Dai dati Copernicus all'adattamento urbano: mappatura e valutazione delle infrastrutture verdi e blu a supporto della mitigazione dell'isola di calore in Piemonte (M²UHIP)

Chiara Richiardi[1], Francesco Niccoli[1], Maria Rita Minciardi[1], Giorgio Pelassa[3], Maria Adamo[2], Mariella Aquilino[2], Marica De Lucia[2], e Saverio Vicario[2]

[1] ENEA, SSPT-IMPACT, Italia

[2] CNR-ITIAm, Italia

[3] Regione Piemonte, Italia

chiara.richiardi@enea.it

Abstract. Ricerca in itinere. Si presenta l'architettura del WP5 del progetto M²UHIP (ASI, programma I4DP_PA) per mappare e valutare le infrastrutture verdi e blu (IV/IB) del Piemonte a supporto della mitigazione dell'isola di calore urbana: una classificazione conforme a EAGLE basata su prodotti Copernicus e cartografia regionale, e una rete di 85 sensori termoigrometrici in situ. Si riportano il controllo di qualità biofisico, l'intercalibrazione dei sensori e le lezioni operative.

Parole chiave: Infrastrutture verdi e blu · Isola di calore urbana · Copernicus · EAGLE · Reti di sensori in situ · Servizi downstream.

1 Introduzione

Le infrastrutture verdi e blu (IV/IB) sono riconosciute dalla Strategia europea per la biodiversità 2030 e dal Green Deal come un cardine dell'adattamento climatico delle aree urbane, con un ruolo particolarmente rilevante nel contenimento dell'isola di calore urbana (*Urban Heat Island*, UHI). Alla chiarezza dell'indirizzo politico non corrisponde, tuttavia, una disponibilità altrettanto chiara di servizi *downstream* operativi, riproducibili e trasferibili tra città, che consentano alle pubbliche amministrazioni di mappare le IV/IB alla scala regionale e di valutarne la capacità di fornire servizi di regolazione climatica. Colmare questo divario richiede di integrare fonti eterogenee che operano a scale spaziali e temporali molto diverse: osservazione della Terra da satellite, cartografia tematica semanticamente ricca e misure in situ ad alta densità.

Questo contributo descrive l'architettura e lo stato di avanzamento, a ottobre 2026, delle attività di ENEA nel progetto M²UHIP (*Mapping and Monitoring of Urban Heat Islands in Piedmont*, CUP F13C25001160001), finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana nell'ambito del programma *Innovation for Downstream Preparation – Public Administrations* (I4DP_PA) e realizzato da Regione Piemonte, ENEA, CNR-ITiAM, Università di Torino e ARPA Piemonte. I pacchetti di lavoro coordinati da ENEA (WP5101, WP5103 e WP5104) sono organizzati in due pilastri complementari: la mappatura delle IV/IB, mediante una classificazione conforme al modello EAGLE [1], e la valutazione della loro funzionalità termica, mediante una rete dedicata di sensori in situ affiancata da indicatori termici satellitari. Il downscaling della temperatura superficiale a 70 m sviluppato da CNR-ITIAm (WP6102) si colloca a valle di entrambi i pilastri e utilizza la rete in situ come fonte primaria di validazione indipendente.

Il progetto è in corso e la campagna di misura si concluderà alla fine del 2027: si documentano quindi il disegno metodologico, le scelte di qualità del dato, i controlli già eseguiti e i limiti noti, mentre i risultati funzionali, che dipendono dalla serie temporale completa, sono indicati come sviluppo.

2 Architettura complessiva

La Fig. 1 riassume il flusso dei dati. Il primo pilastro (WP5103, DEL 5.1.1 [11]) produce un GeoPackage di poligoni IV/IB attribuiti secondo le componenti EAGLE; il secondo (WP5104) usa tipologie e stratificazione del primo per progettare e interpretare le misure termiche. I dati sono tutti aperti: Sentinel-2 L2A, gli *High Resolution Layers* (HRL) Copernicus (*Tree Cover Density*, *Imperviousness*, *Grassland*), CLC+ Backbone, il *Canopy Height Model* (CHM) a 1 m di Meta/WRI, Urban Atlas 2021, *Street Tree Layer* 2021, Land Cover Piemonte (LCP), BDTRE e OpenStreetMap (OSM); per la componente termica Landsat 8/9 TIRS, Sentinel-3 SLSTR ed ECOSTRESS. Il LiDAR ALS della Città di Torino non è un dato open ed è riservato alla validazione.

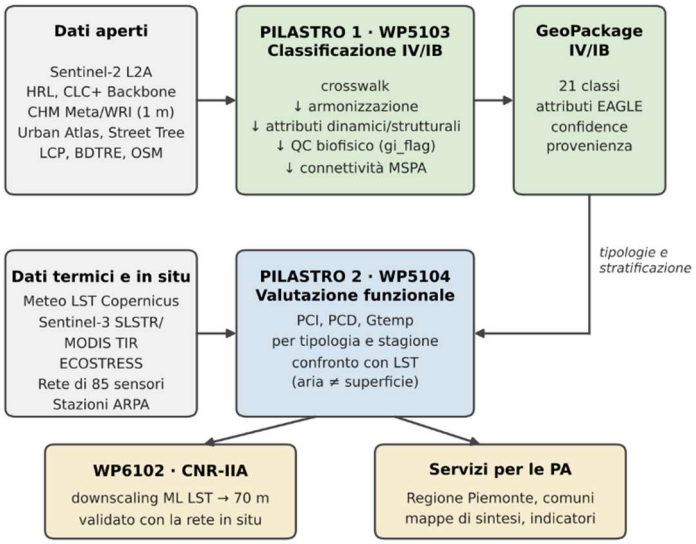

Fig. 1. Flusso dati di M²UHIP per i pacchetti ENEA e interfaccia con il WP6102 (CNR-ITIAm).

3 Pilastro 1: classificazione delle IV/IB conforme a EAGLE

3.1 Schema di classificazione e principi di integrazione

Lo schema ha due livelli: il livello 1 definisce la categoria funzionale di copertura del suolo, il livello 2 la formazione vegetale strutturale. Le classi sono 21, di cui 15 di infrastruttura verde (verde naturale GN1–GN7, verde urbano gestito GU1–GU6, verde su struttura GS1–GS2) e 6 di infrastruttura blu (BI1–BI6), riassunte in Tab. 1; la pipeline operativa gestisce inoltre tre classi aggiuntive (GA1–GA3), di tipologie di copertura agricola peri-urbana.

Tabella 1. Classi IV/IB del DEL 5.1.1 e fonte principale di geometria o attribuzione.

Categoria	Classi	Fonte principale
Verde naturale	GN1–GN4	Classi LCP/CLC (311, 312, 313, 321)
	GN5–GN7	Tag OSM (zone umide, arbusteto, vegetazione rada)
Verde urbano gestito	GU1, GU4, GU6	LCP/CLC (141, 242, 142) più OSM
	GU2	OSM *tree_row*, geometria derivata dal CHM
	GU3, GU5	BDTRE AR_VRD; OSM *cemetery*
Verde su struttura	GS1–GS2	OSM (tetti verdi, pareti verdi)
Blu naturale	BI1–BI3	LCP/CLC (511, 512, 411)

Blu gestita	BI4–BI6	OSM (canali, bacini, fontane)

Le geometrie di LCP restano intatte e ogni altra fonte è agganciata come attributo, senza segmentazioni. L'unica eccezione dichiarata è BDTRE AR_VRD, seconda fonte di geometria: genera righe aggiuntive con un campo *geom_source* distinto e non riclassifica mai il poligono LCP. Lo stesso vale per gli elementi OSM secondari e per le geometrie derivate: gli elementi lineari, a larghezza nulla, diventano poligoni cercando nel CHM, entro un corridoio di 10 m, la chioma effettiva dei filari stradali (GU2), e usando metà del tag *width* oppure l'indice MNDWI (B03, B11, soglia 0,3) per i canali artificiali (BI4). Ogni caso non gestito produce un valore esplicito (per esempio *NON_GI*) e mai un valore mancante silenzioso, e per ogni poligono è conservato un registro di provenienza.

3.2 Attributi dinamici, strutturali e connettività

Gli attributi dinamici derivano da compositi mediani stagionali Sentinel-2 L2A (2020–2026, quattro stagioni per anno, bande B02–B12; maschera nuvole che conserva le classi SCL 4, 5, 6): vigoria (NDVI, EVI, CIre), stato idrico (NDMI, MNDWI), fenologia e scarti normalizzati rispetto a una *baseline* pluriennale per l'individuazione precoce di anomalie. Gli attributi strutturali comprendono la classe di altezza (arborea, arbustiva, erbacea) da CLC+ Backbone e tessitura GLCM nel vicino infrarosso, la densità di chioma con un approccio *fraccover* che fonde HRL *Tree Cover Density*, CHM e NDVI estivo, e la permeabilità sotto chioma dall'indice BSI invernale su latifoglie defogliate, con ripiego su HRL *Imperviousness* per le sempreverdi. La connettività è calcolata con l'analisi morfologica dei pattern spaziali (MSPA [3]) come modulo intra-urbano a grana fine; la scala regionale è fuori dall'ambito del pacchetto. La pipeline è orchestrata per comune su 14 aree pilota (il nucleo metropolitano di Torino, sette comuni isolati da Cuneo a Novara e Ciriè), con un margine di estensione per non troncare gli elementi di confine.

3.3 Controllo di qualità biofisico e calibrazione della soglia

Il livello di confidenza *gi_flag* di ciascuna classe è definito dal DEL su base bibliografica (1 = infrastruttura verde confermata, 0,5 = parziale, 0 = non IV). Il flag finale è il minimo tra il valore di classe e l'evidenza biofisica del poligono: *gi_flag_finale = min(gi_flag_base, frazione_evidenza)*, dove la frazione di evidenza è la quota di poligono con NDVI (B08, B04) sopra soglia per le categorie vegetate. Il QC è applicato a tutte le classi e non modifica mai il codice di classe, ma solo l'attributo derivato.

La soglia NDVI di 0,15 per il pixel vegetato era provvisoria, estrapolata dall'intervallo estivo di GN7 nel DEL e mai verificata su dati reali. È stata calibrata con l'indice di Youden [4] sulla curva ROC, con due riferimenti indipendenti dalla classificazione e derivati dagli HRL: non vegetato = *Imperviousness Density* ≥ 90 %; vegetato = celle erbacee (*Grassland* = 1) e arboree (*Tree Cover Density* ≥ 80 %). I punti, campionati a caso nei 14 comuni (obiettivo 3000 per gruppo), hanno NDVI

estratto dal composito estivo 2026. La soglia ottimale è 0,168 per l'erbaceo (AUC 0,999) e 0,174 per l'arboreo (AUC 1,000): valori vicini, che giustificano una soglia unica. Si è scelto di mantenere 0,15, deliberatamente più permissiva, documentando entrambi i valori. Il limite va dichiarato: AUC prossime a 1 sono attese perché i riferimenti HRL sono i casi facili, agli estremi dello spettro, e non misurano la discriminazione su pixel ambigui o misti (prato semi-secco, cortile a copertura mista), che sono il caso più rilevante per classi come GU3 e GU5. Un controllo visivo su GU3 ha mostrato che gran parte delle riduzioni di flag è marginale (per esempio 0,9997 contro 1, rumore di bordo pixel) e che il segnale informativo è nella coda bassa della distribuzione, per esempio nei cortili del tutto privi di vegetazione.

Il lato blu del QC (MNDWI) è sospeso: per BI il flag resta al valore di base. Le cause sono due: un mascheramento SCL troppo aggressivo sull'acqua nei compositi, da correggere a monte, e la dinamicità geomorfologica dei corsi d'acqua naturali rispetto a un poligono statico. Il codice CLC 511 riunisce però corsi naturali e canali artificiali e serve un attributo aggiuntivo (tipologia idrografica BDTRE o tag OSM) non ancora disponibile.

4 Pilastro 2: rete di monitoraggio termoigrometrico in situ

4.1 Disegno della rete

La rete usa sensori SwitchBot Outdoor Meter IP65 con chip Sensirion SHT40 (accuratezza tipica ±0,2 °C [10]), installati a 4-5 m dal suolo, con schermo antiradiazione passivo, registrazione continua e scarico manuale via Bluetooth. Il basso costo consente una densità di punti elevata ma ha due conseguenze, affrontate nel protocollo [12]. Il *bias* da radiazione degli schermi passivi può raggiungere 2–2,5 °C con sole intenso e vento inferiore a 1 m/s [5,6] ed è differenziale tra le posizioni del transetto, per cui può amplificare il gradiente nelle ore di picco; lo si mitiga con schermo standardizzato, calibrazione e marcatura dei dati diurni a bassa nuvolosità. Vento e radiazione non sono misurati in situ e provengono dalle stazioni ARPA; per un confronto diretto della temperatura dell'aria sono utilizzabili solo quelle con sensore a quota compatibile con il posizionamento (Vallere e Giardini Reali), non le stazioni su tetto.

Gli indicatori, standard nella letteratura sul raffrescamento dei parchi [8,9], sono l'intensità dell'isola fresca (PCI, differenza tra un sito di riferimento urbano e il nucleo dell'IV), la distanza di raffrescamento (PCD, distanza dal bordo oltre cui la temperatura rientra entro ±0,3 °C dal riferimento) e il gradiente termico (Gtemp, in °C/100 m lungo il transetto esterno). Servono perciò sensori dentro l'IV e a distanze progressive fuori, più almeno due siti di riferimento urbano impermeabilizzati nella stessa zona climatica locale [2], senza verde nel raggio di 200 m (Fig. 2).

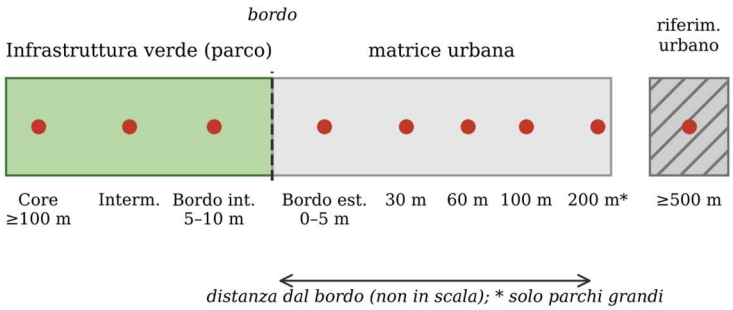

Fig. 2. Schema del transetto per un parco urbano: posizioni dei sensori rispetto al bordo dell'IV e sito di riferimento urbano (distanze indicative, protocollo [12]).

4.2 Intercalibrazione dei sensori

Tra il 7 e il 15 luglio 2026 tutti i sensori sono stati co-localizzati nelle stesse condizioni di esposizione per stimare gli scostamenti sistematici, che il protocollo prevede di applicare come correzione additiva rispetto alla mediana dell'insieme. Il 100 % dei sensori rientra nella soglia operativa di ±0,4 °C, pari al doppio dell'accuratezza dichiarata e scelta come margine conservativo; le anomalie residue sono dominate dalla radiazione solare tra le 12:00 e le 17:00. Tre sensori (ENEA_074, 063 e 022) mostrano un andamento notturno anomalo non spiegato: l'ipotesi di condensa è stata scartata e il caso resta aperto. L'analisi è stata condotta sull'intera finestra e sulla sola fascia notturna (22:00–05:00), meno soggetta al *bias* da radiazione; gli schermi sono stati poi installati su tutti i sensori.

5 Discussione: trasferibilità e vincoli operativi

L'esperienza finora maturata suggerisce quattro indicazioni per replicare servizi di questo tipo presso altre amministrazioni. La prima è la tracciabilità: conservare per ogni poligono fonte, valore e modulo che lo ha prodotto, ed esplicitare ogni caso non gestito, permette all'ente destinatario di capire perché una classe è stata assegnata o declassata e di correggere gli input senza rifare la classificazione. La seconda è la calibrazione delle soglie: anche una soglia semplice come quella NDVI va verificata su riferimenti indipendenti, dichiarando i casi su cui la verifica non informa. La terza riguarda i dati ausiliari europei: gli errori sugli HRL sono emersi da valori fuori intervallo, e controlli di intervallo sistematici all'ingresso di ogni prodotto li avrebbero intercettati. La quarta riguarda la rete in situ: i vincoli di un sensore economico (radiazione, assenza di vento, quota unica) sono compatibili con gli obiettivi solo se dichiarati e gestiti nelle analisi, e il numero di tipologie e di città determina la generalizzabilità; oggi la rete comprende tre tipologie a Torino e due contesti a Ciriè, mentre boschi e verde minuto previsti dal protocollo non sono rappresentati nella configurazione attuale.

6 Conclusioni e sviluppi

La prima fase di M²UHIP ha prodotto un'architettura documentata e in parte già operativa per la mappatura e la valutazione funzionale delle IV/IB, e una rete in situ intercalibrata e in acquisizione. Gli sviluppi immediati sono la consegna della mappa classificata delle aree pilota e del codice, la quantificazione dell'accuratezza con validazione LiDAR su campione stratificato, la ripresa del lato blu del QC, il completamento dell'installazione e la risoluzione dei punti di riferimento urbano mancanti in alcuni siti. Il confronto tra i gradienti in situ e i prodotti derivati da osservazione da remoto non sono ancora disponibile: richiedendo una serie più estesa andrà condotto distinguendo temperatura dell'aria e superficiale. Infatti, utilizzando prodotti satellitari a diverse risoluzioni spaziali e temporali il progetto prevede di produrre un prodotto integrato di temperatura superficiale a 100m di risoluzione mediante un Gaussian process per diverse finestre temporali notturne ed una diurna. Questo prodotto corredato dal suo errore verrà poi usato per delle stime di temperature dell'aria a 2m nell'ambito di un modello di machine learning che farà anche uso delle informazioni prodotte nel pilastro 1 sulle infrastrutture verdi, blu e grigie. Il prodotto t2m verrà poi utilizzato per stimare PCD, PCI e Gtemp nelle finestre temporali disponibili.
Su questa base saranno forniti a Regione Piemonte e ai comuni mappe di sintesi e indicatori leggibili senza competenze specialistiche, da affinare in co-progettazione con gli enti destinatari.

Ringraziamenti. Lavoro svolto nell'ambito del progetto M²UHIP (CUP F13C25001160001), finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana nel programma I4DP_PA. Si ringraziano gli uffici tecnici dei Comuni di Torino e Ciriè e di IREN S.p.A. che hanno garantito supporto operativo, logistico e autorizzativo nelle diverse fasi dell'intervento.

7 Riferimenti bibliografici

1. Arnold, S. et al.: The EAGLE concept – a vision of a future European Land Monitoring Framework. In: Proceedings of the 33rd EARSeL Symposium, Matera (2013).
2. Stewart, I.D., Oke, T.R.: Local Climate Zones for urban temperature studies. Bull. Am. Meteorol. Soc. 93(12), 1879–1900 (2012).
3. Soille, P., Vogt, P.: Morphological segmentation of binary patterns. Pattern Recognit. Lett. 30, 456–459 (2009).
4. Youden, W.J.: Index for rating diagnostic tests. Cancer 3(1), 32–35 (1950).
5. Nakamura, R., Mahrt, L.: Air temperature measurement errors in naturally ventilated radiation shields. J. Atmos. Ocean. Technol. 22(7), 1046–1058 (2005).
6. Gubler, M. et al.: Assessing the thermal performance of low-cost temperature measurement solutions in outdoor urban microclimate monitoring. Urban Clim. 37, 100856 (2021).
7. WMO: Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8), 2021 edn. World Meteorological Organization, Geneva (2021).
8. Algretawee, H. et al.: The effect of graduated urban park size on park cooling island and distance relative to land surface temperature. Urban For. Urban Green. 74, 127677 (2022).

9. Spronken-Smith, R.A., Oke, T.R.: The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates. Int. J. Remote Sens. 19(11), 2085–2104 (1998).
10. Sensirion AG: SHT40 Datasheet, v1.2. Sensirion, Stäfa (2023).
11. ENEA: M²UHIP – DEL 5.1.1 Classificazione delle Infrastrutture Verdi e Blu, WP5101. Documento di progetto, maggio 2026.