



Elenchi dei contenuti disponibili su [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Urban Climate

Homepage della rivista: www.elsevier.com/locate/ucim



Mappatura GIS-MCDA orientata all'equità dei tetti urbani per tetti verdi e impianti fotovoltaici: concorrenza e sinergie a Padova, Italia*

Abdullah Ahmadi^{a,b}, Daniele Codato^{a,b,*}, Francesca Peroni^{a,c}, Massimo De Marchi^{a,b}

^a Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università di Padova, via Marzolo 9, 35131 Padova, Italia

^b Centro di eccellenza Jean Monnet Just Fossil Fuel Transition, via Marzolo 9, 35131 Padova, Italia

^c School of Geographical Sciences and Urban Planning, Arizona State University, Stati Uniti

I N F O R M A Z I O N I

Parole chiave

Infrastrutture verdi sui tetti
Impianti fotovoltaici
Mappatura della vulnerabilità
Piano d'azione per l'energia sostenibile
Isole di calore urbane
Modellizzazione GIS
Giustizia climatica urbana

A B S T R A C T

I cambiamenti climatici e l'urbanizzazione intensificano i rischi ambientali e aggravano le disuguaglianze sociali, rendendo necessarie strategie di adattamento e mitigazione eque. I tetti urbani offrono spazi multifunzionali non sfruttati per azioni climatiche integrate. Tuttavia, la loro valutazione è spesso limitata ad approcci basati su una singola tecnologia, trascurando prospettive integrate. Questo studio presenta il modello Roof-tops for Equity and Sustainability (RT4ES), un'analisi decisionale multicriteriale basata sul GIS che combina l'idoneità dei tetti con una prioritizzazione informata sulla vulnerabilità. Utilizzando dati spaziali ad accesso libero, RT4ES valuta la fattibilità di tetti verdi estensivi e intensivi, giardini pensili e impianti fotovoltaici, integrando indici di vulnerabilità socioeconomica e ambientale. Applicato a Padova (Italia), il modello identifica 11,67 km² di tetti idonei netti su 29.493 edifici, con particolare attenzione alle zone orientali, nord-orientali e centrali dove convergono fattibilità e vulnerabilità. L'opportunità complessiva di inverdimento dei tetti produce circa 10,94 km² di superfici vegetate aggiuntive, che corrispondono al 20,95% dello stock di spazi verdi inventariati a terra. Per quanto riguarda il potenziale dei pannelli fotovoltaici sui tetti, questo produce circa il 302% del consumo elettrico delle famiglie comunali. I risultati suggeriscono che i tetti verdi e i pannelli fotovoltaici individuali e co-localizzati migliorano sia l'efficienza energetica che i servizi ecosistemici. Incorporando la vulnerabilità sociale e ambientale, RT4ES riorienta le priorità verso quartieri compatti e svantaggiati, promuovendo l'inclusività e la resilienza. Questo strumento open source e replicabile supporta una pianificazione equa e multifunzionale dei tetti, in linea con i quadri normativi locali e internazionali.

1. Introduzione

L'urbanizzazione continua ad accelerare in tutto il mondo, aumentando le pressioni ambientali nelle città. Attualmente più della metà della popolazione mondiale vive in aree urbane, una cifra che secondo le previsioni raggiungerà il 68% entro il 2050 (Nazioni Unite, Dipartimento degli affari economici e sociali, Divisione popolazione, 2019). I centri urbani rappresentano inoltre circa il 75% del consumo energetico globale e producono il 70% delle

☆ Questo articolo fa parte di un numero speciale intitolato: "Cambiamenti climatici e città" pubblicato su Urban Climate.

* Autore corrispondente.

Indirizzo e-mail: daniele.codato@unipd.it (D. Codato).

<https://doi.org/10.1016/j.ucim.2026.102840>

Ricevuto il 17 ottobre 2025; Ricevuto in forma revisionata il 22 dicembre 2025; Accettato il 16 febbraio 2026

Disponibile online il 24 febbraio 2026

2212-0955/© 2026 Gli Autori/i. Pubblicato da Elsevier B.V. Questo è un accesso aperto articolo sotto la licenza CC BY

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

***Versione non ufficiale in lingua italiana tradotta in maniera automatica con intelligenza artificiale. Fare riferimento al testo originale in inglese a questo link**

<https://doi.org/10.1016/j.ucim.2026.102840>

emissioni di CO₂ legate all'energia (Agenzia internazionale per l'energia, 2021). Nel frattempo, il riscaldamento globale ha aumentato le temperature medie superficiali di circa 1,1 °C rispetto ai livelli preindustriali (Lee et al., 2023). Insieme, queste tendenze rendono le città punti cardine sia per gli sforzi di mitigazione che di adattamento climatico. Di conseguenza, i rischi climatici, tra cui l'effetto isola di calore urbana (UHI), le inondazioni improvvise, l'inquinamento atmosferico e la perdita di biodiversità si stanno già intensificando, danneggiando sia l'ambiente che le persone, con le comunità a basso reddito ed emarginate che sopportano un onere sproporzionato (Calvin et al., 2023; Harlan et al., 2006).

Negli ultimi dieci anni, gli urbanisti hanno riconosciuto il ruolo dei servizi ecosistemici nell'affrontare i rischi urbani legati al clima, compresi quelli sopra menzionati (Carter e Fowler, 2008; Dong et al., 2020; Kumar et al., 2025; Santos et al., 2016). In questo contesto, le infrastrutture verdi (GI), come parchi, alberi lungo le strade, foreste urbane e agricoltura urbana, possono contribuire a mitigare questi rischi, offrendo al contempo benefici collaterali per l'adattamento ai cambiamenti climatici, la salute pubblica e l'equità urbana (Chen et al., 2024; Codato et al., 2024; Demuzere et al., 2014). Tra le opzioni di GI, i tetti verdi (GR) e i giardini pensili (RG) si distinguono perché riadattano gli spazi sottoutilizzati dei tetti per fornire raffreddamento a livello di edificio e di quartiere, attenuare il deflusso superficiale, migliorare la qualità dell'aria e fornire habitat per la biodiversità (Kostadinovič et al., 2023; Madre et al., 2014; Marín et al., 2023). Tra le opzioni di GR, le tipologie più prese in considerazione sono i tetti verdi estensivi (EGR), sistemi vegetali leggeri con substrati poco profondi (in genere meno di 10-15 cm) e comunità vegetali a crescita bassa e resistenti allo stress; i tetti verdi intensivi (IGR), sistemi con substrati più profondi (superiori a 15 cm) che supportano colture più diverse (ad esempio prati, arbusti, piccoli alberi); e i giardini pensili (RG), paesaggi accessibili sui tetti per scopi ricreativi e/o per la produzione alimentare (Harada e Whitlow, 2020; Oberndorfer et al., 2007; Ma et al., 2024a).

Nelle più recenti strategie dell'UE, i GR sono considerati soluzioni strategiche per ripristinare i servizi ecosistemici e adattare le città ai cambiamenti climatici. Secondo la Strategia dell'UE per il suolo per il 2030, i tetti consentono il riutilizzo di terreni già occupati o impermeabilizzati, come riportato dalla Gerarchia dell'occupazione del suolo (Commissione europea, 2021). La Strategia dell'UE per la biodiversità per il 2030 sottolinea il ruolo dei GR come interventi strategici che dovrebbero essere inclusi nei nuovi piani di inverdimento urbano, contribuendo alla biodiversità, alla resilienza climatica e a una migliore sostenibilità urbana e pianificazione equa (Commissione europea, 2020). Infatti, nelle città densamente edificate, i tetti costituiscono tipicamente il 20-25% della superficie urbana planimetrica (Nguyen Dang et al., 2022). Dato lo spazio limitato a livello del suolo e l'ampia impermeabilizzazione delle superfici, questo paesaggio dei tetti offre ulteriori opportunità, mitiga alcuni servizi ecosistemici persi con l'impermeabilità e al contempo fornisce una piattaforma ulteriore o alternativa per le strategie di decarbonizzazione (Dong e He, 2023). Inoltre, anche i GR piccoli e semplici possono offrire momenti di rigenerazione ai cittadini laddove non sono possibili interventi più sostanziali e spazi pubblici (Mesima'ki et al., 2019). Tuttavia, come riportato dalla letteratura scientifica, esistono diversi ostacoli all'adozione di queste soluzioni. Come riportato da Liberalesso et al. (2020), nonostante il riconosciuto valore ambientale e sociale dei GR, un persistente squilibrio tra i loro benefici più ampi e le valutazioni finanziarie, determinato dagli elevati costi iniziali e di manutenzione, limita gli investimenti privati, spingendo i comuni di tutto il mondo a fare affidamento su politiche di incentivazione, in particolare sussidi finanziari e obblighi normativi, per sostenerne l'adozione. Inoltre, mentre in alcuni paesi, come ad esempio la Cina, l'urbanizzazione accelerata ha portato a una rapida espansione degli edifici e, di conseguenza, dei nuovi tetti, nei paesi europei lo spazio limitato non consente la costruzione di nuovi edifici. Pertanto, la maggior parte degli sforzi dovrebbe essere rivolta alla ristrutturazione degli edifici esistenti, evitando il greenwashing di alcuni GR e, allo stesso tempo, testando tecnologie diverse dai GR tradizionali, che potrebbero essere pesanti per le costruzioni esistenti e vecchie (Wo'jcik-Madej et al., 2026; Yan et al., 2026).

Un ruolo ampiamente riconosciuto dei tetti è anche il loro utilizzo per ospitare impianti fotovoltaici (PV). Le fonti di energia rinnovabile vengono sempre più utilizzate per migliorare la sicurezza dell'approvvigionamento, mitigare i cambiamenti climatici e ridurre i costi energetici delle famiglie (Baranes et al., 2017). In Europa, la produzione di energia fotovoltaica è aumentata di circa 36 TWh nel 2023, raggiungendo circa il 9% dell'elettricità totale dell'UE (Brown e Jones, 2024). Il Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico (IPCC) identifica la rapida decarbonizzazione dell'elettricità, guidata dal calo dei costi dei PV (e dello stoccaggio), come fondamentale per la mitigazione a breve termine, rafforzando la logica dei PV integrati negli edifici per ridurre le emissioni operative e l'esposizione alla volatilità dei prezzi dei combustibili fossili (Clark et al., 2008). Oltre alle tradizionali installazioni sui tetti, soluzioni più recenti come il fotovoltaico integrato negli edifici (BIPV) estendono la raccolta di energia solare oltre i tetti alle facciate, ai lucernari e ad altri elementi dell'involucro edilizio, in particolare nei centri urbani densamente popolati dove lo spazio sui tetti è limitato (Martín-Chivelet et al., 2022; Ni et al., 2025). Tuttavia, nonostante il loro potenziale, le valutazioni su scala urbana dei BIPV rimangono limitate dalla disponibilità di dati, dalla complessità della modellizzazione e dalle barriere normative ed economiche (Dehghanimadvar et al., 2022; Ni et al., 2023).

In questo contesto, le tecnologie relative ai tetti sono promosse nella pianificazione territoriale dai responsabili politici dell'UE come strategia praticabile per migliorare la mitigazione e l'adattamento ai cambiamenti climatici, la transizione energetica e la resilienza urbana complessiva (Cruz Torres et al., 2023). Tuttavia, sia a livello accademico che politico, gli interventi sui tetti sono generalmente considerati come risposte basate su una singola tecnologia. Sebbene vi sia un crescente interesse per la combinazione di queste due tecnologie, la letteratura accademica esistente rimane frammentaria, poiché la maggior parte degli studi si concentra su aspetti prestazionali isolati piuttosto che sulle sinergie integrate e scalabili tra questi sistemi (Yan et al., 2026). Questa frammentazione porta ad analisi che valutano i GR o i PV per scopi isolati, come la regolazione del microclima, l'energia rinnovabile o le emissioni di CO₂ (Islam et al., 2023; Melius et al., 2013; Rowe, 2010). Ad esempio, una revisione sistematica di Abdalazeem et al. (2022) mostra che solo un numero limitato di studi (28) esamina congiuntamente l'integrazione tra PV e GR, in relazione alle prestazioni di tre parametri principali (mitigazione dell'UHI, risparmio energetico e comfort termico interno), mentre la maggior parte degli articoli (157) ha analizzato i GR individualmente. Di conseguenza, le prestazioni di questi sistemi combinati, in contesti climatici diversi, necessitano di un'indagine più approfondita, soprattutto durante la stagione invernale, che non è stata affrontata in modo esplicito in nessuno degli studi esaminati.

Questa prospettiva spesso trascura i vantaggi derivanti dalla valutazione congiunta di più sistemi e dalle opportunità sinergiche, limitando così i benefici ambientali e le opportunità di utilizzi collettivi, sinergici e multifunzionali. Ad esempio, studi recenti mostrano un miglioramento delle prestazioni delle configurazioni "bio-solari" integrate che collocano i pannelli fotovoltaici insieme a tetti vegetati, piuttosto che utilizzare un unico sistema (Van Der Roest et al., 2023). Ad esempio, Alonso-Marroquin e Qadir (2023) hanno riportato come l'integrazione dei pannelli fotovoltaici con i GR migliorasse il comfort termico interno di circa il 6% rispetto ai pannelli fotovoltaici convenzionali, abbassando contemporaneamente le temperature di funzionamento dei pannelli fotovoltaici fino a 8 °C e contribuendo a prolungare la durata dei moduli fotovoltaici.

L'integrazione dei due sistemi presenta molteplici sfide tecniche, economiche e contestuali che continuano a limitare la diffusione delle soluzioni fotovoltaiche e dei GR in diverse regioni (Shafique et al., 2020). Come già accennato, mancano dati sperimentali completi sulle sinergie tra GR e PV, sulla posizione e l'altezza di separazione appropriate del sistema fotovoltaico sul GR (Baumann et al., 2019; Osma-Pinto e Ordoñez-Plata, 2019) e sui tipi di impianti più adatti per ridurre, ad esempio, la temperatura superficiale dei pannelli fotovoltaici. Inoltre, una sfida fondamentale per la diffusione dei sistemi fotovoltaici e dei GR risiede nella mancanza di soluzioni di progettazione industriale mature e di quadri di manutenzione a lungo termine, insieme alla scarsa consapevolezza tra i professionisti e le parti interessate dei loro vantaggi in termini di prestazioni e efficienza sostenibili (Fouad et al., 2017). Le principali difficoltà tecniche includono la scarsa consapevolezza dei loro vantaggi, soprattutto nei paesi in via di sviluppo, gli elevati costi iniziali dei sistemi, la mancanza di leggi e regolamenti di sostegno e i vincoli geografici e architettonici, come lo spazio insufficiente sui tetti e l'esposizione solare limitata nei contesti urbani densamente popolati (Karakaya e Sriwannaawit, 2015; Liberalesso et al., 2020; Olowu et al., 2018; Zhang et al., 2012). Per garantire che le soluzioni di GI e di energia rinnovabile non generino espropriazioni socio-ambientali, sfollamenti o il rafforzamento degli interessi delle élite, è necessario un approccio orientato alla giustizia nella loro progettazione e implementazione (Mohtat e Khirfan, 2021). Gli studiosi hanno progressivamente evidenziato come le soluzioni GI e basate sulla natura possano determinare un aumento del valore degli immobili e degli affitti, contribuendo ai processi di gentrificazione, intensificando l'esposizione e la vulnerabilità dei gruppi emarginati e portando infine allo sfollamento delle popolazioni socio-economicamente svantaggiate (Angelovski et al., 2019; Brown et al., 2012; Juhola, 2016). Questi rischi rendono chiaro che il successo delle GR e delle PV non può essere valutato esclusivamente in termini tecnici o ambientali. Piuttosto, la loro pianificazione e implementazione devono basarsi su un'attenta valutazione di dove e per chi tali interventi vengono attuati, garantendo benefici sia per gli ecosistemi che per il benessere dei cittadini, contribuendo al contempo a una pianificazione urbana giusta ed equa. In questo senso, come sottolineato da Angelovski et al. (2024), la pianificazione dei rischi climatici dovrebbe dare esplicita priorità alle esigenze e alla protezione delle persone, in particolare quelli più vulnerabili.

Gli studi precedenti si sono concentrati principalmente sugli aspetti di fattibilità tecnica ed economica dei GR e dei PV. Essi hanno utilizzato principalmente analisi multicriteriali (di seguito MCDA, acronimo di Multicriteria Decision Analysis) abbinate a sistemi informativi geografici (GIS) per mappare i tetti idonei in base a fattori quali la superficie e la pendenza del tetto, la capacità di carico, l'effetto di ombreggiamento o l'esposizione alla luce solare (Favretto, 2018; Clark et al., 2008; Greene et al., 2011; Palmer et al., 2018).

Questi studi hanno notevolmente migliorato la capacità di quantificare il potenziale dei tetti nella pianificazione urbana. Tuttavia, gran parte della letteratura tratta l'implementazione di queste tecnologie come un esercizio di ottimizzazione puramente fisico, prestando poca attenzione a dove la pianificazione sarebbe più vantaggiosa sia per i cittadini che per l'ambiente circostante. Di conseguenza, viene prestata relativamente poca attenzione all'integrazione dei criteri di giustizia climatica ed equità nella pianificazione delle GI.

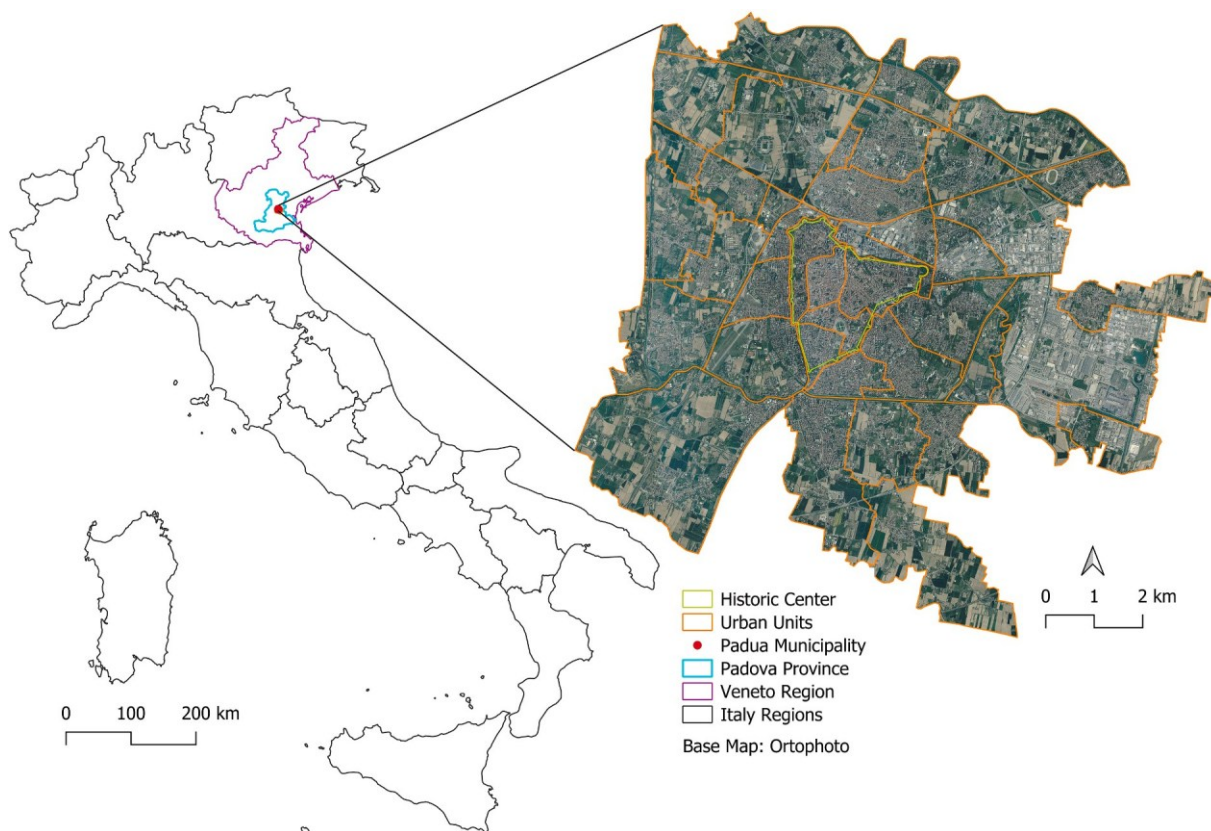


Fig. 1. Contesto spaziale dell'area di studio, compresi i confini comunali e le quaranta unità urbane (UU) utilizzate per la gestione subcomunale e a fini statistici.

Caniglia et al. (2017) concordano sul fatto che esistono diversi modi per raggiungere la resilienza urbana, ma non tutti promuovono la giustizia sociale e ambientale. Pertanto, le prestazioni della GI in termini di resilienza urbana sono una questione complessa che richiede una ricerca quantitativa più approfondita che comprenda non solo l'idoneità fisica, ma anche gli aspetti socioeconomici e ambientali. Sulla base di queste premesse, la presente ricerca sviluppa un quadro GIS-MCDA per valutare l'idoneità dei tetti alla riqualificazione della GI e all'integrazione delle energie rinnovabili, con l'obiettivo di sostenere una pianificazione urbana più giusta ed equa. Si concentra sull'identificazione di come diverse strategie relative ai tetti (GR, RG e PV) possono contribuire congiuntamente alle prestazioni ambientali e alla resilienza sociale.

Gli obiettivi specifici sono: (i) valutare l'idoneità fisica e spaziale dei tetti per diverse opzioni GI e PV; (ii) analizzare le loro potenziali sinergie e competizioni in termini di spazio e funzione (Slootweg et al., 2023); e (iii) costruire un indice composito di vulnerabilità socio-economica e ambientale per individuare le unità urbane (UU) in cui gli interventi possono produrre i maggiori benefici collaterali. Il quadro è applicato al comune di Padova, in Italia, una città europea di medie dimensioni (Busato et al., 2014; Codato et al., 2024; Pristeri et al., 2021).

2. Materiali e metodi

2.1. Area di studio

L'area di studio comprende la città di Padova (45,4167° N, 11,8667° E) nella regione italiana del Veneto. Il comune è situato su una pianura alluvionale di 93,3 km², conta circa 210.000 abitanti (Comune di Padova, 2024) e funge da importante centro culturale, economico e accademico nel nord-est dell'Italia. La Fig. 1 mostra l'ubicazione del comune di Padova in Italia, il suo centro storico e le quaranta unità urbane (UU, per i nomi delle UU si veda il Materiale supplementare 4.1), utilizzate per la gestione sub-comunale e a fini statistici.

Le sfide climatiche e ambientali di Padova sono aggravate dai cambiamenti climatici e dalla rapida espansione urbana che ha seguito la seconda guerra mondiale (Peroni et al., 2023). La città presenta un pronunciato effetto UHI, con temperature dell'aria nel centro densamente edificato che raggiungono fino a 7 °C rispetto alle zone rurali circostanti, a causa dell'estesa impermeabilizzazione del suolo e dell'alta densità edilizia (Todeschi et al., 2022). Durante l'estate del 2022, le persistenti ondate di calore hanno fatto sì che le temperature massime diurne superassero costantemente i 35 °C, aggravando i rischi per la salute legati al calore per le popolazioni vulnerabili, in particolare gli anziani e i gruppi socioeconomicamente svantaggiati (Pappalardo et al., 2023).

Le statistiche relative all'impermeabilizzazione del suolo variano leggermente a seconda della scala di analisi e della metodologia utilizzata. Il monitoraggio dell'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) sull'impermeabilizzazione del suolo in Italia mostra una percentuale consolidata superiore al 47% dopo il 2006, in graduale aumento fino a circa il 49% nel 2023, con Padova al quinto posto tra i comuni italiani in termini di impermeabilizzazione del suolo (ISPRA, 2024). Pristeri et al. (2021), nella loro indagine sugli spazi verdi di Padova (comprese le aree agricole) basata su immagini ad alta risoluzione del 2015 e altri dati rilevanti, riferiscono che circa il 56% del territorio di Padova è verde, il che significa che circa il 44% non lo è. Inoltre, l'80% delle aree verdi è di proprietà privata, il che limita l'accesso al pubblico e contribuisce alla distribuzione iniqua dei servizi ecosistemici. Questa estesa copertura impermeabile ha amplificato il deflusso superficiale, diminuito la ricarica delle falde acquifere e aumentato il rischio di alluvioni. Di conseguenza, i frequenti eventi alluvionali superano la capacità di drenaggio, danneggiando le strutture pubbliche e le proprietà private (Bortolini e Brasola, 2022). Il declino dell'agricoltura tradizionale, causato dall'espansione urbana e dall'inquinamento, ha ulteriormente ridotto la biodiversità e eroso le conoscenze ecologiche locali, diminuendo la resilienza del paesaggio (Souviney et al., 2024; Peroni et al., 2023). Questa disparità di proprietà aggrava ulteriormente le disuguaglianze socio-spaziali, poiché i quartieri vulnerabili hanno un accesso ridotto alle aree verdi pubbliche.

Tabella 1

Riepilogo dei set di dati utilizzati in questo studio.

Seti di dati	Descrizione	Fonte	Formato	Anno di riferimento
Ortofoto	Immagini aeree ad alta risoluzione usate per fotointerpretazione e convalida	Geoportale Regione Veneto	Raster (20 cm/pixel)	2021
Modello Digitale di Superficie (DSM) e Modello Digitale del Terreno (DTM)	Derivati da rilievi LiDAR	Comune di Padova	Raster (50 cm/pixel)	2023
Temperatura di superficie	Derivati da Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2	USGS Earth Explorer	Raster (30 cm/pixel)	2023
Impronta degli edifici	Dati da banche dati topografici, inclusi geometria e utilizzo	Comune di Padova	Vettore (poligono)	2023
Impronta degli edifici da Open Street Map (OSM)	Dati dal programma OSM	OpenStreetMap	Vettore (poligono)	2025
Superfici impermeabili	Dati da banche dati topografici, incluse superfici impermeabili al suolo	Comune di Padova	Vettore (poligono)	2023
Dati socio-demografici	Dati statistici a livello di unità urbana	Comune di Padova (Comune di Padova, 2024)	Foglio di calcolo	2024
Dati economici	Numero di contribuenti e relativo reddito per CAP	Ministero dell'Economia e della Finanza	Foglio di calcolo e vettore (poligono)	2024
Unità urbane (UU) di Padova	40 unità urbane, divisioni sub-municipali usate per fini amministrativi e statistici	Comune di Padova	Vettore (poligono)	2023
Spazi verdi (privati)	Spazi verdi privati entro l'area di studio	Derivati da Pristeri et al. (2021)	Vettore (poligono)	2021
Parcheggi pubblici	Spazi verdi gestiti dal Comune di Padova	Comune di Padova	Vettore (poligono)	2023

L'utilizzo strategico degli spazi disponibili sui tetti e delle infrastrutture verdi può affrontare queste sfide ambientali interconnesse mitigando gli effetti dell'isola di calore urbana, gestendo le acque piovane e sostenendo la biodiversità attraverso l'espansione degli spazi verdi accessibili, oltre ad altri servizi ecosistemici. Questo approccio rende direttamente operativi i quadri politici di Padova, in particolare gli obiettivi di rimboschimento del masterplan di Boeri e il Piano Verde Comunale, promuovendo il mandato dell'SDG 11 per uno sviluppo urbano inclusivo e resiliente (Comune di, 2019; Comune di Padova, 2024).

2.2. Set di dati di input

Questo studio si è basato interamente su set di dati accessibili al pubblico e software open source. Le analisi spaziali e statistiche sono state eseguite in Google Earth Engine (GEE) (accesso nell'agosto 2025) e nel software QGIS (versione 3.40.7). Tutti i livelli spaziali sono stati convertiti nel sistema di coordinate Monte Mario / Italia Zona 1 (EPSG:3003). L'elenco dei set di dati è riportato nella Tabella 1 e il loro utilizzo è spiegato nella metodologia.

2.3. Metodologia

Questa ricerca utilizza un quadro di analisi spaziale in due fasi, ampiamente adottato nella letteratura recente, per (a) identificare i tetti idonei e (b) dare priorità a tali tetti sulla base di criteri di vulnerabilità socioeconomica e ambientale (Grunwald et al., 2017; Palmer et al., 2018). Nello specifico, abbiamo sviluppato un quadro basato su GIS-MCDA, il modello Rooftops for Equity and Sustainability (RT4ES), per identificare i tetti adatti alle applicazioni GR e PV e per dare priorità a quelli adatti all'interno delle UU che richiedono un inverdimento mirato e investimenti in energia solare, migliorando così la resilienza climatica urbana attraverso una pianificazione sociale e ambientale equa a Padova. Nella Fig. 2 è presentata una sintesi del flusso di lavoro complessivo descritto nelle sezioni seguenti, mentre la ricerca completa e il quadro metodologico sono forniti come abstract grafico nel Materiale supplementare 5.

2.3.1. Analisi dell'idoneità dei tetti

Per la prima parte del modello RT4ES, l'identificazione dei tetti potenzialmente idonei ha comportato diverse fasi di pre-elaborazione. Innanzitutto, abbiamo calcolato un modello digitale di superficie normalizzato (nDSM) sottraendo il modello digitale del terreno (DTM), che rappresenta la superficie del suolo nudo, dal modello digitale di superficie (DSM), che cattura l'elevazione di tutti gli oggetti visibili, compresi gli edifici e la vegetazione. Questa sottrazione isola le strutture fuori terra (Beumier e Idrissa, 2014; Khoshelham et al., 2010). È stato quindi applicato un filtro mediano con finestra 5×5 pixel al nDSM per sopprimere il rumore LiDAR e gli artefatti, come camini sui tetti, pianerottoli delle scale e altri oggetti di disturbo sui tetti, come alberi sporgenti, preservando al contempo i bordi dei tetti. Da questo set di dati è stato generato un raster di pendenza (in gradi). Per conservare solo le altezze reali degli edifici, i pixel nDSM con altezza zero sono stati convertiti in No Data, impedendo così che il terreno pianeggiante e le superfici non tetto influenzassero i calcoli della pendenza. Successivamente, il raster di pendenza pulito è stato mascherato utilizzando le impronte vettoriali degli edifici, assicurando che solo i pixel dei tetti rimanessero per l'analisi di idoneità. Infine, i pixel delle pendenze sono stati riclassificati in quattro categorie utilizzando l'algoritmo "Riclassifica per tabella" (vedi Tabella 2), con la classe 4 mascherata in quanto corrisponde ai bordi degli edifici. Prima del filtraggio quantitativo, abbiamo sovrapposto il raster classificato relativo alle pendenze all'ortofoto ad alta risoluzione per ispezionare visivamente e convalidare qualitativamente il risultato.

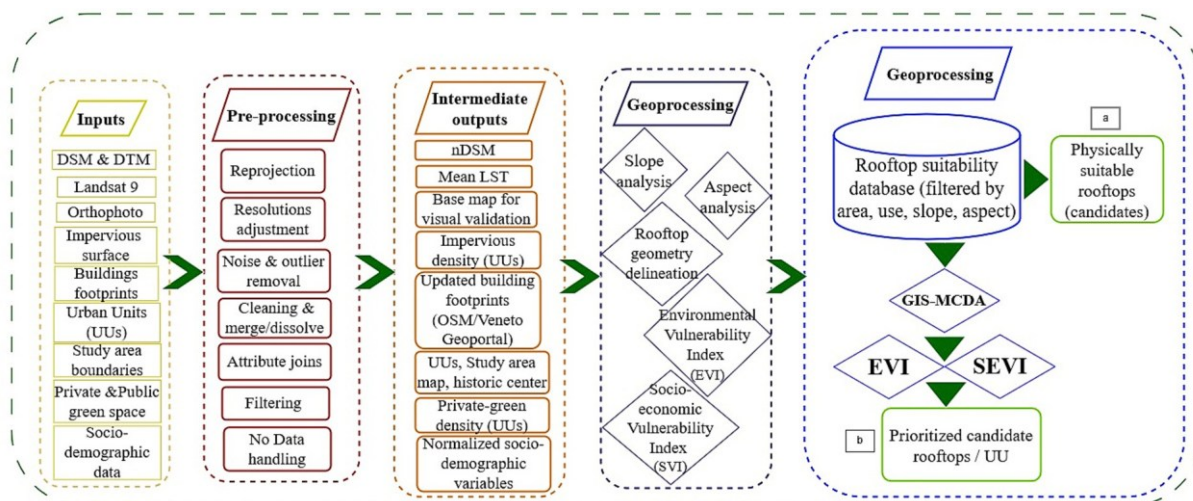


Fig. 2. Panoramica schematica del quadro metodologico RT4ES, che mostra le fasi sequenziali dall'immissione di dati provenienti da più fonti e dalla pre-elaborazione GIS, passando per i risultati intermedi, le analisi di geo-elaborazione e l'analisi decisionale multicriterio finale per l'idoneità dei tetti e l'analisi delle priorità. Acronimi: DSM (Modello digitale di superficie), DTM (Modello digitale del terreno), nDSM (Modello digitale di superficie normalizzato), LST (Temperatura della superficie terrestre), UU (Unità urbane), EVI (Indice di vulnerabilità ambientale), SEVI (Indice di vulnerabilità socioeconomica), GIS-MCDA (Sistema informativo geografico-Analisi decisionale multicriterio).

Tabella 2

Classi di pendenza con intervallo di pendenza e tipi di tetto assegnati pertinenti.

Classe	Intervallo di pendenza	Tipo di tetto
1	0–10°	Piatto
2	10–30°	Pendenza bassa
3	30–60°	Ripida
4	60–90°	Bordo

Per ogni classe di pendenza, abbiamo applicato lo strumento "Statistiche zonali" per calcolare le metriche per edificio, comprese le statistiche relative a minimo, massimo, mediana, somma e conteggio delle celle raster. Per consentire l'assegnazione specifica dell'intervento, la classe di pendenza dominante di ciascun tetto è stata quindi propagata in un campo attributo dedicato ("Classe tetto"). Ciò è stato ottenuto con l'espressione QGIS nel livello edificio "Tabella attributi" del livello dell'edificio, valutando il conteggio delle classi e popolandolo una nuova colonna, in modo che ogni tetto possa essere gestito e mappato direttamente per un'ulteriore analisi di idoneità. Per completare il database sull'idoneità dei tetti, abbiamo innanzitutto calcolato l'area planimetrica di ciascun poligono del tetto classificato; quindi, abbiamo applicato filtri di area minima corrispondenti al tipo di intervento:

- GR e PV: superiore a 100 m², in assenza di uno standard formale esistente, adottiamo un minimo di 100 m², in linea con le soglie comuni riportate in letteratura, economicamente sostenibile per i PV e paragonabile alle tipiche installazioni di GR (Lambarki et al., 2022; Mutani e Todeschi, 2020; Rafida, 2004; Santos et al., 2016);
- RG: superiore a 30 m², in linea con il Comune di Padova per gli orti comunitari, 30 m² come superficie minima pratica per gli orti comunitari in contesti urbani (Comune di, 2019).

L'orientamento delle falde dei tetti sono stati analizzati in base ai punti cardinali (0°–360°) utilizzando lo strumento di orientamento nell'ambiente QGIS, e le facciate esposte a nord (tra 315° e 45°) sono state identificate come quelle che ricevono meno irraggiamento solare annuale rispetto alle altre tre direzioni. Per quanto riguarda l'idoneità dei pannelli fotovoltaici sui tetti inclinati (10–45°), abbiamo escluso le facciate esposte a nord dall'area finale disponibile idonea. Inoltre, per supportare gli interventi specifici sui tetti, le geometrie dei tetti sono state classificate in residenziali e non residenziali.

categorie residenziali utilizzando attributi relativi all'uso degli edifici derivati principalmente dal database topografico comunale, integrati, ove necessario e quando disponibili, con dati estratti dal database OpenStreetMap (OSM) (www.openstreetmap.org). Il processo ha incluso la fusione delle caratteristiche degli edifici da OSM nel database topografico (del Comune di Padova), il completamento e l'aggiornamento delle categorie di edifici mancanti nel database dell'impronta degli edifici del Comune di Padova e il filtraggio delle geometrie che non soddisfacevano i criteri per il database finale dell'analisi di idoneità (ad esempio, area minima e uso dell'edificio). Questa categorizzazione ci ha permesso di:

- Limitare l'impiego di IGR e RG a edifici potenzialmente strutturalmente robusti, non residenziali o istituzionali con un'adeguata capacità di carico del ponte;
- Adattare l'installazione dei pannelli fotovoltaici su tetti a bassa pendenza, tetti montati (senza inclinazione) e su grandi tetti industriali dove la capacità strutturale e l'efficienza del layout consentono di realizzare impianti ad alta capacità; al contrario, i tetti piani (meno di 10°) richiedono generalmente un'inclinazione;
- Assegnare gli EGR principalmente a strutture residenziali con tolleranze di carico statico inferiori, sfruttando i loro sistemi di substrato leggero; il numero di EGR sui tetti non residenziali è trascurabile.

Nella **tabella 3** sono presentati i criteri di idoneità dei tetti, che definiscono la pendenza massima, l'area contigua minima e l'uso idoneo dell'edificio per quattro tipi di interventi: IGR, EGR, RG e PV, stabilendo così i criteri principali per l'analisi di idoneità.

Dopo un'attenta analisi visiva, i criteri di ombreggiamento non sono stati inclusi a causa della limitatezza dei dati e poiché il tessuto urbano prevalentemente basso di Padova comporta un ombreggiamento minimo tra i tetti. Le ortofoto ad alta risoluzione hanno ulteriormente confermato un panorama dei tetti relativamente omogeneo con un effetto di ombreggiamento trascurabile. Infine, la capacità di carico non è stata modellata a causa della limitatezza dei dati e della natura prospettica della nostra analisi; le valutazioni strutturali devono essere condotte caso per caso prima dell'installazione (Slootweg et al., 2023). I criteri riportati nella **tabella 3** hanno guidato l'identificazione dei tetti potenzialmente adatti ad ospitare IGR, EGR, RG o PV da soli o due o più sistemi insieme. Sulla base dei livelli di idoneità risultanti, sono state eseguite sovrapposizioni spaziali per individuare le UU in cui più sistemi potevano coesistere (sinergia) o competere per la stessa superficie del tetto (competizione). Questa procedura ha consentito la quantificazione di opportunità multifunzionali e vincoli spaziali all'interno del tessuto urbano esistente.

2.3.2. Priorità dei tetti idonei

I risultati della prima fase dello studio possono essere considerati autonomi, identificando i tetti adatti al verde urbano e alla produzione di energia solare in una città europea di medie dimensioni. Per una pianificazione urbana equa e orientata alla giustizia climatica, l'implementazione dovrebbe dare priorità ai tetti che massimizzano i co-benefici sociali e ambientali, al servizio delle comunità che affrontano deficit ambientali esistenti. Per passare dalla sola analisi dell'idoneità del verde e della produzione di energia solare, in questa fase analizziamo anche la priorità equa dei tetti idonei. Identificare le ubicazioni ottimali per gli interventi GI richiede la valutazione simultanea di molteplici variabili, spesso concorrenti, spaziali e non spaziali. Per affrontare questa complessità, il presente studio integra un GIS-MCDA, un abbinamento metodologico ampiamente riconosciuto per la sua efficacia nel processo decisionale spaziale (Chen et al., 2010; Malczewski, 2006). Il GIS-MCDA consente l'integrazione sistematica di diversi criteri, fisici, ambientali e socioeconomici, in un indice di idoneità composito, consentendo una prioritizzazione trasparente e replicabile delle unità spaziali. Il suo punto di forza risiede nella capacità di conciliare obiettivi contrastanti e assegnare un'importanza relativa a ciascun criterio, favorendo

Tabella 3

Soglie di intervento sui tetti: pendenza massima consentita, area contigua minima e idoneità dell'uso dell'edificio per ciascun tipo di intervento.

Intervento	Pendenza massima	Area minima	Destinazione d'uso dell'edificio
Tetto verde intensivo (IGR)	$\leq 10^\circ$ – i sistemi ingegnerizzati richiedono superfici quasi piane per impedire lo scivolamento del substrato e garantire una ritenzione uniforme dell'umidità (Kim et al., 2021; Mentens et al., 2006; Rafida, 2004).	$\geq 100 \text{ m}^2$ – sebbene non esista un minimo scientifico rigoroso, adottato per coerenza con la pratica ingegneristica e municipale comune (Lambarkiet al., 2025; Rafida, 2004).	Solo non residenziale – spesso per una maggiore capacità di carico morto (Wu et al., 2025).
Tetto verde estensivo (EGR)	$10\text{--}30^\circ$ – trattiene efficacemente l'acqua fino a pendenze moderate (Mentens et al., 2006; Rafida, 2004).	$\geq 100 \text{ m}^2$ – sebbene non esista un minimo scientifico rigoroso, adottato per coerenza con la pratica ingegneristica e municipale comune (Rafida, 2004).	Residenziale e non residenziale – capacità di carico più leggera.
Giardino urbano sul tetto (RG)	$\leq 10^\circ$ – tetti piani scelti per sostenere giardini pensili più grandi ed economici (Mentens et al., 2006; Xie et al., 2024).	$\geq 30 \text{ m}^2$ – minimo pratico per il giardinaggio su scala comunitaria (Comune di, 2019).	Abbiamo preso in considerazione tutti i tipi di edifici: uso flessibile dell'agricoltura urbana.
Impianti fotovoltaici (PV)	Ottimale: ≤ 10 e $10\text{--}45^\circ$ – in linea con la latitudine locale per l'irraggiamento massimo. Esclusione delle facciate esposte a nord sui tetti inclinati. (Jacobson e Jadhav, 2018).	$\geq 100 \text{ m}^2$ – in linea con la convenzione sui tetti verdi per consentire layout di impianti fotovoltaici economicamente vantaggiosi.	Tutti i tipi di edifici – ampia applicabilità del fotovoltaico, per tetti piani, solo edifici non residenziali.

così un processo decisionale equilibrato in condizioni di incertezza (Jankowski, 1995). Questo approccio è stato ampiamente applicato nella pianificazione dell'uso del territorio e nella gestione ambientale per identificare siti idonei per l'implementazione di aree verdi e impianti fotovoltaici, ottimizzando la fornitura di servizi ecosistemici e adattando gli interventi alle caratteristiche e ai vincoli specifici di ogni località (Bousquet et al., 2023; Meerow e Newell, 2017; Pochodyla-Ducka et al., 2025). Di conseguenza, nella seconda parte del modello RT4ES, i tetti adatti sono considerati prioritari su scala UU integrando indicatori di vulnerabilità socioeconomica e ambientale.

La percentuale di idoneità dei tetti è stata calcolata come rapporto tra l'area dei tetti idonei e l'area totale dei tetti all'interno di ciascuna UU e successivamente normalizzata utilizzando il metodo min-max (vedere Materiale supplementare 1). Successivamente, è stato sviluppato un indice composito di vulnerabilità socioeconomica (SEVI) calcolando prima la densità o la proporzione di ciascun indicatore selezionato a livello di UU, seguito dalla normalizzazione utilizzando il metodo min-max su una scala da (0-1) (vedi Materiale supplementare 2). Gli indicatori normalizzati sono stati quindi aggregati, ipotizzando una ponderazione uguale, in un unico indice composito che rappresenta la vulnerabilità socioeconomica nell'area di studio.

Come illustrato nella Tabella 4, sono stati selezionati sei indicatori socioeconomici per misurare la vulnerabilità su scala UU: basso reddito, background migratorio, residenti anziani, minori, dimensione del nucleo familiare e anziani che vivono da soli. Nella stessa tabella è riportata anche una sintesi delle motivazioni alla base di ciascun criterio socioeconomico. I dettagli completi sul calcolo della densità e delle proporzioni socioeconomiche sono forniti nel Materiale supplementare 2.

Analogamente, è stato sviluppato un Indice di vulnerabilità ambientale (EVI) aggregando indicatori ambientali normalizzati, ciascuno riscalo su un intervallo (0-1) per garantire la comparabilità. Per l'analisi dell'EVI sono stati considerati quattro criteri secondo la tabella 5: spazi verdi privati, parcheggi pubblici, temperatura della superficie terrestre (LST) e superficie impermeabile per UU. Descrizione completa del calcolo della LST

La formula, l'elenco delle immagini satellitari utilizzate per il calcolo dell'LST, il codice GEE, le mappe dell'LST medio e del 90° percentile e le mappe della copertura dei parcheggi privati e pubblici sono forniti nel Materiale supplementare 3. La tabella 5 fornisce la descrizione completa e la motivazione di ciascun criterio EVI.

2.3.3. GIS-MCDA

Dopo la normalizzazione e l'aggregazione degli indicatori descritti nel paragrafo 2.3 Metodologia, l'integrazione dei criteri multipli è stata realizzata tramite una tecnica di combinazione lineare ponderata (WLC) (vedi Materiale supplementare 1), scelta per la sua trasparenza e facilità di implementazione ed eseguita nell'ambiente QGIS (Bousquet et al., 2023). In questa procedura, ogni livello vettoriale standardizzato, che rappresenta l'idoneità fisica (tetti idonei), gli indici SEVI ed EVI, è stato moltiplicato per il rispettivo peso derivante dalla letteratura e dalla discussione degli esperti e successivamente sommato per ottenere il punteggio di priorità RT4ES per ogni intervento sui tetti. Abbiamo adottato una ponderazione di 0,25 per l'idoneità fisica, 0,35 per la vulnerabilità ambientale e 0,40 per la vulnerabilità socioeconomica. Questo equilibrio garantisce che l'idoneità dei tetti, lo stress ambientale urbano e l'equità sociale ricevano ciascuno la giusta enfasi nel nostro quadro finale di prioritizzazione RT4ES (Apud et al., 2020; Bakolo et al., 2024; Croeser et al., 2021; Megyesi et al., 2024).

Infine, la densità familiare è stata analizzata come ulteriore indicatore spaziale per contestualizzare ulteriormente i risultati prioritari. È stata calcolata come il numero totale di famiglie all'interno di ciascuna UU diviso per la sua area (famiglie/km²), rappresentando la concentrazione spaziale delle famiglie residenti (la mappa della densità familiare è fornita nel Materiale supplementare 4.7). Sebbene il SEVI incorporasse già diverse variabili demografiche e socioeconomiche, la densità familiare è stata esaminata per catturare l'esposizione della popolazione piuttosto che la vulnerabilità. Il livello risultante è stato classificato utilizzando il metodo quantile e sono stati visualizzati solo il primo e il quinto quantile, che rappresentano la densità familiare più bassa e più alta, per supportare il successivo confronto spaziale con i risultati della mappatura delle priorità.

Tabella 4

Indicatori socioeconomici utilizzati per costruire l'indice composito di vulnerabilità sociale (SEVI) su scala urbana, loro scopo nella valutazione della vulnerabilità e fonte relativa.

Indicatore	Motivo della valutazione della vulnerabilità	Descrizione	Riferimenti
Contribuenti con reddito annuo < 10.000 €	Indica una situazione di estrema deprivazione economica, che riduce la capacità di prepararsi e riprendersi da fattori di stress ambientali (ad esempio, mancanza di risorse per migliorare la propria abitazione, copertura assicurativa limitata).	Quota dei contribuenti totali in ciascuna UU	(Cutter et al., 2003; Schmidtlein et al., 2008)
Famiglie con ≥ 5 membri	Indica un potenziale sovraffollamento e un elevato indice di dipendenza, che aumentano il rischio durante ondate di calore, pandemie e carenze di risorse (ad esempio, più individui vulnerabili per abitazione).	Quota del totale in ciascuna UU	(Cutter et al., 2003; Frigerio e De Amicis, 2016; Schmidtlein et al., 2008)
Famiglie con bambini di età inferiore ai 2 anni	I bambini piccoli sono ripetutamente identificati come sensibili al calore in studi sulla vulnerabilità.	Quota del totale in ciascuna UU	(Khodadad et al., 2025)
Famiglie con ≥ 1 membro di età ≥ 60 anni	Riflette la vulnerabilità legata all'età, poiché gli anziani sono particolarmente esposti allo stress da calore, all'isolamento e alle limitazioni di mobilità durante le emergenze.	Quota del totale in ciascuna UU	(Frigerio e De Amicis, 2016; Oudin Åström et al., 2011)
Residenti con background migratorio	Coglie le barriere linguistiche, culturali e istituzionali all'accesso a informazioni e servizi, aumentando il rischio di esclusione dagli sforzi di preparazione e recupero.	Quota del totale in ciascuna UU	(Messeri et al., 2019)
65 anni che vivono da soli (isolamento sociale)	L'isolamento sociale aumenta ulteriormente il rischio; diversi studi epidemiologici collegano il vivere da soli a una maggiore mortalità legata al calore.	Quota del totale in ciascuna UU	(Pappalardo et al., 2023)

***Versione non ufficiale in lingua italiana tradotta in maniera automatica con intelligenza artificiale. Fare riferimento al testo originale in inglese a questo link <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2026.102840>**

Tabella 5

Descrizione e metodo dell'indice di vulnerabilità ambientale (EVI).

Indicatore	Descrizione	Motivo della valutazione della vulnerabilità	Riferimenti
Spazio verde privato	Percentuale di area verde privata in ciascuna UU. I dati vettoriali tratti da (Pristeri et al., 2021) sono stati aggiornati sottraendo l'impronta degli edifici del 2023.	Le UU con una minore presenza di spazi verdi privati sono più vulnerabili allo stress termico e alla riduzione del raffreddamento. L'assenza di ombreggiatura localizzata ed evapotraspirazione intensifica ulteriormente gli effetti dell'UHI e aumenta i rischi per la salute associati.	(Egerer et al., 2024; Godoi et al., 2025; Pristeri et al., 2021)
Superficie terrestre Temperatura (LST)	Temperatura media della superficie terrestre per l'estate del 2023 a livello UU, elaborata in GEE Landsat 2 livello 2 banda 10.	Una LST più elevata è direttamente correlata all'intensità dell'UHI, aumentando la mortalità e la morbilità legate al calore, in particolare nei quartieri a basso reddito con capacità di adattamento limitata.	(Dimitriou et al., 2025; Pappalardo et al., 2023; Krenz e Amann, 2025)
Parco pubblico rispetto al totale	Superficie totale dei parcheggi pubblici in m ² per famiglia all'interno di ciascuna UU.	Le UU con pochi parchi pubblici limitano l'accesso a spazi verdi freschi e rigeneranti, aggravando lo stress da calore e riducendo la capacità di adattamento, soprattutto per i residenti con un basso livello socioeconomico che dipendono dal verde pubblico piuttosto che da quello privato.	(Codato et al., 2024; Lin e Li, 2025; Zhang et al., 2024)
Superficie impermeabile	Percentuale di terreno coperto da superfici impermeabili in ciascuna UU.	Le superfici impermeabili amplificano l'assorbimento di calore e il deflusso, aumentando i rischi di alluvioni e UHI ed esacerbando le disuguaglianze ambientali nelle aree urbane con disparità socioeconomiche.	(Liu et al., 2020; Ma et al., 2024b; Shi et al., 2023)

3. Risultati

3.1. Tetti potenzialmente idonei

Nell'area oggetto dello studio, il modello identifica 11,67 km² di tetti idonei su 29.493 edifici. Nel complesso, l'idoneità dei tetti comprende insiemi di idoneità sovrapposti piuttosto che classi distinte. Riportando ogni intervento in base ai criteri definiti, i totali a livello cittadino sono: EGR (7,25 km² su 24.372 tetti), RG (3,69 km² su 5394 tetti), IGR (2,71 km² su 1194 tetti) e PV (11,93 km² su 30.372 tetti).

Poiché l'idoneità non è mutuamente esclusiva: (i) tetti piani di superficie superiore a 100 m² dove sono idonei sia i PV che gli IGR e gli RG, e (ii) tetti a bassa pendenza dove sono idonei sia gli EGR che i PV, i dati sono riportati separatamente e non devono essere aggregati. Per risolvere queste sovrapposizioni in modo rilevante dal punto di vista politico, analizziamo anche la sinergia (co-localizzazione fattibile) e la concorrenza (scelte alternative). I modelli spaziali sono coerenti con le aspettative: il potenziale EGR segue la distribuzione del patrimonio residenziale a bassa pendenza; gli IGR si concentrano su un numero minore di edifici non residenziali più grandi; gli RG estendono la copertura oltre i tetti piani inferiori a 100 m² per includere tetti piani più piccoli e residenziali; e i PV coprono tetti piani, a bassa pendenza e ripidi, con facciate esposte a nord escluse sui tetti inclinati. La tabella 6 riporta i totali non esclusivi.

La figura 3 mappa le classi dei tetti in base alla classe di pendenza dominante: i tetti piani sono concentrati a est e nord-est, principalmente all'interno del patrimonio non residenziale della zona industriale; i tetti a bassa pendenza, che costituiscono la maggior parte dell'area idonea, sono diffusi nel centro storico della città e nelle UU adiacenti a nord, sud e ovest, ma sono relativamente scarsi nella parte orientale, a differenza dei tetti piani; i tetti a falda sono meno diffusi e appaiono come sacche sparse in tutta l'area di studio, sia sugli edifici residenziali che su quelli non residenziali.

La Fig. 4 presenta il potenziale di idoneità a livello di unità urbanistiche per quattro interventi sui tetti (IGR, EGR, RG e PV), espresso in percentuale di superficie del tetto idonea rispetto alla superficie totale del tetto. Per una migliore comprensione, nel Materiale supplementare 4.8 sono fornite sovrapposizioni rappresentative a livello di edificio dei poligoni dei tetti idonei sull'ortofoto dell'area di studio.

In tutte le UU, l'idoneità potenziale per IGR, EGR, RG e PV presenta notevoli variazioni spaziali. L'elevata idoneità potenziale per IGR e RG è concentrata nei distretti industriali orientali e nord-orientali, dove sono comuni i tetti non residenziali grandi e piatti. Al contrario, l'idoneità è più bassa nel centro storico e nelle UU occidentali adiacenti, in particolare quelle meridionali e occidentali. L'EGR mostra un'elevata idoneità potenziale nel centro storico, in alcune zone sparse nelle aree meridionali e in alcune parti della zona occidentale, con il potenziale più basso presente nella parte orientale della città. I PV mostrano un potenziale altrettanto forte nel centro storico e nelle UU adiacenti a nord, così come nelle UU meridionali.

Tabella 6

Idoneità potenziale complessiva dei tetti per intervento (non esclusiva). Le categorie non si escludono a vicenda; a causa della sovrapposizione dell'idoneità, i dati sono riportati in modo indipendente e non devono essere sommati. I totali fotovoltaici escludono i tetti inclinati esposti a nord.

Intervento	Pendenza / Area minima	Destinazione d'uso dell'edificio	Esclusione delle facciate esposte a nord	Superficie (km ²)	Numero di tetti
Tetti verdi intensivi (IGR)	Piatto (0–10°), ≥100 m ²	Non residenziale	No	2.71	1194
Giardini urbani sui tetti (RG)	Piatto (0–10°), ≥30 m ²	Residenziale e non residenziale	No	3.69	5394
Tetti verdi estensivi	Pendenza ridotta (10–30°), ≥100 m ²	Residenziale e non residenziale	No	7.25	24,372
Fotovoltaico (PV)	Piatto (non residenziale), Pendenza ridotta (residenziale e non residenziale); Ripido (residenziale e non residenziale) (30–45°), ≥100 m ²	Come specificato per pendenza / utilizzo	Escluso nei tetti inclinati	11.93	30.372

Residenziale e non

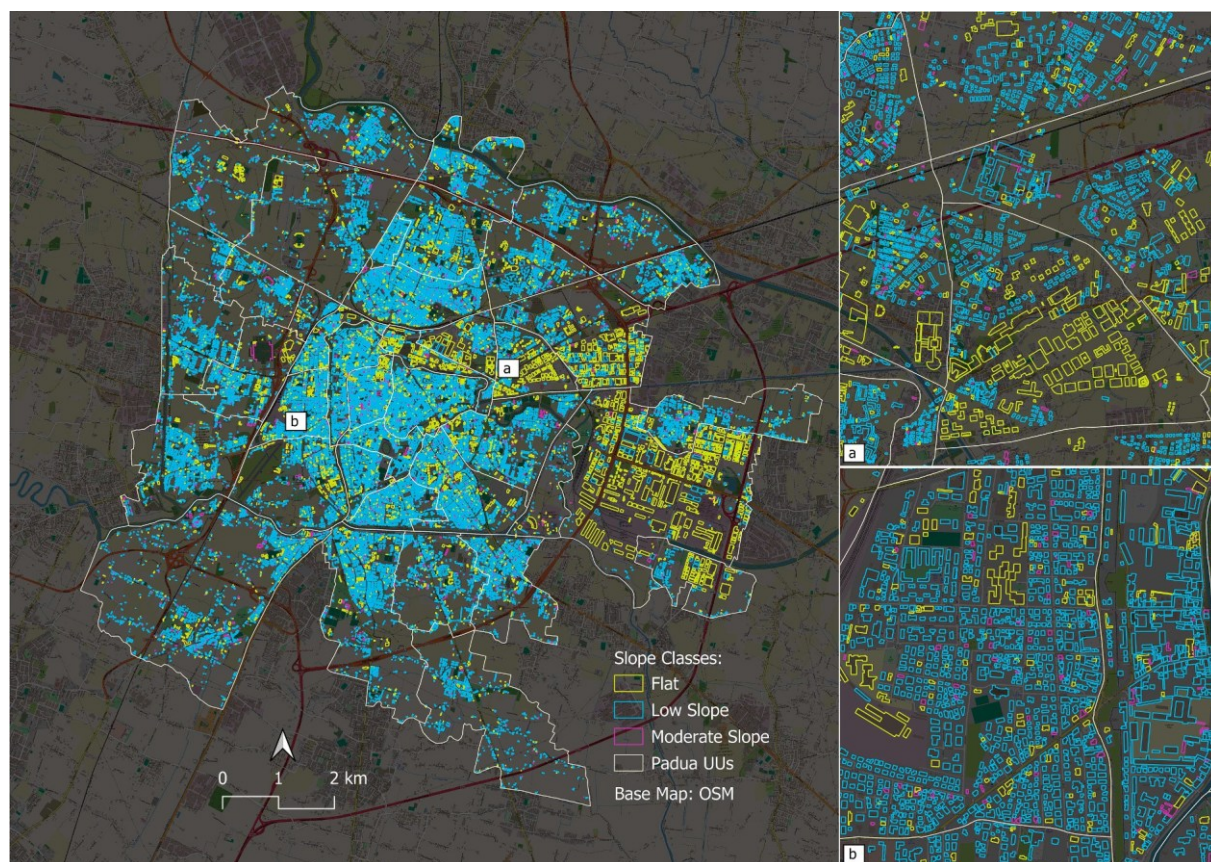


Fig. 3. Distribuzione spaziale dei tipi di tetto classificati in base alla classe di pendenza dominante del tetto.

3.1.1. Distribuzione spaziale dei tetti verdi e concorrenza e sinergie dei pannelli solari

Il modello RT4ES ha anche esplorato il potenziale geografico dello spazio sui tetti per fornire un surplus di verde e produrre energia rinnovabile, valutando le sinergie e la concorrenza tra i sistemi installati sui tetti.

I tetti a bassa pendenza sono adatti sia per l'EGR che per i PV, come mostra la Fig. 4: l'idoneità raggiunge il 90% per l'EGR e lo stesso vale per i PV, ma non possono essere combinati (Slootweg et al., 2023). Pertanto, il modello RT4ES mostra una sovrapposizione compresa tra il 16% e il 90%. Alcune UU mostrano una sovrapposizione compresa tra il 74% e il 90%, richiedendo un'attenzione particolare per comprendere quali siano le priorità da seguire per ottenere il risultato ottimale nella mitigazione dei fattori di stress climatico e nella considerazione della giustizia climatica nelle aree urbanizzate. La Fig. 5 mappa la distribuzione spaziale di questa sovrapposizione.

RG, IGR e PV sono adatti su tetti piani (fino a 10°), con IGR su edifici non residenziali e RG e PV su entrambi i tipi di edifici.

ed edifici non residenziali. Su tetti piani non residenziali di superficie superiore a 100 m^2 , questi sistemi possono essere implementati congiuntamente; i progettisti possono scegliere IGR o RG in combinazione con PV in base agli obiettivi e ai vincoli locali. La figura 6 mappa il potenziale geografico di questa sinergia, aumentando contemporaneamente la produzione di verde/cibo e la generazione di energia solare. Come previsto, il potenziale di sinergia è più elevato nelle UU in cui l'idoneità di base di tutti e tre i sistemi è maggiore, in particolare nei distretti industriali orientali e nord-orientali con un ampio patrimonio di tetti piani. In queste aree, la quota di sinergia raggiunge fino all'80%.

L'influenza della tipologia edilizia sul potenziale compromesso e sinergia dei tetti è evidenziata nella Fig. 7, che fornisce un'istantanea che dimostra come gli edifici residenziali siano soggetti a compromessi spaziali, mentre gli edifici non residenziali offrono opportunità sinergiche. Il potenziale di inverdimento dei tetti di Padova è notevole rispetto agli spazi verdi esistenti a livello del suolo. Combinando (sinergia e idoneità) gli EGR sui tetti a bassa pendenza con gli RG sui tetti piani, escludendo gli IGR per evitare il doppio conteggio sui tetti piani, poiché sia gli IGR che gli RG condividono tetti piani e un'area superiore a 100 m^2 , si ottengono $10,94 \text{ km}^2$ di superfici vegetate aggiuntive. Ciò corrisponde al 20,95% dello stock di spazi verdi inventariati ($52,23 \text{ km}^2$) e all'11,78% della superficie comunale ($92,85 \text{ km}^2$). Utilizzando Pristeri et al. (2021) come base di riferimento (56% di copertura vegetale), il pieno assorbimento aumenterebbe la copertura vegetale dell'intera città a circa il 67,8% ($62,94 \text{ km}^2$).

Per quanto riguarda il potenziale dei pannelli fotovoltaici sui tetti, nel 2023 il consumo medio annuo di elettricità delle famiglie italiane era pari a 2700 kWh^{-1} (ARERA, 2023). Per una semplice stima dell'ordine di grandezza (Bandari et al., 2020), ipotizziamo un tipico modulo in silicio cristallino da 350 Wp con una superficie di $1,6 \text{ m}^2$ ($0,219 \text{ kWp m}^{-2}$). Applicato ai $9,10 \text{ km}^2$ di tetti adatti al fotovoltaico (combinando sinergia e idoneità complessiva, esclusi i tetti esposti a nord), ciò produce circa $0,837 \text{ TWh}$ all'anno, ovvero circa il 302% del consumo elettrico delle famiglie del comune ($0,251 \text{ TWh}$ nel 2021) (Comune di Padova, 2024). Pertanto, la superficie dei tetti idonei è più che sufficiente a soddisfare l'attuale domanda di energia elettrica residenziale a Padova.

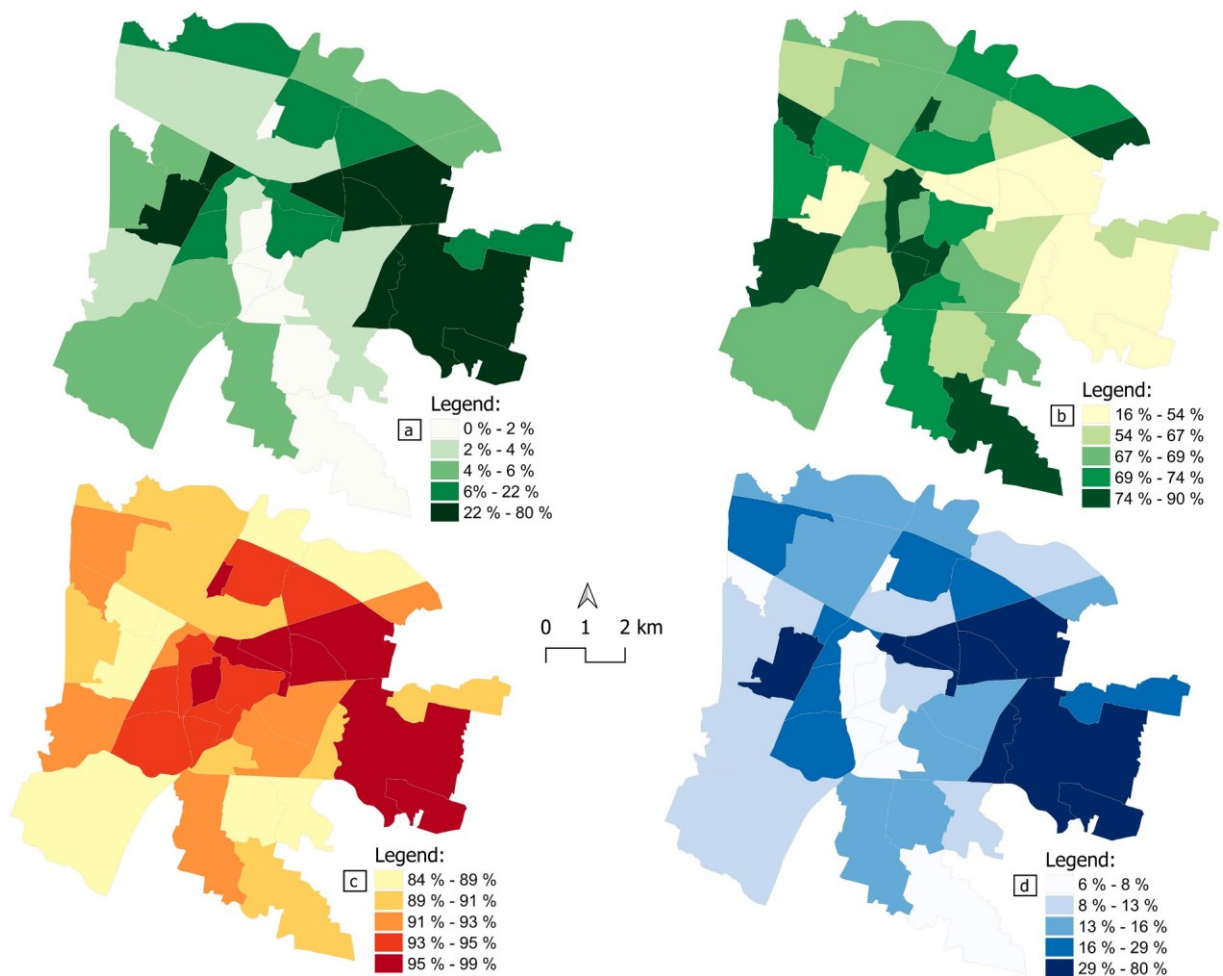


Fig. 4. Potenziale di idoneità per UU: percentuale della superficie totale dei tetti di ciascuna UU classificata come idonea per (a) IGR, (b) EGR, (c) PV e (d) RG. I valori sono espressi in percentuale della superficie dei tetti idonea per il rispettivo sistema rispetto alla superficie totale dei tetti nella stessa UU. I dati sono classificati per quantili ai fini della visualizzazione; lo stesso metodo è applicato in tutte le figure successive.

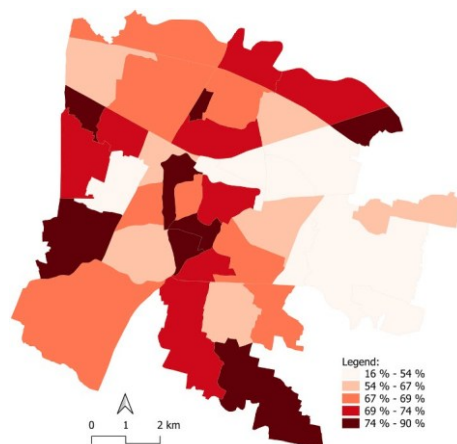


Fig. 5. La concorrenza tra EGR e PV per UU in cui questi sistemi competono per lo spazio. Si può prendere in considerazione sia l'EGR che i PV. I valori sono espressi in percentuale della superficie del tetto idonea rispetto alla superficie totale del tetto nella stessa UU.

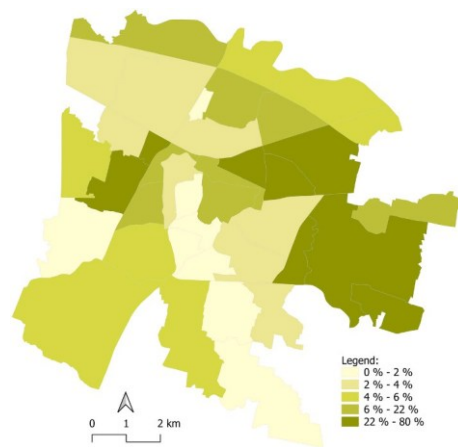


Fig. 6. La potenziale sinergia tra IGR, RG e PV per unità urbana, espressa in percentuale dell'area dei tetti idonea rispetto all'area totale dei tetti nella stessa UU.



Fig. 7. Due esempi di aree urbane con diversi utilizzi degli edifici: (a) Edifici residenziali compatti con tetti prevalentemente a bassa pendenza, dove EGR e PV presentano utilizzi concorrenti a causa della pendenza e degli usi degli edifici. (b) Edifici non residenziali con grandi tetti piani che consentono il co-impiego (PV + GR/RG). Le categorie di pendenza dei tetti basate sulla classe di pendenza dominante del tetto sono indicate per facilitare l'interpretazione; insieme alla destinazione d'uso dell'edificio, definiscono sinergie e competizione.

3.2. Priorità dei tetti potenzialmente idonei

3.2.1. Modello a livello Cittadino

La figura 8 mostra la classifica delle priorità RT4ES per l'implementazione dell'inverdimento dei tetti e della produzione di energia solare sui tetti idonei. Le priorità elevate e molto elevate si concentrano nei settori centrale, orientale e nord-orientale, dove la densità dei tetti idonei coincide con elevati punteggi di vulnerabilità sociale e ambientale. Le priorità intermedie si concentrano in un anello interno-centrale discontinuo attorno ai cluster elevati e molto elevati e riflettono una moderata idoneità e vulnerabilità. Le priorità da basse a molto basse sono prevalentemente periferiche, dove le vulnerabilità socio-economiche sono inferiori e la copertura agricola/verde è più diffusa, migliorando le condizioni ambientali, sebbene con un numero limitato di tetti idonei. Questi modelli supportano la validità dell'analisi delle priorità, indicando che il modello RT4ES individua in modo affidabile le UU con un maggiore stress socio-economico e ambientale.

La nostra analisi mostra che il SEVI è spazialmente eterogeneo, con valori più elevati concentrati nelle UU settentrionali e ulteriori sacche intorno alle UU del centro storico e in alcune parti dell'est, del sud e dell'ovest. Queste UU coincidono con una percentuale più elevata di residenti con un background migratorio, redditi familiari più bassi, famiglie più numerose, minori e una percentuale più elevata di anziani, compresi quelli che vivono da soli. Al contrario, l'EVI mostra un andamento in parte distinto: i deficit sono più elevati nelle UU settentrionali e nord-orientali, nel centro città e nelle UU al di fuori di esso, mentre le aree periferiche mostrano generalmente un EVI più basso a causa della maggiore presenza di terreni agricoli/permeabili e di una maggiore copertura verde. Una mappa comparativa del SEVI e dell'EVI è disponibile nel Materiale supplementare 4.5.

Se sovrapposti alla densità familiare, i risultati rivelano che diverse UU nella parte orientale e nord-orientale della città con la massima priorità di intervento corrispondono ad aree con concentrazioni relativamente basse di famiglie. Al contrario, le UU situate nel centro urbano e nei settori settentrionali, che presentano livelli di priorità moderati, tendono ad avere densità familiari più elevate (Fig. 8).

3.2.2. Risultati specifici dell'intervento

La distribuzione spaziale delle priorità di intervento sui tetti mostra un raggruppamento coerente di valori elevati e molto elevati nella parte orientale,

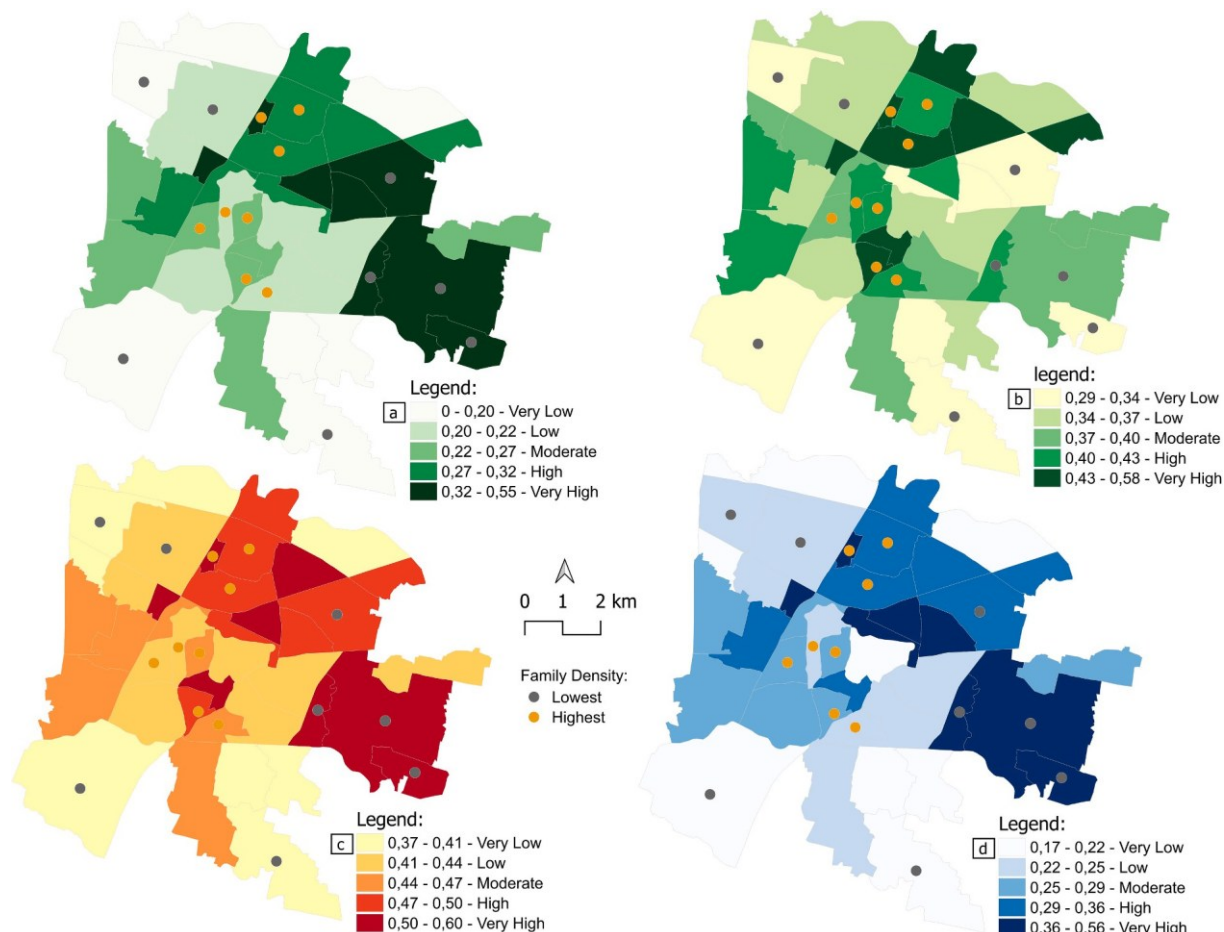


Fig. 8. Distribuzione spaziale della classifica di priorità per UU per (a) IGR, (b) EGR, (c) PV e (d) RG. Ogni pannello utilizza cinque quantili per intervento (da molto basso a molto alto). I colori non sono numericamente identici tra i pannelli. La densità familiare, rappresentata dal primo e dal quinto quantile (il più basso in grigio; il più alto in arancione), è sovrapposta per contestualizzare l'esposizione della popolazione all'interno dei risultati prioritari.

settori nord-orientali e alcuni settori del centro città, mentre le unità periferiche presentano prevalentemente valori bassi o molto bassi. Le differenze tra gli interventi riflettono la variazione dei requisiti strutturali, i vincoli di fattibilità e l'allineamento con le esigenze socio-economiche e ambientali (SEVI/EVI).

Tetti verdi intensivi (IGR). Le priorità più elevate si concentrano nelle UU orientali e nord-orientali, dove grandi tetti non residenziali e industriali con adeguata capacità di carico coincidono con un SEVI/EVI elevato. Le UU adiacenti mostrano generalmente una priorità intermedia, indicando aree candidate con livelli moderati di idoneità dei tetti e punteggi di vulnerabilità SEVI/EVI. Le priorità da basse a molto basse dominano i settori meridionale, occidentale e settentrionale esterno, in linea con l'idoneità strutturale limitata e i punteggi compositi di vulnerabilità socioeconomica e ambientale più bassi.

Tetti verdi estesi (EGR). Le priorità elevate e molto elevate sono distribuite in modo più ampio, compreso il settore settentrionale e il centro storico. Questo modello riflette il substrato più leggero e le esigenze strutturali dell'EGR, che ne ampliano la fattibilità su una quota maggiore del patrimonio residenziale. Le priorità intermedie si estendono attraverso le UU centro-occidentali e orientali, mentre i valori bassi e molto bassi prevalgono nella periferia esterna, dove i tetti adatti sono scarsi e i valori SEVI/EVI sono inferiori.

Impianti fotovoltaici (PV). Le priorità PV rispecchiano in gran parte la distribuzione IGR, con una presenza ampliata ad alta priorità nelle zone settentrionali e nel centro storico. Ciò indica che molti tetti in queste zone soddisfano criteri aggiuntivi di pendenza e utilizzo dell'edificio, sottolineando la complementarità tra le strategie ecologiche e quelle di produzione di energia solare sui tetti.

Giardini pensili (RG). Le priorità RG seguono generalmente quelle IGR e PV sui tetti piani a causa dei filtri di idoneità fisica condivisi. La soglia minima di superficie (superiore a 30 m²) amplia l'insieme dei tetti candidati, elevando la priorità in alcune UU; quando ciò si sovrappone a SEVI/EVI più elevati, la priorità dei RG aumenta. Tuttavia, la fattibilità dei RG dipende anche dall'accessibilità, dall'irrigazione e dalla disponibilità di servizi che non sono pienamente catturati dagli indicatori spaziali; quindi, i risultati devono essere interpretati come indicativi.

3.2.3. Sinergia e concorrenza

La figura 9a illustra le opportunità sinergiche del modello RT4ES per PV, RG e IGR, rivelando i modelli di priorità complessivi in base alla loro idoneità determinata dai criteri di idoneità dei tetti e dai punteggi SEVI ed EVI.

Le UU orientali e nord-orientali, insieme ad alcune zone nel nord-ovest, sono classificate come aree ad alta e altissima priorità. Una priorità moderata emerge nelle UU al di fuori del centro storico, in modo più consistente nelle zone settentrionali, dove l'equilibrio tra idoneità e vulnerabilità suggerisce opportunità di co-implementazione con miglioramenti specifici per il sito. La priorità bassa e molto bassa si riscontra principalmente nelle UU urbane centrali e periferiche. Il centro città ha punteggi di vulnerabilità socio-economica e ambientale più bassi, nonostante i tetti altamente idonei. Le UU periferiche hanno quote minori di superficie di tetto idonea e punteggi di vulnerabilità socio-economica e ambientale più bassi, con

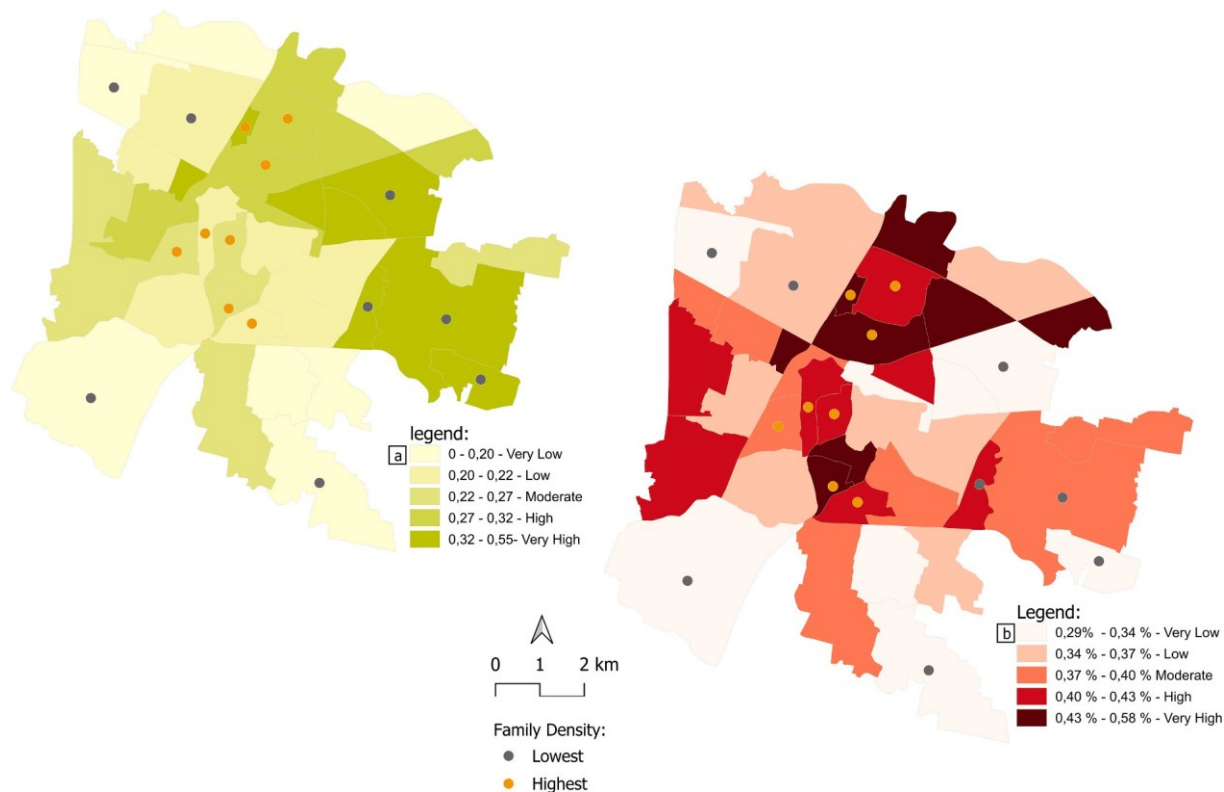


Fig. 9. Priorità a livello di unità urbana in scenari di sinergia e concorrenza. (a) PV, IGR e RG (sinergia); (b) PV ed EGR (concorrenza). La densità familiare è rappresentata dal primo e dal quinto quantile (il più basso in grigio; il più alto in arancione).

ulteriori sacche sparse nell'area di studio.

La Fig. 9b mappa gli scenari in cui un intervento compete per lo spazio con l'altro a livello di UU. Le priorità elevate e molto elevate si concentrano nel centro storico e a nord della città, dove gli elevati valori SEVI/EVI amplificano l'urgenza di un intervento strategico sui tetti. Le priorità intermedie sono sparse nell'area di studio, in particolare al di fuori del centro storico, nelle periferie occidentali, meridionali e orientali. Le classi inferiori dominano le UU periferiche settentrionali e alcune sacche sparse al di fuori del centro città e al di fuori di esso nella parte meridionale dell'area di studio, che comprendono una grande percentuale di UU. Queste aree integrano generalmente quote di tetto adeguate più piccole con SEVI/EVI ridotti, sottolineando una minore urgenza di intervento, ma a lungo termine possono essere prese in considerazione per la pianificazione urbana.

4. Discussioni

Le aree urbane devono affrontare pressioni interconnesse, tra cui i cambiamenti climatici, la rapida urbanizzazione e le persistenti disuguaglianze socioeconomiche e ambientali (Byrne, 2020; Kohlhase, 2013). Affrontare queste sfide richiede strategie spazialmente esplicite e basate su dati concreti che mirino a impiegare le risorse limitate laddove producono i maggiori valori socioeconomici e ambientali (Peroni e Pappalardo, 2024). Questo studio è il primo a promuovere l'analisi della ristrutturazione dei tetti quantificando simultaneamente il potenziale di più opzioni GI (IGR, EGR e RG) e PV. Andando oltre gli approcci precedenti che in genere valutavano solo l'idoneità fisica o esaminavano ciascuna opzione isolatamente, il nostro quadro GIS-MCDA su scala UU integra le caratteristiche dei tetti con gli indicatori SEVI ed EVI. Questa integrazione genera mappe di priorità specifiche per ciascuna opzione e classifiche orientate all'equità che evidenziano non solo dove gli interventi sono tecnicamente fattibili, ma anche dove possono fornire il massimo valore sociale e ambientale combinato, fornendo nuove intuizioni su come le città possono bilanciare l'implementazione della GI e la produzione di energia solare, per sostenere transizioni urbane più eque e sostenibili.

4.1. Processo decisionale avanzato relativo ai tetti

Rispetto ai precedenti studi su scala urbana, la nostra analisi ha migliorato il processo decisionale relativo ai tetti in diversi modi. Innanzitutto, ampliando lo studio di Langemeyer et al. (2020), che ha utilizzato l'MCDA spaziale per dare priorità ai tipi di GR in base alla domanda di servizi ecosistemici del quartiere, abbiamo valutato diverse opzioni per i tetti su una base comune, PV, RG e GR, e abbiamo mappato la co-localizzazione (sinergia) rispetto alla scelta esclusiva (competizione) su scala UU. Pertanto, abbiamo trattato la co-distribuzione di PV e GR come una classe implementabile, in linea con i risultati che mostrano PV modesti miglioramenti delle prestazioni sui tetti vegetati rispetto ai tetti convenzionali (Van Der Roest et al., 2023) consentendo anche la creazione di comunità energetiche fotovoltaiche con tetti verdi (Cruz Torres et al., 2023). Successivamente, a differenza di Brenner et al. (2023), che hanno individuato opportunità di inverdimento dei tetti per la mitigazione dell'UHI a Krefeld, in Germania, concentrandosi esclusivamente sui GR, abbiamo fornito una strategia collettiva e multifunzionale di GI che identifica dove i PV, RG, IGR ed EGR dovrebbero essere prioritari insieme o separatamente, consentendo agli urbanisti di affrontare l'UHI insieme ad altri benefici ecologici (ad esempio, gestione del deflusso, fornitura di habitat e abbattimento dell'inquinamento atmosferico). Infine, come già detto, abbiamo integrato una prospettiva di equità e giustizia climatica integrando gli indicatori SEVI ed EVI, che hanno modificato le prime posizioni in classifica verso le UU con un rischio socio-ambientale maggiore, dando priorità ai gruppi più svantaggiati, piuttosto che semplicemente verso le aree con abbondante offerta di tetti. Questi quartieri sono solitamente molto compatti e la disponibilità di spazi verdi è piuttosto bassa. Sebbene lo studio non abbia quantificato l'entità dei servizi ecosistemici né le prestazioni a livello di edificio, è stato dimostrato che l'implementazione dei GR potrebbe reintrodurre alcuni servizi ecosistemici persi durante il processo di urbanizzazione e il fenomeno dell'impermeabilizzazione del suolo, come i servizi ecosistemici di regolazione (raffreddamento, riduzione del deflusso) (Commissione Europea, 2021). Questi interventi, soprattutto se strategicamente localizzati in diverse strutture di un quartiere, possono apportare benefici non solo a un singolo edificio e ai suoi residenti, ma estendere i loro effetti all'ambiente e alle comunità circostanti (Netusil et al., 2022). Vale la pena menzionare anche il ruolo dei giardini verdi nel valorizzare la cultura e sostenere i servizi ecosistemici e l'agrobiodiversità urbana, grazie alla loro efficacia nella produzione alimentare locale, nella ricreazione e nella coesione sociale (Specht et al., 2017). Tuttavia, per passare dalla potenziale idoneità all'attuazione, in particolare nei progetti ad alto costo, ed evitare la gentrificazione e l'aumento dei valori immobiliari e degli affitti nei quartieri a basso reddito, la realizzazione di GI in strutture abitative private o sociali dovrebbe essere sostenuta da incentivi pubblici e misure di autorizzazione, quali sgravi fiscali, semplificazioni burocratiche e bonus mirati per PV/GR in UU SEVI/EVI ad alta domanda (Anguelovski et al., 2022; Liberalesso et al., 2020, 2024; Van Der Roest et al., 2023).

4.2. Sinergie e concorrenza tra soluzioni per tetti e bisogni sociali

I tetti a bassa pendenza, associati principalmente agli edifici residenziali, rappresentano un'importante competizione spaziale, consentendo l'implementazione di EGR o PV. Questo modello è fondamentale perché gli edifici residenziali nell'area di studio ospitano diversi gruppi SEVI. Pertanto, la concorrenza tra l'implementazione di un EGR (per fornire servizi ecosistemici) e di un PV (per fornire energia pulita) ha effetti significativi e distinti sul benessere della comunità. Di conseguenza, comprendere l'interazione tra la tipologia di edificio adatta all'intervento e le caratteristiche socioeconomiche dei gruppi di residenti è fondamentale per un'efficace definizione delle politiche e pianificazione delle infrastrutture verdi. Nella tabella 7 è riportato un riepilogo di questo compromesso (Cascone, 2024; Chen et al., 2023; Chen et al., 2024; Oberndorfer et al., 2007).

I sistemi sinergici (integrativi) si verificano quando GR/RG e PV sono collocati insieme su edifici residenziali e non residenziali, creando vantaggi reciproci. La sinergia principale è l'effetto di raffreddamento del GR/RG: l'evapotraspirazione dalla vegetazione abbassa la temperatura ambiente del tetto, mitigando l'impatto negativo delle elevate temperature delle celle sull'efficienza dei pannelli PV, aumentando così resa energetica annuale (Talwar et al., 2023). In cambio, i pannelli fotovoltaici forniscono ombra parziale, riducendo lo stress termico delle piante e la perdita d'acqua (Schindler et al., 2018). Questo approccio integrativo consente di "accumulare" i servizi ecosistemici, combinando la generazione di energia pulita in loco con le funzioni primarie del GR di mitigazione dell'UHI, ritenzione delle acque piovane, fornitura di habitat e abbattimento dell'inquinamento atmosferico (De Cristo et al., 2025; DeNardo et al., 2005; Janh' all, 2015; Lin e Li, 2025; Madre et al., 2014; Williams et al., 2019).

Tabella 7

Confronto tra i pannelli fotovoltaici sui tetti e l'EGR in termini di benefici ottenuti, benefici persi e bisogni sociali soddisfatti.

Sistema Prioritario	Beneficio ottenuto	Beneficio perso	Esigenze sociali soddisfatte
PV	Risparmio energetico diretto e quantificabile e generazione di energia verde che riduce le emissioni di CO ₂ (Cruz Torres et al., 2023; Agenzia internazionale per l'energia, 2021; Zhang et al., 2025; Zsiborács et al., 2023).	Servizi ecosistemici diffusi su scala di quartiere (ad esempio, riduzione dell'effetto isola di calore urbana, controllo delle inondazioni e aumento della biodiversità) (Cristiano et al., 2021; Mentens et al., 2006; Mutani e Todeschi, 2020).	Equità energetica e povertà: affronta l'onere finanziario delle famiglie e l'affidabilità della rete locale (Agenzia internazionale per l'energia, 2021; Li et al., 2023; Tan et al., 2023).
EGR	Benefici collettivi di resilienza climatica su scala di quartiere (mitigazione dell'effetto isola di calore urbana, gestione delle acque piovane e fornitura di habitat).	Ritorno finanziario diretto e misurabile dalla produzione di energia in loco.	Vulnerabilità climatica: affronta i rischi per la salute pubblica derivanti dal calore estremo, i danni alle proprietà causati dalle inondazioni e i servizi ecosistemici (Berardi et al., 2014; Coutts e Hahn, 2015; Netusil et al., 2022).

4.3. Dall'idoneità dei tetti all'azione climatica urbana orientata all'equità

Il modello RT4ES promuove gli sforzi di mitigazione e adattamento climatico urbano integrando le valutazioni di idoneità dei tetti con la definizione delle priorità basata sulla vulnerabilità, indirizzando GI e PV verso le UU più esposte di Padova sulla base dei punteggi di rischio compositi SEVI ed EVI. Il quadro sostiene direttamente il Piano d'azione per l'energia sostenibile e il clima di Padova (PAESC), che impegna la città a ridurre le emissioni entro il 2030 e a raggiungere la neutralità climatica entro il 2050 (Comune di Padova, 2024). Per i responsabili politici e gli urbanisti, RT4ES funge da sistema di supporto decisionale che traduce i livelli di idoneità e vulnerabilità in raccomandazioni spazialmente esplicite, consentendo l'implementazione di GI e PV, guidando i finanziamenti in linea con il PAESC e promuovendo la giustizia climatica e la resilienza urbana. I nostri risultati forniscono agli urbanisti una strategia di localizzazione basata sulla tipologia e sulla densità: (i) dare priorità al biosolare (GR/RG + PV) su tetti grandi, piatti e non residenziali dove soddisfano sia la domanda di energia che forniscono servizi ecosistemici; (ii) dare priorità al GR/RG in blocchi residenziali compatti e ad alta densità, in particolare nelle UU con SEVI/EVI elevati, dove i benefici collaterali dell'adattamento (raffreddamento, ritenzione delle acque di deflusso e fornitura di biodiversità) sono maggiori; e (iii) implementare i PV solo su tetti a bassa e moderata pendenza (edifici residenziali) dove il fabbisogno di produzione energetica supera i servizi ecosistemici forniti dal verde. Inoltre, il RG sugli edifici pubblici può fungere da complemento equo agli sforzi municipali nella creazione di orti comunitari sul terreno, in particolare nelle UU con spazi verdi privati limitati (Codato et al., 2024). A livello nazionale, RT4ES è coerente con il Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE), 2023), che pone l'accento sulle misure comunali basate sugli ecosistemi per ridurre i rischi climatici. A livello europeo, è in linea con la richiesta della Strategia dell'UE per le infrastrutture verdi di creare reti naturali multifunzionali che garantiscano resilienza e benefici collaterali (Commissione Europea, 2013) e integra la Strategia dell'UE di adattamento ai cambiamenti climatici dando priorità ad azioni basate sulla vulnerabilità, sulla natura e sensibili al rischio per salvaguardare le popolazioni urbane entro il 2050 (Commissione Europea, 2021).

I nostri risultati sulla distribuzione spaziale delle popolazioni vulnerabili e sugli effetti dell'UHI erano coerenti con quelli di Pappalardo et al. (2023), che hanno mappato il rischio legato al calore a Padova durante le ondate di calore del 2022 e hanno identificato i punti caldi nelle aree industriali e centrali con un'alta concentrazione di residenti vulnerabili. Le aree ad altissima/alta priorità a est, nord-est e intorno alla cintura urbana corrispondevano a quei punti caldi. Abbiamo quindi tradotto tali punti caldi di rischio in azioni concrete, integrando gli indici di vulnerabilità socioeconomica e ambientale con l'idoneità dei tetti, al fine di dare priorità a specifici interventi sui tetti per mitigare gli impatti ambientali negativi di tali punti caldi. Il confronto con la densità familiare aggiunge una prospettiva di equità complementare ai risultati della definizione delle priorità. La divergenza osservata tra le aree di massima priorità e quelle con una maggiore esposizione della popolazione suggerisce che il quadro SEVI/EVI, pur essendo efficace nell'identificare la vulnerabilità, potrebbe sottoapprezzare le zone in cui un numero maggiore di famiglie potrebbe beneficiare degli interventi.

4.4. Requisiti dei dati e trasferibilità del quadro RT4ES

Poiché RT4ES è stato realizzato interamente con set di dati accessibili al pubblico e strumenti open source, è in linea di principio trasferibile, in particolare alle città dell'Europa meridionale con profili socioeconomici e di rischio ambientale simili. Gli indicatori socioeconomici possono essere raccolti dai portali dei censimenti comunali o nazionali, mentre i principali livelli ambientali sono disponibili pubblicamente: copertura vegetale da Sentinel-2 (ad esempio, NDVI) tramite il Copernicus Data Space Ecosystem; impermeabilità dal Copernicus High Resolution Layer Impermeabilità (10-100 m); e contesti termici/proxy LST derivati dalle immagini termiche Landsat Collection 2, elaborate localmente in QGIS o in GEE. Le caratteristiche dei tetti e i dettagli della pendenza possono sfruttare il DSM/DTM derivato dal LiDAR e le ortofoto commissionate dai comuni e successivamente pubblicati attraverso i loro portali di dati aperti. Come accennato nell'introduzione, soprattutto in Europa, la maggior parte dei paesi fornisce libero accesso ai dati altimetrici e alle ortofoto ad alta risoluzione. Sebbene in alcuni casi siano disponibili prodotti così dettagliati, essi non sono ancora universalmente accessibili e la loro assenza in molte città ridurrebbe la precisione spaziale di RT4ES o richiederebbe alternative DEM/DSM meno precise. Per le impronte degli edifici, abbiamo combinato gli edifici estratti dal database topografico della regione Veneto con i dati degli edifici OSM. In assenza di set di dati locali, tuttavia, il progetto EU EUBUCCO (Milojevic-Dupont et al., 2023) potrebbe costituire una valida alternativa. Insieme, queste fonti restituiscono l'idoneità e le risorse SEVI/EVI necessarie per sviluppare il modello RT4ES, che può essere replicato in contesti simili.

5. Conclusioni

Questo studio supporta la ricerca sull'idoneità e la priorità dei tetti valutando quattro tipi di intervento, EGR, IGR, RG e PV, su una base comune e integrando i punteggi di vulnerabilità SEVI ed EVI per classificare i tetti idonei su scala UU per una pianificazione integrata della giustizia climatica e della resilienza urbana. Il modello RT4ES traduce le caratteristiche fisiche dei tetti (pendenza, superficie e destinazione d'uso dell'edificio) in priorità attente all'equità, indicando dove indirizzare per prime le risorse.

Applicato al comune di Padova, il modello rivela una marcata eterogeneità spaziale nel potenziale dei tetti e nella vulnerabilità del tessuto urbano, dal centro storico alle aree residenziali, industriali e periferiche. I risultati mostrano che i tetti idonei spesso supportano più interventi piuttosto che un unico sistema esclusivo, con i PV che presentano la più ampia applicabilità (11,93 km² su 30.372 tetti), seguiti dagli EGR (7,25 km²), mentre gli IGR e gli RG rimangono più dipendenti dal contesto. Nel complesso, i tetti vegetati potrebbero aumentare la copertura verde urbana dal 56% al 67%, e il potenziale di generazione stimato dei PV (0,47 TWh anno⁻¹) supera l'attuale domanda di elettricità residenziale.

Abbinando un'analisi riproducibile dell'idoneità potenziale con una prioritizzazione basata sulla vulnerabilità, questo studio produce una chiara gerarchia spaziale orientata all'equità, evidenziando le UU ad alta priorità al di fuori del centro storico, in particolare nelle aree settentrionali e nord-orientali caratterizzate da una maggiore esposizione al calore, una minore copertura vegetale e una maggiore vulnerabilità sociale. L'integrazione di indicatori demografici come la densità familiare rafforza ulteriormente la capacità del quadro RT4ES di guidare investimenti equi e multifunzionali sui tetti che migliorano sia la resilienza urbana che l'equità sociale.

Dichiarazione di contribuzione degli autori CRediT

Abdullah Ahmadi: Scrittura – revisione e modifica, Scrittura – bozza originale, Visualizzazione, Metodologia, Analisi formale, Concettualizzazione. **Daniele Codato:** Scrittura – revisione e modifica, Scrittura – bozza originale, Convalida, Supervisione, Metodologia, Indagine, Analisi formale, Concettualizzazione. **Francesca Peroni:** Scrittura – revisione e modifica, Convalida, Supervisione. **Massimo De Marchi:** Scrittura – revisione e modifica, convalida, acquisizione di finanziamenti.

Dichiarazione di conflitto di interessi

Gli autori dichiarano di non avere interessi finanziari concorrenti o relazioni personali noti che potrebbero aver influenzato il lavoro riportato in questo articolo.

Ringraziamenti

Questa ricerca è stata finanziata dal centro di eccellenza Jean Monnet Just Fossil Fuel Transition (Erasmus plus, ID: 101175896 — JFFT — ERASMUS-JMO-2024- HEI-TCH-RSCH).

Questo articolo fa parte del progetto RESTART | Urban climate justice and community participation: towards inclusive adaptation strategies (HORIZON-MSCA-2023-PF-01, ID: 101150830), PI Francesca Peroni.

Appendice A. Dati supplementari

I dati supplementari relativi a questo articolo sono disponibili online all'indirizzo <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2026.102840>.

Disponibilità dei dati

I dati saranno resi disponibili su richiesta.

Riferimenti

- Abdalazeem, M. E., Hassan, H., Asawa, T., & Mahmoud, H. (2022). Review on integrated photovoltaic-green roof solutions on urban and energy-efficient buildings in hot climate. *Sustainable Cities and Society*, 82, 103919. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103919>
- Alonso-Marroquin, F., & Qadir, G. (2023). Synergy between Photovoltaic Panels and Green Roofs. *Energies*, 16(13), Article 13. <https://doi.org/10.3390/en16135184>
- Anguelovski, I., Connolly, J. J. T., Cole, H., Garcia-Lamarca, M., Triguero-Mas, M., Baró, F., Martin, N., Conesa, D., Shokry, G., Del Pulgar, C. P., Ramos, L. A., Matheney, A., Gallez, E., Oscilowicz, E., Mániz, J. L., Sarzo, B., Beltrán, M. A., & Minaya, J. M. (2022). Green gentrification in European and North American cities. *Nature Communications*, 13(1), 3816. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31572-1>
- Anguelovski, I., Irazábal-Zurita, C., & Connolly, J. J. T. (2019). Grabbed Urban Landscapes: Socio-spatial Tensions in Green Infrastructure Planning in Medellín. *International Journal of Urban and Regional Research*, 43(1), 133–156. <https://doi.org/10.1111/1468-2427.12725>
- Anguelovski, I., Kotsila, P., Lees, L., Triguero-Mas, M., & Calderón-Argelich, A. (2024). From heat racism and heat gentrification to urban heat justice in the USA and Europe. *Nature Cities*, 2(1), 8–16. <https://doi.org/10.1038/s44284-024-00179-6>
- Apud, A., Faggian, R., Sposito, V., & Martino, D. (2020). Suitability Analysis and Planning of Green Infrastructure in Montevideo, Uruguay. *Sustainability*, 12(22), 9683. <https://doi.org/10.3390/su12229683>
- AREA. (2023). Elettricità: Bolletta in tutela quasi invariata a +0,4%. <https://www.arera.it/comunicati-stampa/dettaglio/it/com-stampa/23/230628>
- Bakolo, C., Kayitete, L., De Dieu Tuyizere, J., Tomlinson, J., Fawcett, J., & Alfaro, R. F. (2024). Identification of optimal locations for green space initiatives through GIS-based multi-criteria analysis and the analytical hierarchy process. *Environmental Systems Research*, 13(1), 46. <https://doi.org/10.1186/s40068-024-00377-0>

*Versione non ufficiale in lingua italiana tradotta in maniera automatica con intelligenza artificiale. Fare riferimento al testo originale in inglese a questo link <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2026.102840>

- Bandari, N., Raghavendra, K. V. G., Heo, S., Kumar, S. V. S. V. P. D., Uddin, W., Sama, L. K. R., Punnoose, D., & Kim, H.-J. (2020). Efficient Electricity Management System for Optimal Peak/Off-Peak Hour Pricing. *Electronics*, 9(8), 1189. <https://doi.org/10.3390/electronics9081189>
- Baranes, E., Jacqmin, J., & Poudou, J.-C. (2017). Non-renewable and intermittent renewable energy sources: Friends and foes? *Energy Policy*, 111, 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.09.018>
- Baumann, T., Nussbaumer, H., Klenk, M., Dreisiebner, A., Carigiet, F., & Baumgartner, F. (2019). Photovoltaic systems with vertically mounted bifacial PV modules in combination with green roofs. *Solar Energy*, 190, 139–146. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.08.014>
- Berardi, U., GhaffarianHoseini, A., & GhaffarianHoseini, A. (2014). State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy*, 115, 411–428. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.047>
- Beumier, C., & Idrissa, M. (2014). Building detection with multi-view colour infrared imagery. [Dataset]. EARSel eProceedings. <https://doi.org/10.12760/01-2014-2-05>
- Bortolini, L., & Brasola, V. (2022). Simulating the impact of nature-based solutions on runoff control by using i-Tree Hydro: A case study in Padua (Italy). *Acta Horticulturae*, 1345, 351–358. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2022.1345.47>
- Bousquet, M., Kuller, M., Lacroix, S., & Vanrolleghem, P. A. (2023). A critical review of multicriteria decision analysis practices in planning of urban green spaces and nature-based solutions. *Blue-Green Systems*, 5(2), 200–219. <https://doi.org/10.2166/bgs.2023.132>
- Brenner, J., Schmidt, S., & Albert, C. (2023). Localizing and prioritizing roof greening opportunities for urban heat island mitigation: Insights from the city of Krefeld, Germany. *Landscape Ecology*, 38(7), 1697–1712. <https://doi.org/10.1007/s10980-023-01644-8>
- Brown, A., Dayal, A., & Rumbaitis Del Rio, C. (2012). From practice to theory: Emerging lessons from Asia for building urban climate change resilience. *Environment and Urbanization*, 24(2), 531–556. <https://doi.org/10.1177/0956247812456490>
- Busato, F., Lazzarin, R. M., & Noro, M. (2014). Three years of study of the Urban Heat Island in Padua: Experimental results. *Sustainable Cities and Society*, 10, 251–258. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2013.05.001>
- Byrne, J. (2020). Urbanisation: Towns and cities as sites of environmental (in)justice. In *Environmental Justice*. Routledge.
- Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., & Blanco, G. (2023). IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. (No Title).
- Caniglia, B. S., Frank, B. F., & Vallée, M. (Eds.). (2017). *Resilience, environmental justice and the city*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315652054>
- Carter, T., & Fowler, L. (2008). Establishing Green Roof Infrastructure Through Environmental Policy Instruments. *Environmental Management*, 42(1), 151–164. <https://doi.org/10.1007/s00267-008-9095-5>
- Cascone, S. (2024). Eco-Innovative Construction: Integrating Green Roofs Design within the BIM Framework. *Sustainability*, 16(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/su16051967>
- Chen, J., Kinoshita, T., Li, H., Luo, S., Su, D., Yang, X., & Hu, Y. (2023). Toward green equity: An extensive study on urban form and green space equity for shrinking cities. *Sustainable Cities and Society*, 90, 104395. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104395>
- Chen, Y., Li, K. W., & Shawei He. (2010). Dynamic multiple criteria decision analysis with application in emergency management assessment. 2010 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 3513–3517. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2010.5642410>
- Chen, Y., Liu, Y., Slootweg, M., Hu, M., Tukker, A., & Chen, W.-Q. (2024). Unlocking rooftop potential for sustainable cities: A systematic review. *Frontiers of Engineering Management*. <https://doi.org/10.1007/s42524-024-4053-3>
- Clark, C., Adriaens, P., & Talbot, F. B. (2008). Green roof valuation: A probabilistic economic analysis of environmental benefits. *Environmental Science & Technology*, 42(6), 2155–2161. <https://doi.org/10.1021/es0706652>
- Codato, D., Grego, D., & Peroni, F. (2024a). Community gardens for inclusive urban planning in Padua (Italy): Implementing a participatory spatial multicriteria decision-making analysis to explore the social meanings of urban agriculture. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1344034>
- Codato, D., Grego, D., & Peroni, F. (2024b). Community gardens for inclusive urban planning in Padua (Italy): Implementing a participatory spatial multicriteria decision-making analysis to explore the social meanings of urban agriculture. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, 1344034. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1344034>
- COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS Green Infrastructure (GI) — Enhancing Europe's Natural Capital (2013). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TEXT/?uri=CELEX:52013DC0249>
- Comune di Padova. (2019, November 28). Regolamento Comunale Per L'assegnazione E La Gestione Degli Orti Urbani. https://www.comune.padova.it/sites/default/files/attachment/Regolamento%20orti%20urbani_28_11_2019_DEFINITIVO_signed.pdf
- Comune di Padova. (2023). Rapporto di monitoraggio PAESC 2017–2023. https://www.comune.padova.it/sites/default/files/attachment/monitoraggioPAESC_Padova.pdf
- Comune di Padova. (2024). Popolazione. Comune di Padova. <https://www.comune.padova.it/sites/default/files/2025-04/Capitolo%202.pdf>
- Coutts, C., & Hahn, M. (2015). Green Infrastructure, Ecosystem Services, and Human Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/ijerph120809768>
- Cristiano, E., Deidda, R., & Viola, F. (2021). The role of green roofs in urban Water-Energy-Food-Ecosystem nexus: A review. *The Science of the Total Environment*, 756, 143876. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143876>
- Croeser, T., Garrard, G., Sharma, R., Ossola, A., & Bekessy, S. (2021). Choosing the right nature-based solutions to meet diverse urban challenges. *Urban Forestry & Urban Greening*, 65, 127337. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127337>
- Cruz Torres, F., Babí Almenar, J., & Rugani, B. (2023). Photovoltaic-green roof energy communities can uphold the European Green Deal: Probabilistic cost-benefit analyses help discern economically convenient scenarios. *Journal of Cleaner Production*, 414, 137428. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137428>
- Cutter, S. L., Boruff, B. J., & Shirley, W. L. (2003). Social Vulnerability to Environmental Hazards*. *Social Science Quarterly*, 84(2), 242–261. <https://doi.org/10.1111/1540-6237.8402002>
- Dave Jones, S. B. (2024). European Electricity Review. <https://ember-energy.org/app/uploads/2024/10/European-Electricity-Review-2024.pdf>
- De Cristo, E., Evangelisti, L., Barbaro, L., De Lieto Vollaro, R., & Asdrubali, F. (2025). A Systematic Review of Green Roofs' Thermal and Energy Performance in the Mediterranean Region. *Energies*, 18(10), 2517. <https://doi.org/10.3390/en18102517>

*Versione non ufficiale in lingua italiana tradotta in maniera automatica con intelligenza artificiale. Fare riferimento al testo originale in inglese a questo link <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2026.102840>

- Dehghanimadvar, M., Egan, R., & Chang, N. L. (2022). Economic assessment of local solar module assembly in a global market. *Cell Reports Physical Science*, 3(2), 100747. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2022.100747>
- Demuzere, M., Orru, K., Heidrich, O., Olazabal, E., Geneletti, D., Orru, H., Bhavé, A. G., Mittal, N., Feliu, E., & Faehnle, M. (2014). Mitigating and adapting to climate change: Multi-functional and multi-scale assessment of green urban infrastructure. *Journal of Environmental Management*, 146, 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.025>
- DeNardo, J. C., Jarrett, A. R., Manbeck, H. B., Beattie, D. J., & Berghage, R. D. (2005). Stormwater mitigation and surface temperature reduction by green roofs. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 48(4), 1491–1496. Scopus.
- Dimitriou, C., Michaelides, S., Themistocleous, K., Hadjimitsis, D. G., Papadavid, G., Gitas, I., & Kyriakides, N. (2025). Assessing the Urban Heat Island (UHI) Effect Using Land Surface Temperature (LST) and Normalized Difference Built-Up Index (NDBI): A Case Study on Paphos, Cyprus. *COMECAP 2025*, 65. <https://doi.org/10.3390/cesp2025035065>
- Dong, J., Zuo, J., & Luo, J. (2020). Development of a Management Framework for Applying Green Roof Policy in Urban China: A Preliminary Study. *Sustainability*, 12(24), 10364. <https://doi.org/10.3390/sul122410364>
- Dong, X., & He, B.-J. (2023). A standardized assessment framework for green roof decarbonization: A review of embodied carbon, carbon sequestration, bioenergy supply, and operational carbon scenarios. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 182, 113376. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113376>
- Egerer, M., Annighöfer, P., Arzberger, S., Burger, S., Hecher, Y., Knill, V., Probst, B., & Suda, M. (2024). Urban oases: The social-ecological importance of small urban green spaces. *Ecosystems and People*, 20(1), 2315991. <https://doi.org/10.1080/26395916.2024.2315991>
- EU. (2021). EU Adaptation Strategy—European Commission. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/adaptation-and-resilience-climate-change/eu-adaptation-strategy_en
- European Commission. (2020). Communication From the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions (No. COM(2020) 380 final). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0380>
- European Commission. (2021). Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: EU soil strategy for 2030 – Reaping the benefits of healthy soils for people, food, nature and climate. European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021DC0699>
- Favretto A. (2018). Urban Heat Island analysis with Remote Sensing and GIS methods: An application in the Trieste area (North-East of Italy). 215–229. <https://doi.org/10.13128/bsgi.v1i1.101>
- Fouad, M. M., Shihata, L. A., & Morgan, E. I. (2017). An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1499–1511. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.141>
- Frigerio, I., & De Amicis, M. (2016). Mapping social vulnerability to natural hazards in Italy: A suitable tool for risk mitigation strategies. *Environmental Science & Policy*, 63, 187–196. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.06.001>
- Godoi, N. M. I., Gomes, R. C., & Longo, R. M. (2025). Contributions of urban green spaces to cities: A literature review. *Sustainable Environment*, 11(1), 2464418. <https://doi.org/10.1080/27658511.2025.2464418>
- Greene, R., Devillers, R., Luther, J. E., & Eddy, B. G. (2011). GIS-Based Multiple-Criteria Decision Analysis. *Geography Compass*, 5(6), 412–432. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2011.00431.x>
- Grunwald, L., Heusinger, J., & Weber, S. (2017). A GIS-based mapping methodology of urban green roof ecosystem services applied to a Central European city. *Urban Forestry & Urban Greening*, 22, 54–63. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.01.001>
- Harada, Y., & Whitlow, T. H. (2020). Urban Rooftop Agriculture: Challenges to Science and Practice. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00076>
- Harlan, S. L., Brazel, A. J., Prashad, L., Stefanov, W. L., & Larsen, L. (2006). Neighborhood microclimates and vulnerability to heat stress. *Social Science & Medicine*, 63(11), 2847–2863. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2006.07.030>
- International Energy Agency. (2021). Empowering Cities for a Net Zero Future: Unlocking resilient, smart, sustainable urban energy systems. OECD. <https://doi.org/10.1787/7a222c8b-en>
- Islam, S., Alam, M. R., & Rashid, K. J. (2023). Identification of potential rooftops for gardening and contributions of RTGs to improve the socio-economic condition and promote a sustainable urban environment in the changing climatic condition of Bangladesh. In *Urban Commons, Future Smart Cities and Sustainability* (pp. 511–532). Springer.
- ISPRA. (2024). Soil Sealing Assessment and Monitoring in the Mediterranean Coastal Watershed. ISPRA Istituto Superiore per La Protezione e La Ricerca Ambientale. <https://www.isprambiente.gov.it/en/projects/soil-and-territory/soil-sealing-assessment-and-monitoring-in-the-mediterranean-coastal-watershed>
- ISTAT. (2024). ISTAT [Dataset]. <https://demo.istat.it/app/?i=POS&a=2024&l=en>
- Jacobson, M. Z., & Jadhav, V. (2018). World estimates of PV optimal tilt angles and ratios of sunlight incident upon tilted and tracked PV panels relative to horizontal panels. *Solar Energy*, 169, 55–66. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.030>
- Janhäll, S. (2015). Review on urban vegetation and particle air pollution – Deposition and dispersion. *Atmospheric Environment*, 105, 130–137. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.052>
- Jankowski, P. (1995). Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods. *International Journal of Geographical Information Systems*, 9(3), 251–273. <https://doi.org/10.1080/02693799508902036>
- Juhola, S. (2016). Barriers to the implementation of climate change adaptation in land use planning: A multi-level governance problem? *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 8(3), 338–355. <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-03-2014-0030>
- Karakaya, E., & Sriwannawit, P. (2015). Barriers to the adoption of photovoltaic systems: The state of the art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 60–66. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.058>
- Khodadad, M., Sanei, M., Aguilar-Barajas, I., Cárdenas-Barrón, L. E., Ramírez-Orozco, A. I., Rizzo, A., & Khan, A. Z. (2025). Green infrastructure site prioritization to improve urban flood resilience in Monterrey and Brussels using a decision support model. *Scientific Reports*, 15(1), 10744. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-94851-z>
- Khoshelham, K., Nardinocchi, C., Frontoni, E., Mancini, A., & Zingaretti, P. (2010). Performance evaluation of automated approaches to building detection in multi-source aerial data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(1), 123–133. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.09.005>
- Kim, S. Y., Na, W., Jun, C., Seo, H., & Kim, Y. (2021). Hydrological Performance of Green Roof Systems: A Numerical Investigation. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 806697. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.806697>

*Versione non ufficiale in lingua italiana tradotta in maniera automatica con intelligenza artificiale. Fare riferimento al testo originale in inglese a questo link <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2026.102840>

- Kohlhase, J. E. (2013). The new urban world 2050: Perspectives, prospects and problems. *Regional Science Policy & Practice*, 5(2), 153–166. <https://doi.org/10.1111/rsp3.12001>
- Kostadinović, D., Jovanović, M., Bakić, V., & Stepanić, N. (2023). Mitigation of urban particulate pollution using lightweight green roof system. *Energy and Buildings*, 293, 113203. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113203>
- Krenz, K., & Amann, L. (2025). Urban heat island effect: Examining spatial patterns of socio-demographic inequalities in Greater London. *Cities & Health*, 9(5), 901–924. <https://doi.org/10.1080/23748834.2025.2489854>
- Kumar, P., Sahani, J., Corada Perez, K., Ahlawat, A., Andrade, M. D. F., Athanassiadou, M., Cao, S.-J., Collins, L., Dey, S., Di Sabatino, S., Halios, C. H., Harris, F., Horton, C., Inostroza, L., Jones, L., Rodding Kjeldsen, T., McCallan, B., McNabola, A., Kumar Mishra, R., ... Yao, R. (2025). Urban greening for climate resilient and sustainable cities: Grand challenges and opportunities. *Frontiers in Sustainable Cities*, 7. <https://doi.org/10.3389/frsc.2025.1595280>
- Lambarki, R., Achbab, E., Maanan, M., & Rhinane, H. (2022). EVALUATION OF THE POTENTIAL OF GREEN ROOFS APPLIED TO AN URBAN FABRIC USING GIS AND REMOTE SENSING DATA CASE OF THE NADOR CITY / MOROCCO. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVI-4/W3-2021, 177–184. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-4-W3-2021-177-2022>
- Lambarki, R., Elmostafa, A., Maanan, M., & Rhinane, H. (2025). Assessing the potential of green roofs in urban areas: A multicriteria Boolean analysis utilizing GIS and remote sensing data in the city of Nador, Morocco. *Green Technologies and Sustainability*, 3(2), 100171. <https://doi.org/10.1016/j.grets.2025.100171>
- Langemeyer, J., Wedgwood, D., McPhearson, T., Baró, F., Madsen, A. L., & Barton, D. N. (2020). Creating urban green infrastructure where it is needed – A spatial ecosystem service-based decision analysis of green roofs in Barcelona. *Science of The Total Environment*, 707, 135487. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135487>
- Lee, H., Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., & Barrett, K. (2023). Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.
- Li, Y., Chen, K., Ding, R., Zhang, J., & Hao, Y. (2023). How do photovoltaic poverty alleviation projects relieve household energy poverty? Evidence from China. *Energy Economics*, 118, 106514. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106514>
- Liberalleso, T., Oliveira Cruz, C., Matos Silva, C., & Manso, M. (2020). Green infrastructure and public policies: An international review of green roofs and green walls incentives. *Land Use Policy*, 96, 104693. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104693>
- Liberalleso, T., Silva, C. M., & Cruz, C. O. (2024). Combined strategies for green roof incentive policies in Lisbon: Evaluating the potentiality of concession grants and identifying priority intervention areas. *Urban Forestry & Urban Greening*, 99, 128451. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128451>
- Lin, H., & Li, X. (2025). The Role of Urban Green Spaces in Mitigating the Urban Heat Island Effect: A Systematic Review from the Perspective of Types and Mechanisms. *Sustainability*, 17(13), 6132. <https://doi.org/10.3390/su17136132>
- Liu, F., Zhao, Y., Muhammad, R., Liu, X., & Chen, M. (2020). Impervious Surface Expansion: A Key Indicator for Environment and Urban Agglomeration—A Case Study of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area by Using Landsat Data. *Journal of Sensors*, 2020, 1–21. <https://doi.org/10.1155/2020/3896589>
- Ma, C., Yuan, C., Zhang, Y., & Hu, H. (2024). Mapping Utilizable Rooftop Areas to Meet Food Security Goal in Four High-Density Cities: A Deep Learning and GIS Integrated Approach (SSRN Scholarly Paper No. 4970797). *Social Science Research Network*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4970797>
- Ma, X., Miao, S., Masson, V., Wurtz, J., Zhang, Y., Wang, J., Huang, X.-Y., & Yan, C. (2024). The synergistic effects of urbanization and an extreme heatwave event on urban thermal environment in Paris. *Urban Climate*, 53, 101785. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101785>
- Madre, F., Vergnes, A., Machon, N., & Clergeau, P. (2014). Green roofs as habitats for wild plant species in urban landscapes: First insights from a large-scale sampling. *Landscape and Urban Planning*, 122, 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.11.012>
- Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), 703–726. <https://doi.org/10.1080/13658810600661508>
- Marín, C., El Bachawati, M., & Pérez, G. (2023). The impact of green roofs on urban runoff quality: A review. *Urban Forestry & Urban Greening*, 90, 128138. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128138>
- Martin-Chivelet, N., Kapsis, K., Wilson, H. R., Delisle, V., Yang, R., Olivieri, L., Polo, J., Eisenlohr, J., Roy, B., Maturi, L., Otnes, G., Dallapiccola, M., & Upalakshi Wijeratne, W. M. P. (2022). Building-Integrated Photovoltaic (BIPV) products and systems: A review of energy-related behavior. *Energy and Buildings*, 262, 111998. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111998>
- Meerow, S., & Newell, J. P. (2017). Spatial planning for multifunctional green infrastructure: Growing resilience in Detroit. *Landscape and Urban Planning*, 159, 62–75. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.10.005>
- Megyesi, B., Gholipour, A., Cuomo, F., Canga, E., Tsatsou, A., Zihlmann, V., Junge, R., Milosevic, D., & Pineda-Martos, R. (2024). Perceptions of stakeholders on nature-based solutions in urban planning: A thematic analysis in six European cities. *Urban Forestry & Urban Greening*, 96, 128344. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128344>
- Melius, J., Margolis, R., & Ong, S. (2013). Estimating Rooftop Suitability for PV: A Review of Methods, Patents, and Validation Techniques (No. NREL/TP--6A20-60593, 1117057; p. NREL/TP--6A20-60593, 1117057). <https://doi.org/10.2172/1117057>
- Mentens, J., Raes, D., & Hermys, M. (2006). Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning*, 77(3), 217–226. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.010>
- Mesimäki, M., Hauru, K., & Lehvävirta, S. (2019). Do small green roofs have the possibility to offer recreational and experiential benefits in a dense urban area? A case study in Helsinki, Finland. *Urban Forestry & Urban Greening*, 40, 114–124. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.10.005>
- Milojevic-Dupont, N., Wagner, F., Nachtigall, F., Hu, J., Brüser, G. B., Zumwald, M., Biljecki, F., Heeren, N., Kaack, L. H., Pichler, P.-P., & Creutzig, F. (2023). EUBUCCO v0.1: European building stock characteristics in a common and open database for 200+ million individual buildings. *Scientific Data*, 10(1), 147. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02040-2>
- Mohtat, N., & Khirfan, L. (2021). The climate justice pillars vis-à-vis urban form adaptation to climate change: A review. *Urban Climate*, 39, 100951. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100951>
- Mutani, G., & Todeschi, V. (2020). The Effects of Green Roofs on Outdoor Thermal Comfort, Urban Heat Island Mitigation and Energy Savings. *Atmosphere*, 11(2), 123. <https://doi.org/10.3390/atmos11020123>

*Versione non ufficiale in lingua italiana tradotta in maniera automatica con intelligenza artificiale. Fare riferimento al testo originale in inglese a questo link <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2026.102840>

- Netusil, N. R., Lavelle, L., Dissanayake, S., & Ando, A. W. (2022). Valuing the public benefits of green roofs. *Landscape and Urban Planning*, 224, 104426. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104426>
- Nguyen Dang, H.-A., Legg, R., Khan, A., Wilkinson, S., Ibbett, N., & Doan, A.-T. (2022). Social impact of green roofs. *Frontiers in Built Environment*, 8. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.1047335>
- Ni, P., Yan, Z., Yue, Y., Xian, L., Lei, F., & Yan, X. (2023). Simulation of solar radiation on metropolitan building surfaces: A novel and flexible research framework. *Sustainable Cities and Society*, 93, 104469. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104469>
- Ni, P., Zheng, H., Sun, H., Lei, F., Wang, Y., Qin, J., Wang, W., Song, J., Yue, Y., Yao, S., Bi, W., Zhang, D., Zhang, X., Yan, J., Tao, Y., Yan, Z., Qin, G., Lin, B., & He, B.-J. (2025). Building integrated photovoltaics that move beyond rooftops. *Cell Reports Physical Science*, 6(8), 102725. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2025.102725>
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N., Gaffin, S., Köhler, M., Liu, K. K. Y., & Rowe, B. (2007). Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services. *BioScience*, 57(10), 823–833. <https://doi.org/10.1641/B571005>
- Olowu, T. O., Sundararajan, A., Moghaddami, M., & Sarwat, A. I. (2018). Future Challenges and Mitigation Methods for High Photovoltaic Penetration: A Survey. *Energies*, 11(7), 1782. <https://doi.org/10.3390/en11071782>
- Osma-Pinto, G., & Ordóñez-Plata, G. (2019). Measuring factors influencing performance of rooftop PV panels in warm tropical climates. *Solar Energy*, 185, 112–123. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.053>
- Oudin Åström, D., Bertil, F., & Joacim, R. (2011). Heat wave impact on morbidity and mortality in the elderly population: A review of recent studies. *Maturitas*, 69(2), 99–105. <https://doi.org/10.1016/j.maturitas.2011.03.008>
- Palmer, D., Koumpli, E., Cole, I., Gottschalg, R., & Betts, T. (2018). A GIS-Based Method for Identification of Wide Area Rooftop Suitability for Minimum Size PV Systems Using LiDAR Data and Photogrammetry. *Energies*, 11(12), 3506. <https://doi.org/10.3390/en11123506>
- Pappalardo S., S., Zanetti, C., & Todeschi, V. (2023). Mapping urban heat islands and heat-related risk during heat waves from a climate justice perspective: A case study in the municipality of Padua (Italy) for inclusive adaptation policies. *Landscape and Urban Planning*, 238, 104831. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104831>
- Peroni, F., Codato, D., Buscemi, L., Cibrario, M., Pappalardo, S. E., & De Marchi, M. (2023). Rethinking urban riparian ecosystems as a frontline strategy to counter climate change: Mapping 60 years of carbon sequestration evolution in Padua, Italy. *Frontiers in Climate*, 5, 1235886. <https://doi.org/10.3389/fclim.2023.1235886>
- Peroni, F., & Pappalardo, S. E. (2024). Climate justice in future cities: Geographical perspectives for inclusive urban resilience and adaptation. *Landscape and Urban Planning*, 244, 104998. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104998>
- PNACC. (2023). Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici—(PNACC)—Documentazione—Valutazioni e Autorizzazioni Ambientali—VAS - VIA - AIA. <https://va.mite.gov.it/it-IT/Oggetti/Documentazione/7726/11206>
- Pochodyła-Ducka, E., Burandt, P., & Glińska-Lewczuk, K. (2025). GIS-based framework for assessing priority locations for blue-green infrastructure implementation in urban areas. *Ecological Indicators*, 176, 113718. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113718>
- Pristeri, G., Peroni, F., Pappalardo, S. E., Codato, D., Masi, A., & De Marchi, M. (2021). Whose Urban Green? Mapping and Classifying Public and Private Green Spaces in Padua for Spatial Planning Policies. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(8), 538. <https://doi.org/10.3390/ijgi10080538>
- Rafida, S. (2004). FLL Guideline. https://www.academia.edu/14476032/FLL_Guideline
- Rowe, D. (2010). Green Roofs as a Means of Pollution Abatement. *Environmental Pollution (Barking, Essex : 1987)*, 159, 2100–2110. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.10.029>
- Santos, T., Tenedório, J., & Gonçalves, J. (2016). Quantifying the City's Green Area Potential Gain Using Remote Sensing Data. *Sustainability*, 8(12), 1247. <https://doi.org/10.3390/su8121247>
- Schindler, B. Y., Blaustein, L., Lotan, R., Shalom, H., Kadas, G. J., & Seifan, M. (2018). Green roof and photovoltaic panel integration: Effects on plant and arthropod diversity and electricity production. *Journal of Environmental Management*, 225, 288–299. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.017>
- Schmidtlein, M. C., Deutsch, R. C., Piegorsch, W. W., & Cutter, S. L. (2008). A Sensitivity Analysis of the Social Vulnerability Index. *Risk Analysis*, 28(4), 1099–1114. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2008.01072.x>
- Shafique, M., Luo, X., & Zuo, J. (2020). Photovoltaic-green roofs: A review of benefits, limitations, and trends. *Solar Energy*, 202, 485–497. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.101>
- Shi, Z., Li, X., Hu, T., Yuan, B., Yin, P., & Jiang, D. (2023). Modeling the intensity of surface urban heat island based on the impervious surface area. *Urban Climate*, 49, 101529. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101529>
- Slootweg, M., Hu, M., Vega, S. H., van't Zelfde, M., van Leeuwen, E., & Tukker, A. (2023). Identifying the geographical potential of rooftop systems: Space competition and synergy. *Urban Forestry & Urban Greening*, 79, 127816.
- Souviney, M. M., Mattalia, G., & Pieroni, A. (2024). Impacts of Industrialization on Foraging in Peri-Urban Areas. Insights from Padua, NE Italy. *Human Ecology*, 52(3), 653–665. <https://doi.org/10.1007/s10745-024-00513-5>
- Specht, K., Reynolds, K., & Sanyé-Mengual, E. (2017). Community and Social Justice Aspects of Rooftop Agriculture. In F. Orsini, M. Dubbeling, H. De Zeeuw, & G. Gianquinto (Eds.), *Rooftop Urban Agriculture* (pp. 277–290). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57720-3_17
- Talwar, P., Verma, N., Khatri, H., Ahire, P. D., Chaudhary, G., Lindenberger, C., & Vivekanand, V. (2023). A systematic review of photovoltaic-green roof systems in different climatic conditions focusing on sustainable cities and societies. *Sustainable Cities and Society*, 98, 104813. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104813>
- Tan, H., Kotamarthi, R., Wang, J., Qian, Y., & Chakraborty, T. C. (2023). Impact of different roofing mitigation strategies on near-surface temperature and energy consumption over the Chicago metropolitan area during a heatwave event. *Science of The Total Environment*, 860, 160508. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160508>
- Todeschi, V., Pappalardo, S. E., Zanetti, C., Peroni, F., & Marchi, M. D. (2022). Climate Justice in the City: Mapping Heat-Related Risk for Climate Change Mitigation of the Urban and Peri-Urban Area of Padua (Italy). *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/ijgi11090490>
- Van Der Roest, E., Voeten, J. G. W. F., & Cirkel, D. G. (2023). Increasing solar panel output with blue-green roofs in water-circular and nature inclusive urban development. *Building and Environment*, 244, 110704. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110704>
- Williams, K. J. H., Lee, K. E., Sargent, L., Johnson, K. A., Rayner, J., Farrell, C., Miller, R. E., & Williams, N. S. G. (2019). Appraising the

- psychological benefits of green roofs for city residents and workers. *Urban Forestry & Urban Greening*, 44, 126399. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126399>
- Wójcik-Madej, J., Sowińska-Świerkosz, B., Pérez Luque, G., & Michalik-Śniezek, M. (2026). Retrofitting existing buildings by the use of modular green roofs. *Building and Environment*, 287, 113900. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113900>
- Wu, Y., Furuya, K., Xiao, B., & Ma, R. (2025). Optimizing Urban Green Roofs: An Integrated Framework for Suitability, Economic Viability, and Microclimate Regulation. *Land*, 14(9), 1742. <https://doi.org/10.3390/land14091742>
- Xie, P., Barbarossa, V., Erisman, J. W., & Mogollón, J. M. (2024). A modeling framework to assess the crop production potential of green roofs. *Science of The Total Environment*, 907, 168051. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168051>
- Yan, Q., Yu, J., & Dong, N. (2026). Evaluating the carbon benefits and economic efficiency of photovoltaic-green roof systems in China: A nationwide application analysis. *Environmental Impact Assessment Review*, 117, 108224. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2025.108224>
- Zhang, J., Zhang, H., & Qi, R. (2024). A study of size threshold for cooling effect in urban parks and their cooling accessibility and equity. *Scientific Reports*, 14(1), 16176. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67277-2>
- Zhang, X., Shen, L., & Chan, S. Y. (2012). The diffusion of solar energy use in HK: What are the barriers? *Energy Policy*, 41, 241–249. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.10.043>
- Zhang, Z., Qian, Z., Chen, M., Zhu, R., Zhang, F., Zhong, T., Lin, J., Ning, L., Xie, W., Creutzig, F., Tang, W., Liu, L., Yang, J., Pu, Y., Cai, W., Pu, Y., Liu, D., Yang, H., Su, H., Yan, J. (2025). Worldwide rooftop photovoltaic electricity generation may mitigate global warming. *Nature Climate Change*, 15(4), 393–402. <https://doi.org/10.1038/s41558-025-02276-3>
- Zsiborács, H., Vincze, A., Pintér, G., & Hegedűsné Baranyai, N. (2023). A Comparative Examination of the Electricity Saving Potentials of Direct Residential PV Energy Use in European Countries. *Sustainability*, 15(8), 6490. <https://doi.org/10.3390/su15086490>