Temperature, LST), della copertura del suolo e delle proprietà radiative dei materiali urbani. La disponibilità di sensori multispettrali, iperspettrali e termici consente di combinare informazione spettrale, geometrica e termica, ma la comparabilità dei prodotti richiede attenzione alle diverse risoluzioni spaziali, frequenze di acquisizione e procedure di correzione. La missione iperspettrale PRISMA può supportare la caratterizzazione spettrale dei materiali urbani [12], mentre ASTER GED costituisce una fonte di riferimento per l'emissività superficiale nell'infrarosso termico [9].

2.2 Local Climate Zones e modellistica urbana

Le Local Climate Zones (LCZ) sono uno schema standardizzato per descrivere le caratteristiche morfologiche e di copertura del suolo rilevanti per gli studi di climatologia urbana [17]. Procedure automatizzate e dati di osservazione della Terra consentono di produrre mappe LCZ operative [3]. L'integrazione delle LCZ con modelli atmosferici e modelli di superficie urbana permette di rappresentare gli effetti della morfologia e dei materiali sugli scambi energetici e sulla temperatura dell'aria. Nel presente progetto tale componente è associata al modello ICON e al modello urbano TERRA_URB [16, 19].

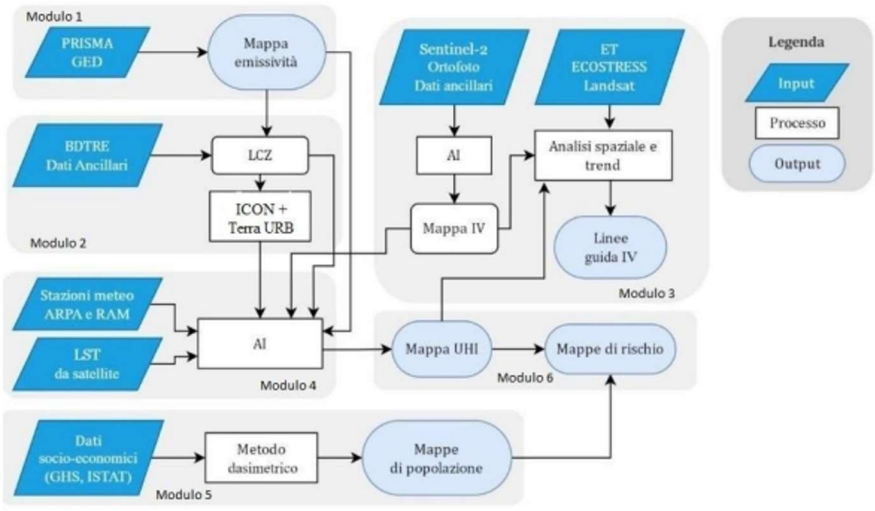
2.3 Infrastrutture verdi, evapotraspirazione e vulnerabilità

Le infrastrutture verdi possono contribuire alla mitigazione termica mediante evapotraspirazione, ombreggiamento e modifica della rugosità superficiale. L'evapotraspirazione può essere stimata attraverso dati satellitari e variabili meteorologiche, secondo procedure fondate sul bilancio energetico e sui principi descritti in letteratura [1, 7, 21]. La valutazione del rischio richiede inoltre la combinazione di pericolosità, esposizione e vulnerabilità, con particolare attenzione alla distribuzione spaziale della popolazione e dei gruppi sensibili. Le tecniche dasimetriche consentono di disaggregare dati aggregati utilizzando variabili ausiliarie relative all'edificato e all'uso del suolo [8, 13].

Rispetto ai contributi spesso focalizzati su singole componenti metodologiche, M²UHIP propone un'architettura end-to-end che integra caratterizzazione delle superfici, modellistica termo-climatica, monitoraggio delle infrastrutture verdi e valutazione del rischio socio-sanitario. La proposta è orientata all'impiego da parte delle amministrazioni territoriali e al supporto dei processi decisionali.

3 Materiali e metodi

Il progetto M²UHIP è strutturato in sei moduli operativi. Poiché il sistema è descritto come prototipo in fase di sviluppo, le prestazioni definitive, gli errori di stima e il livello di maturità operativa dovranno essere documentati mediante protocolli di validazione dedicati.



3.1 Modulo 1 – Materiali urbani ed emissività

Il primo modulo è dedicato alla caratterizzazione dei materiali urbani e delle loro proprietà radiative. Il sensore iperspettrale PRISMA può contribuire all'identificazione di variazioni spettrali associate a differenti materiali e condizioni superficiali, purché le interpretazioni siano calibrate mediante librerie spettrali e dati di riferimento a terra [12]. PRISMA consente di derivare proprietà ottiche, quali riflettanza e albedo, ma non misura direttamente tutti i parametri termofisici necessari alla modellistica energetica.

Le informazioni PRISMA sono integrate con ASTER GED, utilizzato come riferimento per l'emissività nell'infrarosso termico [9], e con la Base Dati Territoriale di Riferimento degli Enti (BDTRE), necessaria per descrivere geometria e morfologia del tessuto urbano. La procedura prevista produce una mappa armonizzata dell'emissività su una griglia di 70 m, da utilizzare come input del sistema ICON + TERRA_URB. La risoluzione e l'errore della mappa dovranno essere verificati mediante confronto con dati indipendenti.

3.2 Modulo 2 – Modellistica urbana e classificazione LCZ

Il secondo modulo produce la classificazione delle Local Climate Zones mediante una procedura che integra proprietà geometriche e radiative locali, tra cui altezza e impronta degli edifici, copertura del suolo, vegetazione, albedo e superficie impermeabile. Le LCZ, articolate in 17 classi, traducono la complessità urbana in parametri standardizzati per la modellistica microclimatica [17]. La produzione di mappe operative può essere supportata da procedure automatizzate e dati multisorgente [3].

La classificazione LCZ viene utilizzata come input per TERRA_URB, implementato nel modello meteorologico ICON [16, 19]. Il sistema ricostruisce la distribuzione spaziale e l'evoluzione temporale della temperatura dell'aria alla risoluzione prevista dalla configurazione adottata. Qualora venga utilizzata una griglia a 500 m, tale valore dovrà essere documentato insieme al dominio di simulazione, al periodo di integrazione, alle parametrizzazioni e alla procedura di validazione con le osservazioni meteorologiche.

3.3 Modulo 3 – Infrastrutture verdi

Il terzo modulo riguarda la mappatura e la valutazione della funzionalità delle infrastrutture verdi, con l'obiettivo di quantificarne il contributo alla mitigazione delle UHI. La classificazione è impostata secondo il sistema EAGLE, distinguendo componenti di copertura del suolo, attributi d'uso e caratteristiche descrittive [5]. Sono previsti dati Sentinel-2, ortofoto regionali e, in prospettiva, immagini ad alta risoluzione della costellazione IRIDE.

L'analisi della componente ecosistemica utilizza indicatori di evapotraspirazione derivati da ECOSTRESS e Landsat. ECOSTRESS fornisce osservazioni termiche ad alta risoluzione utili per analizzare la variabilità spaziale della temperatura superficiale e dell'evapotraspirazione [7]. L'ET sarà stimata mediante algoritmi dedicati e dati

meteorologici ausiliari, secondo principi di bilancio energetico [1, 21]. La comparabilità temporale delle stime dovrà tenere conto di sensori, algoritmi, periodi di acquisizione e condizioni di osservazione.

Le infrastrutture verdi possono contribuire alla mitigazione delle UHI attraverso evapotraspirazione, ombreggiamento e modifica della rugosità superficiale. L'intensità degli effetti dipende dal tipo di vegetazione, dalla disponibilità idrica, dalla morfologia urbana e dalle condizioni meteorologiche. Gli output previsti comprendono indicatori di ET, vigoria, resilienza e connettività, oltre a linee guida per la pianificazione e gestione delle infrastrutture verdi.

3.4 Modulo 4 – Temperature notturne ad alta risoluzione

Il quarto modulo ricostruisce la LST notturna mediante l'integrazione di ECOSTRESS e Copernicus Global LST. La disponibilità delle osservazioni ECOSTRESS dipende dalla geometria orbitale della Stazione Spaziale Internazionale, dall'orario di acquisizione e dalla copertura nuvolosa; il numero di osservazioni utilizzabili nel periodo giugno–settembre dovrà quindi essere determinato mediante ricognizione del catalogo e filtri di qualità [7]. Le caratteristiche spaziali e temporali del prodotto Copernicus Global LST dovranno essere riportate con riferimento alla specifica versione utilizzata [4].

I modelli di regressione e machine learning apprendono la relazione tra LST a bassa risoluzione e osservazioni ECOSTRESS ad alta risoluzione, utilizzando variabili ausiliarie quali uso del suolo, NDVI, albedo, quota, distanza dalle infrastrutture e campi ICON + TERRA_URB. Il downscaling produce una stima modellata su una griglia di 70 m, non una misura diretta. Pertanto, ogni prodotto dovrà essere accompagnato da indicatori di incertezza e validato su date e aree indipendenti da quelle utilizzate per l'addestramento [20].

La Temperatura dell'aria a 2 m sarà stimata separatamente mediante modelli statistici o di machine learning calibrati sulle centraline ARPA/RAM e alimentati da LST, variabili meteorologiche, risultati modellistici e descrittori della morfologia urbana. LST e temperatura dell'aria rappresentano grandezze fisiche differenti; la seconda non dovrà quindi essere ricavata mediante conversione diretta della prima.

3.5 Modulo 5 – Vulnerabilità e rischio socio-sanitario

Il quinto modulo integra dati socio-economici e sanitari provenienti da ISTAT, SSR, ASIA e BDTRE. I dati relativi a popolazione e struttura demografica dovranno essere documentati indicando fonte, anno, scala, licenza e modalità di trattamento [11]. Le informazioni su densità abitativa, struttura per età, condizioni socio-economiche, caratteristiche edilizie e accesso ai servizi saranno trasformate mediante tecniche dasimetriche.

La dasimetria consente di trasferire informazioni aggregate, quali la popolazione per sezione di censimento, su unità spaziali più fini utilizzando variabili ausiliarie relative a edificato, uso del suolo, tipologie edilizie e densità residenziale [8, 13]. Le mappe

risultanti saranno allineate alle griglie termiche dei moduli precedenti. La qualità della redistribuzione dovrà essere verificata mediante controlli di consistenza, confronto con dati indipendenti e analisi dell'incertezza.

3.6 Modulo 6 – Mappatura del rischio UHI

Il sesto modulo integra pericolosità, esposizione e vulnerabilità per produrre mappe di rischio UHI. La pericolosità sarà caratterizzata mediante l'intensità dell'UHI, definita come differenza tra la temperatura dell'area urbana e quella di una o più aree rurali di riferimento, individuate secondo criteri spaziali e climatologici espliciti [14, 15]. La stima utilizzerà principalmente la temperatura dell'aria a 2 m, mentre la LST sarà impiegata per descrivere la struttura spaziale della superficie urbana.

Per la valutazione socio-sanitaria, l'intensità UHI dovrà essere integrata con temperatura assoluta, durata degli eventi e, ove disponibili, umidità e indicatori di stress termico [10, 18]. L'esposizione deriverà dalla distribuzione della popolazione ottenuta mediante dasimetria; la vulnerabilità sarà stimata considerando età, fragilità socio-sanitaria, condizioni socio-economiche e caratteristiche abitative.

L'aggregazione delle componenti dovrà essere effettuata mediante una procedura esplicita di normalizzazione, pesatura e combinazione, documentando indicatori, soglie e analisi di sensibilità. Le mappe potranno supportare pianificazione urbana, progettazione delle infrastrutture verdi e valutazioni ambientali, purché siano accompagnate da una chiara descrizione dei limiti interpretativi.

4 Risultati attesi e prodotti

Poiché il progetto è descritto come servizio downstream prototipale, questa sezione riporta i prodotti attesi e non risultati sperimentali già validati. M²UHIP è progettato per produrre:

- mappe della temperatura superficiale notturna e dell'intensità UHI;
- classificazioni Local Climate Zones;
- mappe dell'emissività dei materiali urbani;
- indicatori di evapotraspirazione e raffrescamento delle infrastrutture verdi;
- mappe dasimetriche di esposizione e vulnerabilità;
- mappe integrate di rischio climatico e socio-sanitario.

I prodotti potranno essere pubblicati mediante geoservizi OGC, tra cui WMS e WFS, secondo le specifiche tecniche applicabili [6]. Prima dell'impiego operativo dovranno essere documentati risoluzione, copertura temporale, qualità, incertezza, metadati, frequenza di aggiornamento e procedure di validazione.

La piattaforma è concepita per supportare pianificazione urbana, valutazioni ambientali, istruttorie territoriali e monitoraggio climatico regionale. Tali applicazioni dovranno essere interpretate come finalità operative del prototipo, non come risultati già dimostrati in assenza di test documentati.

5 Discussione

L'architettura M²UHIP integra componenti che nella letteratura sono spesso trattate separatamente: osservazioni satellitari, caratterizzazione dei materiali, classificazione LCZ, modellistica atmosferico-urbana, infrastrutture verdi e vulnerabilità socio-sanitaria. L'integrazione può migliorare la coerenza spaziale delle analisi, ma introduce fonti di incertezza legate a risoluzioni diverse, errori di co-registrazione, disponibilità temporale non uniforme, assunzioni dei modelli e qualità dei dati socio-economici.

Le osservazioni ECOSTRESS sono potenzialmente utili per descrivere la struttura termica urbana e i processi di evapotraspirazione [7]. Tuttavia, la componente notturna non deve essere considerata automaticamente il momento di massima intensità in ogni contesto: tale ipotesi dovrà essere verificata rispetto alla scala spaziale, alla stagione, alle condizioni meteorologiche e alla definizione di UHI adottata [2, 14, 15].

Analogamente, il machine learning può migliorare la ricostruzione spaziale della LST, ma le stime downscaled devono essere distinte dalle osservazioni dirette e corredate da validazione indipendente e indicatori di incertezza [20]. L'inclusione di esposizione e vulnerabilità è essenziale per trasformare una descrizione della pericolosità termica in una valutazione di rischio orientata alle decisioni [10, 18].

La struttura modulare favorisce la scalabilità del servizio e l'integrazione di future missioni satellitari. La trasferibilità operativa dovrà tuttavia essere valutata mediante dimostrazione in ambiente operativo, riproducibilità dei prodotti, continuità del servizio e impiego documentato da parte degli enti destinatari.

6 6. Conclusioni

M²UHIP propone un'architettura integrata per il monitoraggio e la valutazione del rischio associato alle isole di calore urbane in Piemonte. Il sistema combina osservazioni satellitari multisorgente, modellistica meteorologica e urbana, dati a terra, cartografia tecnica e informazioni socio-economiche e sanitarie.

Il contributo principale consiste nella definizione di una filiera informativa end-to-end, dalla caratterizzazione fisica delle superfici alla produzione di mappe di esposizione, vulnerabilità e rischio. La solidità scientifica del servizio dipenderà dalla documentazione delle configurazioni modellistiche, dalla qualità dei dati, dalla validazione indipendente, dalla quantificazione dell'incertezza e dalla trasparenza delle procedure di aggregazione.

Il raggiungimento di un livello di maturità tecnologica compatibile con l'impiego operativo, incluso l'eventuale TRL 9, dovrà essere verificato mediante criteri documentati: validazione in ambiente operativo, continuità del servizio, riproducibilità, gestione delle incertezze ed effettivo utilizzo nei processi di pianificazione e monitoraggio. In tale prospettiva, M²UHIP può contribuire a collegare prevenzione sanitaria, adattamento climatico e pianificazione urbana.

7 Riferimenti bibliografici

[1] Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56.

[2] Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: A review. International Journal of Climatology, 23(1), 1–26.

[3] Bechtel, B., Alexander, P. J., Böhner, J., Ching, J., Conrad, O., Feddema, J., et al. (2019). Generating Local Climate Zone maps for urban climate studies. Urban Climate, 27, 24–45.

[4] Copernicus Global Land Service. (2022). Land Surface Temperature Product User Manual.

[5] EAGLE Group. (2021). EAGLE Framework for Land Monitoring in Europe.

[6] European Environment Agency. (2020). Urban adaptation to climate change in Europe.

[7] Fisher, J. B., Lee, B., Purdy, A. J., Halverson, S. A., Dohlen, M. B., Cawse-Nicholson, K., et al. (2020). ECOSTRESS: NASA's next-generation thermal mission. Remote Sensing of Environment, 237, 111556.

[8] Goodchild, M. F., & Lam, N. S. (1980). Areal interpolation and dasymetric mapping. International Journal of Geographical Information Science, 4(3), 329–347.

[9] Hulley, G., & Hook, S. (2011). Generating global land surface emissivity from ASTER GED. Remote Sensing of Environment, 115(12), 3553–3560.

[10] IPCC. (2021). Climate Change 2021: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge University Press.

[11] ISTAT. (2022). Censimento permanente della popolazione: Metodologie e dataset.

[12] Loizzo, R., et al. (2018). PRISMA: The Italian hyperspectral mission. In IGARSS 2018, 175–178. IEEE.

[13] Maantay, J., Maroko, A., & Herrmann, C. (2007). Mapping population distribution in urban areas using dasymetric techniques. GIScience & Remote Sensing, 44(2), 155–178.

[14] Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 108(455), 1–24.

[15] Santamouris, M. (2015). Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities. Science of the Total Environment, 512–513, 582–598.

[16] Schultz, M. G., et al. (2021). The ICON model: A new generation global atmospheric model. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 13(6).

[17] Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for urban temperature studies. Bulletin of the American Meteorological Society, 93(12), 1879–1900.

[18] World Health Organization. (2018). Heatwaves and health: Guidance for public health actions.

[19] Wouters, H., Demuzere, M., De Ridder, K., & van Lipzig, N. P. M. (2016). The urban land surface model TERRA_URB: Description and performance. Urban Climate, 17, 176–193.

[20] Xu, Y., et al. (2022). Machine learning downscaling of satellite land surface temperature. Remote Sensing, 14(3), 512.

[21] Zhang, K., et al. (2019). ECOSTRESS evapotranspiration retrieval. Remote Sensing of Environment, 229, 86–102.