



UNIONE EUROPEA
Fondo Sociale Europeo



La borsa di dottorato è stata cofinanziata con risorse del
Programma Operativo Nazionale Ricerca e Innovazione 2014-2020, risorse FSE REACT-EU
Azione IV.4 "Dottorati e contratti di ricerca su tematiche dell'innovazione"
e Azione IV.5 "Dottorati su tematiche Green"



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

PAESAGGI ED ECOSISTEMI URBANI

Rappresentazione, monitoraggio e valutazione delle forme e delle dinamiche
insediative e delle infrastrutture verdi

Tesi di Dottorato in **Paesaggio e Ambiente**

Dipartimento di Architettura e Progetto

Sapienza Università di Roma

Coordinatrice: Prof.ssa Lucina Caravaggi

Dottoranda:

Angela Cimini

XXXVII ciclo PON **"Foreste urbane e servizi ecosistemici in ambiente mediterraneo"**

Tutor:

Prof. Marco Marchetti

Prof. Giuseppe Scarascia Mugnozza

Prof. Gianni Celestini

Prof.ssa Daniela De Leo

PAESAGGI ED ECOSISTEMI URBANI. Rappresentazione, monitoraggio e valutazione delle forme e delle
dinamiche insediative e delle infrastrutture verdi © 2025 by Cimini Angela is licensed under Creative Commons
Attribution 4.0 International.



Collegio dei docenti:

Maurizio Barbieri, *Sapienza Università di Roma*

Rita Biasi, *Università della Tuscia, Viterbo*

Alessandra Capuano, *Sapienza Università di Roma*

Gianni Celestini, *Sapienza Università di Roma*

Donatella Cialdea, *Università del Molise*

Piermaria Corona, *Università della Tuscia, Viterbo*

Isotta Cortesi, *Università di Napoli Federico II*

Elisabetta Cristallini, *Sapienza Università di Roma*

Daniela De Leo, *Università di Napoli Federico II*

Fabio Di Carlo, *Sapienza Università di Roma*

Laura Valeria Ferretti, *Sapienza Università di Roma*

Alfonso Giancotti, *Sapienza Università di Roma*

Cristina Imbroglini, *Sapienza Università di Roma*

Federica Morgia, *Sapienza Università di Roma*

Sara Protasoni, *Politecnico di Milano*

Luca Reale, *Sapienza Università di Roma*

Donatella Scatena, *Sapienza Università di Roma*

Giuseppe Scarascia Mugnozza, *Università della Tuscia, Viterbo*

Leone Spita, *Sapienza Università di Roma*

Fabrizio Toppetti, *Sapienza Università di Roma*

*Alla mia mamma
e ai miei nonni
Angelo e Amina*

INDICE

INTRODUZIONE.....	1
Abstract.....	9
1. PAESAGGI URBANI E INFRASTRUTTURE VERDI NEL CONTESTO DELLE POLITICHE DI SOSTENIBILITÀ E DELL' URBANIZZAZIONE GLOBALE	15
1.1 Approccio e obiettivi della ricerca.....	16
1.2. Contesto normativo.....	23
1.3 Paesaggi urbani in evoluzione.....	29
1.3.1 Leggere il paesaggio tramite l'uso e la copertura del suolo	31
1.3.2 Il paradosso dell'uso del suolo urbano: il consumo di suolo	42
1.4 Il ruolo delle foreste urbane nel ripristino degli ecosistemi urbani.....	47
1.4.1 Mitigazione dell'isola di calore urbana.....	55
1.4.1.1 Il telerilevamento per il monitoraggio dell'isola di calore urbana	59
1.4.2 L'accessibilità al verde pubblico per l'inclusione sociale, la salute e il benessere della popolazione	67
1.4.2.1 Esperienze di mappatura dell'accessibilità alle aree verdi pubbliche.....	69
2. INNOVAZIONI E APPLICAZIONI	73
2.1 Area studio.....	74
2.2 Rappresentare e monitorare il paesaggio urbano.....	78
2.2.1 Struttura e progettazione della griglia di popolazione nazionale	82
2.2.2 Metodologia per la produzione della carta nazionale del Continuum urbano - rurale e del DEGURBA	85
2.2.2.1 Introduzione degli attributi di uso alla carta del suolo consumato	93
2.2.2.2 Sperimentazione dell'approccio partecipato alla mappatura del consumo di suolo.....	94
2.2.3 SDG 11.3.1 "Ratio of Land Consumption Rate to Population Growth Rate"	99
2.2.4 Gli obiettivi del <i>Nature Restoration Regulation</i>	104
2.3 ...e il paesaggio forestale.....	95
2.3.1 Le categorie e le tipologie forestali	97
2.3.2 La densità della copertura arborea	98
2.3.3 I boschi e gli alberi fuori foresta	99
2.4 Foreste urbane e comfort climatico: strumenti e approcci multi-scalari per l'analisi dell'isola di calore.....	101
2.4.1 Carta nazionale di Temperatura media diurna estiva al suolo.....	104
2.4.1.1 Confronto tra dati MODIS e Landsat	107

2.4.2 Composizione del paesaggio e isola di calore urbana: modelli sintetici per l'analisi del fenomeno	108
2.4.3 Un approccio statistico per mappare le anomalie termiche	111
2.4.3.1 Indicatori a supporto della pianificazione degli interventi di forestazione	114
2.5 Foreste Urbane e diritto al verde: strumenti e tecniche GIS per un'analisi spaziale dell'accessibilità.....	116
2.5.1 Struttura e progettazione della griglia di analisi	120
2.5.2 Individuazione delle aree verdi pubbliche urbane.....	121
2.5.2.1 Individuazione dei punti di accesso ai GUPS.....	122
2.5.3 Creazione della rete di instradamento	124
2.5.4 Indicatori di disponibilità e accessibilità ai GUPS.....	125
2.5.4.1 Isole verdi: accessibilità ad aree verdi <i>cool-spot</i> nel comune di Roma.....	126
3. RISULTATI E DISCUSSIONI	127
3.1 Il Paesaggio urbano in Italia.....	128
3.1.1 Continuum urbano-rurale e DEGURBA: confronti e applicazioni	128
3.1.1.1 L'uso del suolo e la web app a supporto delle attività di monitoraggio	146
3.1.2 Valutazione dell'SDG 11.3.1 e degli obiettivi della <i>Nature Restoration Regulation</i>	148
3.2 Il Paesaggio forestale nella Città Metropolitana di Roma Capitale.....	160
3.2.1 Categorie e tipologie forestali	161
3.2.2 Boschi e Alberi Fuori Foresta.....	168
3.2.3 Densità della copertura arborea.....	171
3.3 Strategie di forestazione urbana: indicatori per la mitigazione efficace dell'isola di calore.....	175
3.3.1 Carta nazionale della temperatura media diurna estiva al suolo	176
3.3.2 Il fenomeno isola di calore urbana in Italia.....	179
3.3.3 Aree prioritarie di interventi di forestazione nel comune di Roma	199
3.4 Disponibilità e accessibilità alle aree verdi pubbliche urbane nelle 14 città metropolitane.....	209
3.4.1 Città metropolitane a confronto	210
3.4.1.1 Strati informativi intermedi propedeutici alla mappatura dell'accessibilità	213
3.4.2 Approfondimento sul comune di Roma	217
4. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	229
Elenco delle pubblicazioni esite dal dottorato	240
Pubblicazioni su riviste	240
Pubblicazioni delle cartografie su portali web.....	241
Partecipazioni a convegni.....	242
APPENDICE.....	244
BIBLIOGRAFIA	I

ACRONIMI

Sigla	Significato	Sigla	Significato
AFF	Alberi Fuori Foresta	LCRPGR	Land Consumption Rate to Population Growth Rate
AN	Aree Neutre	LST	Land Surface Temperature
ASI	Agenzia Spaziale Italiana	MIRIFICUS	RIForestazione per l'Isola di Calore Urbana tramite Satelliti
BES	Benessere Equo e Sostenibile	NBSs	Nature Based Solutions
CLC	CORINE Land Cover	NDCL	Normalized Difference of Consumed Land
CLC+	CORINE Land Cover Plus Backbone	NRR	Nature Restoration Regulation
CLMS	Copernicus Land monitoring Service	OLwTC	Other Land with Tree Cover
CMRC	Città Metropolitana di Roma Capitale	OSM	OpenStreetMap
CS	Cold - Spot	PA	Pubblica Amministrazione
DEF	Documento di Economia e Finanza	PGR	Population Growth Rate
DEGURBA	Degree of Urbanisation	PNR	Piani Nazionali di Ripristino
EAGLE	Action Group on Land monitoring in Europe	PNRR	Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza
EFI	European Forest Institute	PON	Programma Operativo Nazionale
EO	Earth Observation	PRG	Piano Regolatore generale
ESM	European Settlement Map	SDG	Sustainable Development Goals
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations	SE	Servizi Ecosistemici
FRA	Global Forest Resources Assessment	SEEA-EA	System of Environmental Economic Accounting - Ecosystem Accounting
GADA	Grado di Artificializzazione e Densità della copertura Arborea	SUHI	Surface Urban Heat Island
GEE	Google Earth Engine	TCD	Tree Cover Density
GHS	Global Human Settlement	TOF	Tree Outside Forest
GUPS	Green Urban Public Space	TUFF	Testo Unico in materia Forestale e Filiere Forestali
HRL	High Resolution Layer	UA	Urban Atlas
HS	Hot - Spot	UGS	Urban Green Space
ISPRA	Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale	UHI	Urban Heat Island
IUCN	International Union for Conservation of Nature	UN	United Nation
LCR	Land Consumption Rate	VeBS	Il buon uso degli spazi Verdi e Blu per la promozione della Salute e del Benessere

INTRODUZIONE

Il tema delle foreste urbane e dei relativi servizi ecosistemici, si colloca in un più ampio quadro di studi sulle dinamiche di urbanizzazione, riconosciute come uno dei processi di cambiamento globale più impattanti dell'Antropocene, in grado di alterare la struttura biofisica dei paesaggi con effetti che trascendono i margini delle città segnando profondamente gli ecosistemi e i servizi forniti all'uomo e ad altre specie. I prossimi decenni saranno caratterizzati da un continuo processo di urbanizzazione che, entro il 2050, assorbirà quasi il 70% della popolazione mondiale, sempre più esposta a rischi legati ad una relazione non più sostenibile tra cambiamenti di uso e copertura del suolo e cambiamento climatico.

Tali scenari hanno rafforzato sia la consapevolezza sociale sui benefici ambientali e sociali delle aree verdi nei paesaggi urbani, che l'interesse verso il ruolo svolto dagli ecosistemi urbani nei processi di adattamento, portando l'Assemblea generale delle Nazioni Unite a introdurre l'Obiettivo di Sviluppo Sostenibile (*Sustainable Development Goals* - SDG) 11 «Rendere le città e gli insediamenti umani inclusivi, sicuri, resilienti e sostenibili». Due target, afferenti all'obiettivo 11 e tra loro strettamente relazionati, permettono di misurare l'efficacia delle politiche di adattamento in termini di uso efficiente del suolo (target 11.3.1 *“Ratio of land consumption rate to population growth rate”*) e disponibilità e accessibilità alle aree verdi pubbliche (target 11.7 *“by 2030, provide universal access to safe, inclusive and accessible, green and public space, particular for woman and children, older persons and persons with disabilities”*). Sugli stessi principi si basa anche la regola 3-30-300 introdotta da Cecil Konijnendijk e riconosciuta dall'Unione Internazionale per la Conservazione della Natura (IUCN), dall'Agenzia Ambientale Europea e dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) come asset strategico per la progettazione di città più verdi, eque e salubri. La centralità e l'interdipendenza dei temi relativi al consumo di suolo, all'accessibilità alle aree verdi pubbliche, al miglioramento del microclima urbano, all'adozione di *Nature Based Solutions* (NBS), tra le quali gli interventi di forestazione, è stata riconosciuta anche dal recente regolamento europeo sul ripristino della natura (*Nature Restoration Regulation* – NRR) che obbliga gli stati membri ad azzerare la perdita

netta di aree verdi urbane entro il 2030 e ad assicurarne l'implementazione a partire dal primo gennaio 2031. E ancora, dalle strategie europee su foreste, biodiversità, suolo, ambiente urbano e clima che hanno veicolato la stesura delle corrispondenti politiche nazionali, tra le quali la strategia nazionale del verde urbano, le politiche di rigenerazione urbana, il Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici e le iniziative locali sull'adattamento climatico degli ecosistemi urbani, che suggeriscono la necessità di strumenti cartografici operativi, gratuiti e accessibili per tutti i cittadini e per le professionalità meno esperte.

Il lavoro si inserisce all'interno del tema di ricerca del Programma Operativo Nazionale (PON) "Foreste Urbane e Servizi Ecosistemici con particolare attenzione all'ambiente mediterraneo" che ha l'obiettivo di fornire strumenti utili a supportare la corretta implementazione di Green Infrastructure e NBS nei contesti paesaggistici più vulnerabili sia dal punto di vista ambientale che sociale.

La ricerca ha coinvolto numerosi esperti e studiosi in diversi ambiti, dall'ingegneria ambientale, alle scienze forestali, al telerilevamento, all'architettura del paesaggio, e alla pianificazione urbanistica impegnati in progetti promossi da alcuni dei principali istituti di ricerca che lavorano su diversi aspetti legati al tema della forestazione urbana e dei servizi ecosistemici, con particolare riferimento alla produzione di servizi cartografici per la Pubblica Amministrazione (PA). Parte dell'attività di ricerca è stata svolta in collaborazione con la *facilty* italiana dell'*European Forest Institute* (EFI), attiva sul territorio nazionale con progetti e ricerche sulla gestione e pianificazione delle foreste urbane, del paesaggio e delle *biocities*, per inquadrare il tema di ricerca e definire gli obiettivi.

L'obiettivo generale della ricerca sviluppato nell'ambito delle attività di ricerca condotte in collaborazione con l'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) riguarda la produzione di strumenti per la rappresentazione degli ecosistemi urbani italiani coerenti con le definizioni adottate in ambito europeo e internazionale dalla NRR e dagli SDG connessi con il tema della forestazione urbana. Tale obiettivo è stato perseguito privilegiando l'utilizzo di dati *Open*

Source ad elevato contenuto informativo e accuratezza prodotti in ambito nazionale ed europeo, con particolare riferimento ai dati del servizio di monitoraggio del territorio del Programma *Copernicus* (*Copernicus Land Monitoring Service* – CLMS).

In dettaglio, sono state sviluppate tre tipologie di prodotti per la rappresentazione del tessuto insediativo, che differiscono tra loro per risoluzione spaziale e caratteristiche dei dati di popolazione utilizzati come input, ma tutti basati sul modello DEGURBA, definito da Eurostat e implementato dal *Joint Research Centre* (JRC) per la realizzazione del dato globale GHS-SMOD. La prima rappresentazione, con risoluzione spaziale di 10 metri e possibilità di aggiornamento annuale, utilizza una griglia di popolazione ottenuta spazializzando i dati demografici ISTAT di livello comunale sul tessuto residenziale ed è stata messa a punto a partire dall'integrazione della carta nazionale del consumo di suolo di ISPRA con dati CLMS. Questa sperimentazione costituisce un primo tentativo di applicazione delle metodologia Eurostat a dati nazionali ad altissima risoluzione e alta frequenza di aggiornamento.

Una seconda rappresentazione, sempre a 10 metri di risoluzione, è stata realizzata utilizzando dati demografici ISTAT di dettaglio sub-comunale che, sebbene non consentano un aggiornamento annuale, costituiscono un utile strumento per la conduzione di analisi a scala intra-comunale, mantenendo comunque una frequenza di aggiornamento in linea con quella richiesta dalle Nazioni Unite per il calcolo dell'indicatore SDG 11.3.1. Quest'ultimo è stato calcolato rispetto al periodo 2011-2021, mostrando una generale tendenza all'impermeabilizzazione di superfici naturali e alla perdita di copertura arborea negli ecosistemi urbani, che si manifesta principalmente per densificazione del tessuto insediativo, anche in assenza di reale aumento della domanda abitativa o di crescita demografica. La mappatura trova applicazione anche nell'ambito delle attività di *Ecosystem Accounting* svolte a livello nazionale per adempiere agli obblighi Comunitari di contabilità degli ecosistemi, secondo lo schema concettuale del *System of Environmental Economic Accounts - Ecosystem Accounting* (SEEA-EA), adottato anche dalle Nazioni Unite.

La terza rappresentazione degli ecosistemi urbani è coerente con il dato globale GHS-SMOD dal punto di vista geometrico e tematico, e costituisce uno strumento operativo per l'individuazione dei comuni soggetti agli obblighi della NRR.

Il primo obiettivo specifico ha riguardato lo sviluppo di una metodologia per l'aggiornamento della carta forestale su base tipologica della regione Lazio relativa al 2011, tramite integrazione di dati nazionali e CLMS. Tale attività è stata svolta in collaborazione con ISPRA e con l'Università degli studi della Tuscia sull'area studio della Città Metropolitana di Roma Capitale ed ha permesso la realizzazione di tre strati cartografici con risoluzione spaziale di 10 metri, aggiornati al 2018 e coerenti e comparabili tra loro dal punto di vista geometrico. Oltre all'aggiornamento delle geometrie della carta delle tipologie e delle categorie forestali, è stato introdotto uno strato relativo alla densità media della copertura arborea e un prodotto in grado di distinguere i Boschi (individuati a partire dalla definizione adottata dal Testo unico in materia di Foreste e Filiere forestali – TUFF) dagli Alberi Fuori Foresta (AFF), anche distinguendoli rispetto al contesto paesaggistico. Gli strumenti tecnici e metodologici sviluppati per la conduzione di questa attività hanno trovato applicazione anche nelle attività di mappatura degli ecosistemi svolte a livello nazionale in conformità con lo schema SEEA-EA.

Altri due obiettivi specifici del lavoro si sono focalizzati sulla valutazione di due servizi ecosistemici associati al verde urbano, con particolare riferimento alla capacità di mitigazione del fenomeno isola di calore urbano e all'accessibilità alle aree verdi pubbliche.

Lo studio della capacità della copertura arborea e, in generale, delle superfici naturali, di regolare il microclima urbano è stato condotto nell'ambito della partecipazione al progetto MIRIFICUS (Monitoraggio degli Interventi di Forestazione per l'Isola di Calore tramite Satelliti) finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) e svolto in collaborazione con ISPRA e il dipartimento IBE del CNR di Firenze che ha l'obiettivo di mettere a punto servizi aggiornabili e scalabili, basati su sistemi satellitari di *Earth Observation* (EO), fruibili dalla PA, per il monitoraggio

del fenomeno isola di calore urbana e l'individuazione delle aree prioritarie di interventi di forestazione.

L'attività ha permesso di produrre una mappatura a scala nazionale delle temperature superficiali basata su immagini Landsat a 30 metri, con un aumento di risoluzione di oltre 30 volte rispetto ai precedenti prodotti a copertura nazionale distribuiti da ISPRA e basati su dati MODIS. Questo nuovo strumento ha consentito di condurre analisi di dettaglio a scala intra-urbana, con particolare riferimento alla valutazione del contributo della copertura arborea alla mitigazione delle ondate di calore, anche rispetto a orografia, caratteristiche climatiche e contesto geografico. Tale approfondimento ha riguardato, in particolare, il territorio delle 14 città metropolitane, in quanto principali destinatarie dei finanziamenti previsti dalla misura Misura 2 - Componente 4 - Investimento 3.1 "Tutela e valorizzazione del verde urbano ed extraurbano" del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) per l'attuazione di progetti di forestazione urbana.

Infine, la sperimentazione condotta sul tema della mappatura dell'accessibilità alle aree verdi pubbliche è stata promossa nell'ambito della collaborazione con ISPRA al progetto VeBS (Il buon uso degli spazi verdi e blu per la promozione della salute e del benessere), supportato dal Ministero della Salute e coordinato dall'Istituto Superiore di Sanità, che mira a promuovere la conoscenza sull'uso e sui benefici delle infrastrutture verdi e blu nelle aree urbane e nelle aree protette.

Questo studio propone la valutazione dell'indicatore SDG 11.7 rispetto agli ecosistemi urbani delle 14 città metropolitane italiane, come definiti dal modello DEGURBA di Eurostat e dalla NRR. Viene testata una metodologia basata su dati *Open Source* e strumenti di analisi di rete, per la fornitura di una mappatura della disponibilità e accessibilità agli spazi verdi pubblici urbani, da cui emerge che meno del 30% dei residenti delle città metropolitane ha accesso a un'area verde pubblica entro un percorso a piedi di 300 m. Inoltre, viene svolta un'analisi critica sulla definizione geometrica e semantica delle aree verdi pubbliche urbane adottata dai principali strumenti cartografici europei e internazionali, che sottolinea il ruolo strategico del *crowdsourcing* ma

anche la necessità di regole di mappatura che rendano i dati più coerenti con gli obiettivi di monitoraggio stabiliti a livello istituzionale.

Le metodologie e gli strumenti cartografici sviluppati nell'ambito di questa ricerca sono stati oggetto di pubblicazione, tra l'altro, su riviste scientifiche in *peer-review*, sono state inserite nelle edizioni 2022, 2023 e 2024 del Rapporto ISPRA "Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici", nelle edizioni 2023 e 2024 dell' "Atlante dei dati ambientali" dell'ISPRA, all'interno del libro del Professor Sandro Fabbro "Postmetropoli e sistemi ecopolitani", come contributo nel volume "*Soil Science in Italy – 1861 to 2024*" e nel numero 317 della rivista Urbanistica Informazioni. Inoltre, le mappe digitali sono state pubblicate all'interno dell'Atlante digitale del Sistema Informativo Nazionale Ambientale (SINA) dell'ISPRA e sul Web-GIS messo a punto dall'azienda Deda Next.

Nella parte conclusiva è stata condotta un'applicazione dei principali strumenti sviluppati nella ricerca sull'area studio del comune di Roma, allo scopo di evidenziarne le possibilità di integrazione e la natura operativa. In dettaglio, l'analisi sulle anomalie termiche è stata messa in relazione con la disponibilità di aree verdi pubbliche e con la loro composizione in termini di copertura del suolo, correlandole, inoltre, anche con la presenza di popolazione. Ciò ha permesso di individuare le aree più critiche dal punto di vista termico e/o di disponibilità e accessibilità alle aree verdi, fornendo un utile strumento per orientare la pianificazione degli interventi di forestazione, nell'ottica di migliorare la fornitura di servizi ecosistemici sia di tipo ricreativo che di regolazione microclimatica nelle aree critiche.

Tale esperienza mostra come gli strumenti sviluppati in questa ricerca si possano configurare come un valido supporto alla pianificazione di progetti di paesaggio indirizzati a concretizzare iniziative strategiche di adattamento basate sulla natura, supportate da evidenze scientifiche e che siano efficaci e condivise a diverse scale di osservazione e ambiti disciplinari, e in grado di potenziare i servizi ecosistemici offerti alla popolazione negli ecosistemi urbani.

Parole chiave

Accessibilità; cambiamento climatico; consumo di suolo; copertura del suolo; isola di calore urbana; forestazione urbana; *Nature Restoration Regulation*; obiettivi di sviluppo sostenibile; servizi ecosistemici.

Abstract

Urban forests and their ecosystem services are part of a broader framework of studies on the dynamics of urbanization, recognized as one of the most impactful global change processes of the Anthropocene, capable of altering the biophysical structure of landscapes with effects that transcend the margins of cities, profoundly affecting ecosystems and the services they provide. The coming decades will be characterized by a continuous process of urbanization that, by 2050, will absorb almost 70% of the world's population, increasingly exposed to risks related to the relationship between changes in land use, land cover and climate change. Such scenarios have strengthened awareness of the environmental and social benefits of green areas in urban landscapes and increased interest in the role played by cities in adaptation processes, leading the United Nations General Assembly to introduce Sustainable Development Goal (SDG) 11 "Make cities and human settlements inclusive, safe, resilient and sustainable". Two targets, belonging to objective 11 and closely linked to each other, allow to measure the effectiveness of adaptation policies in terms of efficient land use (target 11.3.1 "Ratio of land consumption rate to population growth rate") and availability and accessibility to public green areas (target 11.7 "by 2030, provide universal access to safe, inclusive and accessible, green and public space, particularly for women and children, older persons and persons with disabilities"). The 3-30-300 rule is also based on the same objectives; it was introduced by Cecil Konijnendijk and recognized by the International Union for Conservation of Nature (IUCN), the European Environment Agency and the World Health Organization (MDG) as a strategic asset for the design of greener, fairer and healthier cities. The importance and interdependence of issues related to land consumption, accessibility to public green areas, improvement of the urban microclimate, adoption of Nature Based Solutions (NBS) and forestation interventions, has also been recognized by the recent Nature Restoration Regulation (NRR, which obliges member states to eliminate the net loss of urban green areas by 2030 and to ensure its implementation starting from 2031), but

also by the European strategies on forests, biodiversity, soil, urban environment and climate that have driven the drafting of the corresponding national policies, including the National Urban Green Strategy, Urban Regeneration Policies, the National Plan for Adaptation to Climate Change and local initiatives on climate adaptation of urban areas, which suggest the need for operational, free and accessible cartographic tools for all.

The work relates to the theme of the National Operational Programme (PON) “Urban Forests and Ecosystem Services with particular attention to the Mediterranean environment” which aims to provide useful tools to support the correct implementation of Green Infrastructure and NBS in the most vulnerable landscape contexts from an environmental and social point of view.

The research involved numerous experts in environmental engineering, forestry sciences, remote sensing, landscape architecture and urban planning, engaged in projects promoted by the main research institutes working on the topic of urban forestry and ecosystem services, with reference to the production of cartographic services for the Public Administration (PA). Part of the research activity was carried out in collaboration with the Italian structure of the European Forest Institute (EFI), which supports projects such as ‘Parco Italia’ and research on the management and planning of urban forests, landscapes and biocities.

The first part of the work is part of the research activities carried out by the Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) on the topic of Land Consumption, in particular, on the development of tools for the representation of urban landscapes and urban forests consistent with the definitions adopted at a European and international level by the main statistical frameworks for the accounting of ecosystems, the NRR and with the SDGs. To achieve this objective, the use of Open-Source data with high information content and accuracy produced at national and European level was a priority, with particular reference to data from the Copernicus Land Monitoring Service (CLMS).

In detail, three types of products for the representation of the settlement pattern have been developed, which differ from each other in spatial resolution and population data used as input, but which are all based on the DEGURBA model (which was defined by Eurostat and implemented by the Joint Research Centre in the global GHS-SMOD data). The first representation, with a spatial resolution of 10 meters and the possibility of annual updating, uses a population grid obtained by spatializing ISTAT municipal demographic data on residential areas (identified starting from the integration of the ISPRA national land consumption map with CLMS data). This experiment was a first attempt to apply the Eurostat methodology to national data with very high resolution and high update frequency.

The second representation, also at 10 meters resolution, is based on ISTAT demographic data for census sections (which guarantee a sub-municipal level of detail). This population data does not allow for an annual update but is a useful tool for conducting analyses at an intra-municipal scale, while maintaining an update frequency in line with that required by the United Nations for the calculation of the SDG 11.3.1 indicator. The latter was calculated with respect to the period 2011-2021, showing a tendency towards the sealing of natural surfaces in urban ecosystems, which mainly occurs as a densification of the consolidated urban pattern, even in the absence of a real increase in housing demand or population growth.

The mapping was also used in ecosystem accounting activities carried out at national level, to fulfill ecosystem accounting obligations, according to the conceptual scheme of the System of Environmental Economic Accounts - Ecosystem Accounting (SEEA-EA), also adopted by the United Nations.

The third representation is consistent with the global GHS-SMOD data from a geometric and thematic point of view and constitutes an operational tool for identifying the municipalities subject to the NRR obligations.

The second part of the research concerned the development of a methodology for updating the typological forest map of the Latium region for 2011, through the integration of national and CLMS data. This activity was carried out on the study area of the Metropolitan City of Rome and allowed the development of three 10-meters-resolution cartographic layers, updated to 2018 and coherent and comparable from a geometric point of view. In addition to the updating of the geometries of the forest typologies and categories map, a new layer was introduced relating to the average tree cover density and a product that distinguishes forest (identified starting from the definition adopted by the Law on Forests and Forestry Industries - TUFF) from Trees Outside the Forest (TOF), also distinguished in terms of land use context. The technical and methodological tools developed for this activity have also found application in ecosystem mapping activities carried out at national level in accordance with the SEEA-EA scheme.

The third part of the work concerned the evaluation of two ecosystem services associated with green urban areas, with particular reference to the capacity to mitigate the urban heat island phenomenon and to the accessibility of green open public spaces.

The study of the capacity of tree cover and, in general, of natural surfaces, to regulate the urban microclimate was conducted within the MIRIFICUS project (Monitoring of Forestry Interventions for the Heat Island via Satellites) funded by the Italian Space Agency (Agenzia Spaziale Italiana - ASI) and carried out in collaboration with ISPRA and the IBE department of the CNR in Florence, which aims to develop updatable and scalable services, based on Earth Observation (EO) satellite systems, usable by the PA, for monitoring the urban heat island phenomenon and identifying priority areas for forestry interventions.

The activity allowed to produce a national-scale mapping of surface temperatures based on 30-meter Landsat images, with an increase in resolution of over 30 times compared to the previous national coverage products distributed by ISPRA (based on 250-meter MODIS data). This new tool allowed to conduct detailed analyses at an intra-urban scale, with particular reference to the evaluation of the contribution of tree

cover to the mitigation of heat waves, also with respect to orography, climatic characteristics and geographical context. This in-depth analysis concerned, in particular, the territory of the 14 Italian metropolitan cities, as the main recipients of the funding provided by the measure Measure 2 - Component 4 - Investment 3.1 "Protection and enhancement of urban and extra-urban greenery" of the National Recovery and Resilience Plan (Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza - PNRR) for the implementation of urban forestry projects.

Finally, the research conducted on the topic of mapping accessibility to public green areas was promoted within the VeBS project (for the good use of green and blue spaces for the promotion of health and well-being), supported by the Ministry of Health and coordinated by the Istituto Superiore di Sanità, which aims to promote knowledge on the use and benefits of green and blue infrastructures in urban areas and protected areas.

This study proposes the evaluation of this objective for the urban area of the 14 Italian metropolitan cities, as defined by EUROSTAT and adopted by the United Nations and the Nature Restoration Regulation (NRR). A methodology based on open-source data and network analysis tools is tested for the provision of an unprecedented mapping of the availability and accessibility to green urban public spaces, which shows that less than 30% of metropolitan city residents have access to a green space within 300 m on foot, according to OpenStreetMap data (less than one in five for the Urban Atlas data). Furthermore, a critical analysis on the geometric and semantic definition of green urban public spaces adopted by the main European and international tools is carried out, which underlines the strategic role of crowdsourcing but also the need for mapping rules that make the data more consistent with the monitoring objectives set at the institutional level.

The methodologies and cartographic tools developed in this research have been published, among others, in peer-reviewed scientific journals and ISPRA institutional reports and publications and are included in the book "Postmetropoli e sistemi ecopolitani" by Professor Sandro Fabbro, as a contribution in the volume "Soil Science in Italy – 1861 to 2024" and

in issue 317 of the Urbanistica Informazioni magazine. Furthermore, the digital maps have been published in the Digital Atlas of the National Environmental Information System (Sistema Informativo Nazionale Ambientale - SINA) of ISPRA and on the Web-GIS developed by the company Deda Next.

Finally, an application of the main tools developed in the research was conducted on the municipality of Rome in order to highlight the possibilities of integration and the operational nature of these tools. In detail, the analysis of thermal anomalies was related to the availability of green urban public spaces and to their composition in terms of land cover, also correlating these information with the presence of population. This allows us to identify the most critical areas from a thermal point of view and/or in terms of availability and accessibility of green areas, providing a useful tool to support the planning of forestation interventions, with a view to improving the provision of microclimatic regulation and recreational ecosystem services.

The research shows how the proposed tools can be configured as a valid support for the planning of landscape projects aimed at realizing strategic adaptation initiatives based on nature, which are supported by scientific evidence, effective and shared at different scales of observation and with respect to different disciplinary fields, and also able to enhance the ecosystem services offered to the population in urban ecosystems.

1. PAESAGGI URBANI E INFRASTRUTTURE VERDI NEL CONTESTO DELLE POLITICHE DI SOSTENIBILITÀ E DELL' URBANIZZAZIONE GLOBALE

1.1 Approccio e obiettivi della ricerca

Premessa

Gli studi condotti sui benefici che le foreste urbane sono in grado di garantire all'interno dei paesaggi urbani hanno sottolineato la necessità di adottare un approccio olistico nella progettazione dei nuovi interventi di forestazione, basato su evidenze scientifiche in grado di rappresentare e sintetizzare le complesse relazioni tra dinamiche territoriali, sociali e ambientali che si concretizzano nel paesaggio. È sempre più chiaro che la forestazione urbana non deve essere più intesa solo come una mera questione estetica, bensì come una risposta strategica necessaria, e l'urbanizzazione deve essere concepita come un atto che ricostruisce e ripristina l'equilibrio ecologico, promuovendo un modello di vita sostenibile (Raffaelli & Frid, 2010; Scarascia-Mugnozza et al., 2023).

La domanda di ricerca dalla quale prende avvio il lavoro nasce nell'ambito del tirocinio svolto durante il primo anno di ricerca presso la facility italiana dell'*European Forest Institute* (EFI), ed è rintracciabile negli studi di Cecil Konijnendijk sul significato di "urbano" nella selvicoltura urbana (Konijnendijk et al., 2006) e, in modo particolare, sull'esigenza di adottare definizioni standardizzate, operative e riconosciute dalle principali politiche internazionali ed europee allo scopo di mettere in atto un percorso strategico di ripristino degli ecosistemi urbani, mirato e condiviso (European Commission, 2021a).

Oltre alla coerenza con le indicazioni tecniche e metodologiche fornite a livello normativo e istituzionale, un ulteriore principio alla base del lavoro è l'utilizzo di strumenti liberamente accessibili, nell'ottica di favorire la replicabilità, la democratizzazione e la fruibilità delle informazioni da parte dei soggetti coinvolti nel monitoraggio e nella gestione degli ecosistemi urbani.

La ricerca si pone come obiettivo principale la realizzazione di una rappresentazione spaziale delle aree urbane che parte da questi presupposti, risultando idonea a supportare il monitoraggio degli ecosistemi urbani coerentemente con le indicazioni di legge, e a

orientare la definizione di adeguate misure di ripristino, tra cui l'implementazione di soluzioni basate sulla natura, come gli interventi di forestazione.

La mappatura degli ecosistemi urbani si lega alle attività dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) per il monitoraggio del consumo di suolo e per la produzione di dati di supporto all'applicazione delle politiche Comunitarie di sostenibilità. Infatti, le attività di ricerca del dottorato hanno contribuito alla realizzazione dello strato "Continuum-urbano rurale", che è stato proposto da ISPRA per approfondire le dinamiche di trasformazione degli ecosistemi urbani e che ha trovato applicazione nel calcolo dell'indicatore 11.3.1 degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile della Nazioni Unite e nell'ambito di due attività di reporting di livello comunitario: la redazione dei piani di ripristino nazionali previsti dal NRR e la rappresentazione delle tipologie di ecosistemi, in conformità con le indicazioni fornite dal System of Environmental Economic Accounting - Ecosystem Accounting (SEEA - EA), per adempiere agli obblighi di rendicontazione previsti dal regolamento UE 691/2011. Inoltre, la ricerca ha stimolato l'avvio di un'iniziativa di GIS partecipativo, che ha contribuito alle attività di aggiornamento della carta nazionale del suolo consumato di ISPRA/SNPA.

La rappresentazione delle aree urbane è alla base della definizione dell'obiettivo secondario della ricerca, ossia la mappatura della copertura arborea in ambito urbano e la valutazione dei servizi ecosistemici erogati dalle foreste urbane. In particolare, la mappatura della copertura arborea ha interessato, in via preliminare, l'area studio della Città Metropolitana di Roma Capitale, mentre la valutazione dei servizi ecosistemici si è concentrata sulla valutazione dell'accessibilità alle aree verdi pubbliche urbane e sull'analisi del fenomeno isola di calore urbana. Questa scelta è stata guidata dalla possibilità di sviluppare parte delle attività in collaborazione con enti pubblici e privati coinvolti nello studio degli ecosistemi urbani e nello sviluppo di servizi cartografici utili alla pubblica amministrazione.

La valutazione dell'accessibilità alle aree verdi pubbliche urbane ha preso l'avvio con il coinvolgimento nel progetto VeBS (il buon uso degli spazi Verdi e Blu per la promozione della Salute del benessere) da parte di ISPRA, e, successivamente, è stata sviluppata proponendo l'inclusione nelle attività di ricerca dell'azienda Deda Next, già impegnata nella conduzione di studi sull'accessibilità a scala locale destinati alle amministrazioni comunali.

I prodotti cartografici e le analisi condotte in questa ricerca sui servizi di regolazione microclimatica offerti dalle foreste in ambito urbano e, più in generale, sul tema del fenomeno isola di calore urbana, hanno permesso di migliorare il dettaglio geometrico delle analisi pubblicate nel rapporto ISPRA sul consumo di suolo, e hanno trovato applicazione nell'ambito del progetto MIRIFICUS, proposto dall'Istituto per la Bioeconomia del Consiglio Nazionale delle Ricerche (IBE-CNR) in collaborazione con ISPRA e finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana.

In questo contesto gli approfondimenti sul comune di Roma hanno costituito il punto di avvio per sistematizzare tutti i prodotti messi a punto nella ricerca e condurre un'analisi multi-criteriale per l'individuazione delle aree prioritarie di interventi di forestazione.

Di seguito viene presentata una panoramica degli approcci adottati per raggiungere l'obiettivo principale (la mappatura degli ecosistemi urbani e delle foreste urbane), gli obiettivi secondari (la valutazione dei servizi ecosistemici) e per sviluppare gli approfondimenti sulle dinamiche di trasformazione del tessuto insediativo.

Rappresentazione degli ecosistemi urbani

Il primo obiettivo della ricerca riguarda la necessità di stabilire la dimensione spaziale degli ecosistemi urbani, analizzando, in primo luogo, i principali prodotti cartografici attualmente disponibili per la mappatura delle aree urbane, allo scopo di individuarne i limiti e le peculiarità, anche rispetto alle richieste di monitoraggio stabilite dai dispositivi normativi vigenti. A partire da tale disamina è stata realizzata una rappresentazione del sistema insediativo a scala nazionale, basata sull'integrazione di dati *Open Source* ad altissima risoluzione sviluppati

dai principali istituti e centri di ricerca italiani con quelli del servizio di monitoraggio del territorio del Programma Europeo *Copernicus* (*Copernicus Land Monitoring Service* - CLMS); tali prodotti, realizzati con diverse metodologie e rispetto a diverse scale di rappresentazione, consentono di supportare il monitoraggio dei paesaggi urbani in conformità con le indicazioni degli SDG delle Nazioni Unite e con il nuovo regolamento sul ripristino della natura (*Nature Restoration Regulation* – NRR) (European Parliament & Council of the European Union, 2024).

Approfondimento sulle dinamiche insediative

Come suggerito dalle strategie del *Green Deal* europeo e prescritto dalla più recente NRR, la tutela e lo sviluppo di nuove foreste urbane passa necessariamente per l’azzeramento del consumo di suolo, che rappresenta la prima e più impattante causa della perdita di risorse naturali nei contesti più densamente urbanizzati (*Munafò, M., 2024*). In questo senso, particolare attenzione è stata rivolta all’analisi delle dinamiche insediative, valutando la distribuzione territoriale del consumo di suolo rispetto alle tipologie di tessuto urbano, allo scopo di cogliere la tendenza al verificarsi di fenomeni, come la densificazione, che spesso avvengono a discapito delle aree naturali residuali intercluse nel tessuto urbano e periurbano, la cui conservazione e (ri)progettazione in un’ottica ecosistemica deve essere percepita come un atto necessario. A tale scopo è stata sviluppata una terna di indicatori inediti (indicatori normalizzati di consumo di suolo) (*Cimini et al., 2023*), in grado di descrivere la tendenza alla densificazione o alla dispersione urbana sulla base della distribuzione spaziale di nuovi cambiamenti, ed è stata condotta una valutazione dell’indicatore SDG 11.3.1 “*Land Consumption Rate to Population Growth Rate*” in linea con la metodologia fornita dalle Nazioni Unite, che permette di rilevare la relazione tra variazione del consumo di suolo e dinamiche demografiche, quindi la capacità di utilizzare in modo efficiente la risorsa Suolo (*United Nations Human Settlements Programme, 2021*). Le informazioni sul consumo di suolo sono state messe in relazione anche con le indicazioni del nuovo regolamento sul ripristino della natura,

fornendo una prima ricognizione dei comuni che saranno sottoposti agli obblighi normativi, e di verificare, al loro interno, il rispetto delle prescrizioni. Una parte della ricerca ha riguardato anche la procedura di monitoraggio del consumo di suolo, portando allo sviluppo di una piattaforma *Web-GIS* per la condivisione dei dati preliminari con i principali *stakeholder* istituzionali e incentivando una maggiore condivisione e democratizzazione dell'informazione spaziale.

Mappatura della copertura arborea e valutazione dei servizi ecosistemici

Lo studio degli elementi specifici del paesaggio urbano, ossia le foreste e i servizi ecosistemici erogati da esse, passa necessariamente per una adeguata rappresentazione, intesa come strumento essenziale per monitorare gli obiettivi strategici, che funga da base per condurre analisi ed effettuare valutazioni sulle condizioni degli ecosistemi urbani e sulla capacità di erogare servizi ecosistemici. In questo senso, il lavoro si è inserito nella lacuna cartografica relativa all'aggiornamento della mappa forestale nazionale prodotta dalla Milizia Forestale nel 1936 (*Ferretti et al., 2018*), colmata lo scorso 14 novembre 2024 dal Sistema Informativo Nazionale Forestale (SINFor) (*SINFor, 2024*), e ha proposto una metodologia di aggiornamento basata su dati *Open-Source* implementata sul territorio della Città Metropolitana di Roma Capitale (CMRC). Il lavoro di aggiornamento della carta forestale su base tipologica della regione Lazio promossa dall'ISPRA e dal Dipartimento per l'Innovazione nei sistemi Biologici, Agroalimentari e Forestali (DIBAF) dell'Università della Tuscia ha riguardato l'uso di mappe di copertura del suolo di ultima generazione, afferenti al CLMS, per restituire una cartografia forestale della Città Metropolitana di Roma in linea con la definizione di bosco fornita dal Testo Unico in materia di Foreste e Filiere Forestali (TUFF) (Testo unico in materia di foreste e filiere forestali, 2018), realizzata secondo una metodologia basata su tecniche GIS di analisi spaziale, replicabile in altri contesti territoriali, aggiornabile, a basso costo e con un dettaglio spaziale e tematico maggiore rispetto al dato precedentemente disponibile.

Tra gli effetti più rilevanti legati alla rimozione della copertura arborea e delle superfici naturali in ambito urbano, l'isola di calore urbana assume

particolare rilievo a causa della magnitudo degli impatti che produce sull'ambiente e sulla salute umana (*Heaviside et al., 2017; Morabito et al., 2016*). Il telerilevamento unitamente all'uso dei più moderni sistemi di gestione ed elaborazione dei *Big EO Data* rappresentano un'opportunità per mettere a punto strumenti operativi utili alla Pubblica Amministrazione (*Gomes et al., 2020*) sia per individuare le aree prioritarie di interventi che per monitorare l'efficacia degli interventi di forestazione. La ricerca fa uso di queste tecnologie per migliorare i prodotti utilizzati attualmente dall'ISPRA per il monitoraggio dell'isola di calore a livello nazionale, e propone un'applicazione sul comune di Roma per individuare le aree critiche dal punto di vista termico, e quelle candidabili in via prioritaria per interventi di forestazione urbana tenendo conto delle previsioni urbanistiche vigenti.

Le aree urbane con una maggiore presenza di spazi verdi tendono a offrire maggiori benefici alla comunità, mentre i quartieri più svantaggiati spesso soffrono della mancanza di accesso a tali risorse (*Groenewegen et al., 2006*). Valutare la disponibilità e la capacità di accesso alle aree verdi pubbliche nei paesaggi urbani introducendo variabili in grado di fornire un quadro esaustivo sulla capacità di questi spazi di erogare servizi ecosistemici, permette sia di rispondere in modo efficace alle richieste di monitoraggio dell'SDG 11.7.1 ("*by 2030, provide universal access to safe, inclusive and accessible, green and public space, particularly for woman and children, older persons and persons with disabilities*") (*UN Habitat, 2018a*) ma anche di fornire strumenti utili a sostenere l'applicazione delle più recenti linee guida per la selvicoltura urbana adottate dall'IUCN, e conosciute con il nome "regola 3-30-300" (*Konijnendijk, 2023*), che sono diventate il quadro di riferimento per molte iniziative di revisione dei piani urbanistici a livello europeo (*Département de la Communication Externe et de l'Information Nantes Métropole, 2024; Owen et al., 2024*).



Figura 1 Schema sintetico dell'approccio della ricerca

1.2. Contesto normativo

Le sfide imposte da una crisi climatica, che si manifesta con eventi sempre più frequenti ed estremi soprattutto alla scala urbana e metropolitana delle regioni del mediterraneo, hanno stimolato la stesura di diverse politiche e strategie tematiche che riconoscono il ruolo esercitato dagli spazi verdi e, in particolare, dalla copertura arborea, nella mitigazione dei rischi e sottolineano la necessità di salvarli e implementarli, contribuendo al raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità stabiliti a livello globale ed europeo.

Nel 2015, i 193 Stati membri delle Nazioni Unite hanno adottato, come programma d'azione dell'Agenda 2030, un insieme di 17 obiettivi universali (SDG) che rappresentano un piano globale per affrontare le sfide più urgenti del pianeta, includendo povertà, disuguaglianze, cambiamenti climatici, degrado ambientale, pace e giustizia (*United Nations, 2015*). La loro introduzione segna un impegno collettivo verso un futuro più equo e sostenibile, incoraggiando la cooperazione tra governi, settore privato, società civile e cittadini, al fine di garantire il benessere delle generazioni presenti e future. Armonizzare la ricerca sulle foreste urbane con gli SDG significa definire un percorso strategico utile a perseguire il loro raggiungimento (*Devisscher et al., 2019*). Nei paesaggi urbani, foreste e spazi verdi contribuiscono al raggiungimento dell'SDG 11 “Rendere le città e gli insediamenti umani inclusivi, sicuri, duraturi e sostenibili” migliorando i servizi ecosistemici di regolazione microclimatica e fornendo spazi ricreativi. In particolare, gli indicatori SDG 11.3.1 e 11.7.1 sono intimamente connessi con il tema delle foreste urbane perché la possibilità di concretizzare nei paesaggi urbani interventi di forestazione o, più in generale, di garantire la fornitura di servizi ecosistemici fondamentali per la salute e il benessere dei cittadini, passa necessariamente per la capacità di utilizzare in modo efficiente il suolo (*Bottalico et al., 2022; Sallustio et al., 2020*). Nel primo indicatore (“*Ratio of land consumption rate to population growth rate*”), tale attitudine viene valutata mettendo in relazione il consumo di suolo e le dinamiche demografiche; il secondo (“*Average share of the built-up area of cities that is open space for public use for all, by sex, age and*

persons with disabilities”), valuta la capacità di un’area urbana di garantire ai cittadini l’accesso ad un’area verde pubblica entro un breve percorso a piedi dalla residenza o dal posto di lavoro (Figura 2).



Figura 2. *Sustainable Development Goals* (SDG) delle Nazioni Unite e i target dell’obiettivo 11 “Città e comunità sostenibili”.

La capacità di conservare e potenziare le aree verdi in ambito urbano è anche l’obiettivo della NRR che si impone nel quadro politico europeo come pilastro portante del *Green Deal*. La normativa, entrata in vigore il 18 agosto 2024, riconosce l’urgenza di ripristinare lo stato di salute degli ecosistemi degradati, obbligando tutti gli Stati membri dell’Unione Europea ad azzerare la perdita netta di aree verdi urbane e di copertura arborea entro il 2030 e a garantirne l’aumento entro il 2050 (articolo 8). L’articolo 13 supporta questa prescrizione fissando, l’obbligo di contribuire alla piantagione di almeno 3 miliardi di alberi, in particolare nelle aree urbane. Gli Stati sono inoltre obbligati a redigere i Piani Nazionali di Ripristino (PNR) nei quali identificare le misure di ripristino necessarie e colmare le lacune conoscitive. Ciò include la mappatura degli ecosistemi urbani, le misure di ripristino e le modalità di

monitoraggio della loro efficacia, la quantificazione delle aree da ripristinare, la descrizione degli impatti socioeconomici previsti e la definizione dei metodi di finanziamento (articolo 14).

Gli obiettivi di forestazione stabiliti nella NRR sono contenuti anche nella Strategia Forestale Europea e nella Strategia nazionale per la biodiversità 2020 – 2030 (*European Commission, 2021b; Ministero della Transizione Ecologica, 2022*), parzialmente attuata in Italia tramite il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), che costituisce lo strumento operativo del programma europeo straordinario “NextGenerationEU”. In particolare, la Misura 2 - Componente 4 - Investimento 3.1 “Tutela e valorizzazione del verde urbano ed extraurbano” stabilisce i criteri per ammettere a finanziamento interventi di rimboschimento nelle 14 città metropolitane. A fine 2023 il Ministero dell’Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE) ha dichiarato che i 35 progetti approvati nel primo avviso pubblico hanno permesso la messa a dimora di oltre 2 milioni di piante. L’investimento è anche finalizzato a frenare il consumo di suolo come prerequisito essenziale per conservare superfici naturali utili alla progettazione di nuove foreste urbane, sostenendo gli obiettivi della Strategia europea per il suolo per il 2030 (*European Commission, 2021d; Ministero della Transizione Ecologica, 2021*).

È chiaro che la disponibilità di aree verdi è diventata un indicatore cruciale per promuovere l'integrazione dei valori della biodiversità nella pianificazione urbana. In Italia l'introduzione degli standard urbanistici ha certamente consentito, finora, la salvaguardia di spazi verdi inediti all'interno di territori che sempre più rapidamente venivano investiti dai processi di urbanizzazione; tuttavia, queste aree verdi sono spesso la testimonianza di una deriva quantitativa dell'applicazione dello standard che si contrappone alla ricerca di un piano che ne garantisca la qualità in termini di accessibilità e funzioni ecosistemiche, sia di tipo ambientale che sociale, diventando semplice elemento di arredo urbano da inserire negli interstizi della città (*Baioni et al., 2021; Giaino, 2021; Lanzani, 2020*). Nel post-antropocene, le città dovrebbero evolvere verso modelli in cui il verde non è più un'aggiunta marginale, ma

un'infrastruttura vitale, in grado di rigenerare il tessuto urbano e affrontare le sfide ambientali attuali e future. Le dinamiche urbane devono superare l'approccio dualistico che ha separato città e natura, mirando a una visione ecocentrica, in cui gli esseri umani sono riconosciuti come parte di una rete ecologica più ampia (*Epting, 2017; Rülke et al., 2020*). La Strategia Nazionale per il Verde Urbano (*Atelli et al., 2018*) è stata sviluppata proprio con l'obiettivo di stimolare una trasformazione politica e culturale in grado di sostenere queste nuove forme di pianificazione che enfatizzano il contributo delle infrastrutture verdi e delle NBS sia in contesti urbani che rurali, e dando attuazione alla Strategia europea per la biodiversità al 2030 (“Bringing nature back into our lives”) (*European Commission, 2020b*). Quest’ultima invita le città con più di 20.000 abitanti a dotarsi di un Piano del verde urbano o Piano Urbano per la Natura (PUN); tuttavia, questi piani, promossi anche dalla legge 10/2013 (Norme per lo sviluppo degli spazi verdi urbani, 2013), si configurano come strumenti volontari e integrativi della Pianificazione Urbanistica Generale e sono stati approvati solo da 11 dei 106 Comuni capoluogo di provincia (*Chiesura Anna et al., 2024*).

A livello nazionale, tra gli asset strategici contenuti nella Strategia Nazionale di adattamento ai cambiamenti climatici (SNCC) (*Ministero dell’Ambiente della Tutela del Territorio e del Mare, 2015*) predisposta in attuazione della Strategia EU 2013 aggiornata al 2021(*European Commission, 2021c*), particolare rilevanza assumono le basi conoscitive sulle quali costruire strumenti di supporto decisionale ma anche la necessità di renderle fruibili e comprensibili per decisori politici, *stakeholder*, comunità locali e cittadini.

Questo lavoro si inserisce in questo complesso quadro politico e strategico riassunto in Tabella 1 nel quale emerge la necessità di contribuire alla produzione di nuovi strumenti di supporto decisionale, coerenti con le direttive internazionali ed europee di monitoraggio degli obiettivi di sostenibilità, di elevato dettaglio spaziale e temporale.

Tabella 1 Quadro di sintesi delle principali politiche, strategie e normative in vigore a livello internazionale, europeo e nazionale contenente disposizioni in materia di forestazione urbana, servizi ecosistemici e gestione sostenibile dei paesaggi urbani.

Contesto	Strategie/Normative	Anno	Obiettivi
Internazionale	Agenda 2030 Sustainable Development Goals	2015	- SDG 11 Rendere le città e gli insediamenti umani inclusivi, sicuri, resilienti e sostenibili. - SDG 13 Promuovere azioni a tutti i livelli per combattere il cambiamento climatico
	Formula 3-30-300	2019	Aumentare la copertura arborea nelle città, migliorare la qualità della vita
	International Forest Model Network	2019	Promuovere la cooperazione internazionale nella gestione sostenibile delle aree urbane e nella conservazione della biodiversità.
	Accordo di Parigi	2016	- Mantenere il riscaldamento globale al di sotto di 1,5°C - Contrastare gli effetti dei cambiamenti climatici
	New Urban Agenda	2016	Sviluppare una definizione globale e armonizzata delle città;
Europeo	Strategia Europea sulla biodiversità per il 2030	2020	- Riportare la natura nei suoli agricoli; - Arginare il consumo di suolo - Sviluppare “piani urbani della natura” che includono misure per realizzare spazi verdi accessibili e con elevata biodiversità
	Strategia UE per le foreste per il 2030	2021	- Tutelare, ricostituire ed ampliare le foreste dell'UE per combattere i cambiamenti climatici, investire la perdita di biodiversità e garantire ecosistemi forestali resilienti e multifunzionali; - Monitoraggio strategico delle foreste, comunicazione e raccolta di dati;
	Strategia UE per il suolo per il 2030	2021	- Combattere la desertificazione; - Azzerare il consumo di suolo;
	Strategia UE di adattamento ai cambiamenti climatici	2021	Migliorare le conoscenze e la disponibilità dei dati, rendendoli più accessibili ai cittadini.;

Nazionale			Rendere l'adattamento più sistemico promuovendo soluzioni di adattamento basate sulla natura
	Next GenerationEU		- Transizione verde; - transizione digitale
	Nature Restoration Regulation	2024	- Azzeramento della perdita netta di aree verdi entro il 2030 - Piantare almeno 3 miliardi di alberi
	D.M. 1444/68 Norme sugli standard urbanistici	1968	9 m² di aree verdi pubbliche per abitante insediato o da insediare
	Legge 10/2013 Piani comunali del verde	2013	- Censimento del verde - Regolamento del verde - Piano del verde
	Strategia Nazionale del Verde Urbano	2018	- Passare da metri quadrati a ettari di superfici verdi; - Ridurre le superfici asfaltate; - Adottare le foreste urbane come riferimento strutturale e funzionale del verde urbano
	Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza	2021	Tutela e valorizzazione del verde urbano ed extraurbano
	Piano Strategico Nazionale per l'attuazione della PAC 2023/2027	2022	- Promuovere la gestione attiva e sostenibile delle foreste; - Investimenti non produttivi finalizzati al contrasto al consumo di suolo agricolo - Piani e azioni volte a favorire l'adattamento ai cambiamenti climatici e a potenziare l'erogazione di servizi ecosistemici
	Strategia Nazionale Forestale	2022	
	Strategia Nazionale Biodiversità 2030	2023	- Destinare il 10 % delle superfici agricole ad elementi caratteristici del paesaggio con elevata diversità; - Piantare almeno 3 miliardi di alberi; - Arrestare la perdita di ecosistemi verdi urbani e periurbani e favorire il rinverdimento urbano; - Azzeramento del consumo di suolo
	Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici	2023	

1.3 Paesaggi urbani in evoluzione

I paesaggi urbani rivestono un ruolo centrale nell'analisi delle dinamiche evolutive e nello studio delle alterazioni degli equilibri territoriali ed ecosistemici; i processi di urbanizzazione sono infatti tra le principali cause dell'aumento di degrado di suolo e habitat e dell'incremento del grado di frammentazione delle aree naturali, con conseguenze sullo stato della copertura del suolo, sugli ecosistemi, sul ciclo idrologico e in generale sulla capacità dei territori di rispondere positivamente ai rischi connessi con i cambiamenti climatici (*Alberti, 2005; Ceccarelli et al., 2014; Churkina, 2016; Crippa et al., 2021; IPBES, 2019; Jacobson, 2011*). Negli ultimi decenni l'evoluzione delle aree urbane è stata caratterizzata da una progressiva accelerazione e da una significativa evoluzione, che hanno portato a una nuova era dei processi urbani. Se al 2018 il 55% della popolazione mondiale viveva in aree urbane, si prevede che questa quota raggiungerà il 68% entro il 2050 e contestualmente verranno persi altri 1,2 milioni di km² di suolo per la realizzazione di nuovi edifici e infrastrutture, segnando il XXI secolo come l'epoca dell'urbanizzazione e della lotta alla crisi climatica e ambientale (*UN DESA Population Division, 2019*). Storicamente, le dimensioni delle città e la crescita economica sono state descritte come strettamente correlate e, in combinazione con l'aumento della popolazione, hanno generalmente guidato le dinamiche di espansione delle aree urbane (*Mahendra & Seto, 2019; Mahtta et al., 2022*). Questo paradigma ha, di fatto, perso di validità. La significativa crescita urbana rilevata negli ultimi decenni è del tutto estranea alle dinamiche demografiche sia in Italia che su scala globale (*Schiavina et al., 2019*). Inoltre, l'intenso flusso migratorio verso le aree urbane ha portato a una crescita non pianificata delle città, che frequentemente espandono i propri confini geografici con impatti diretti sull'ambiente e sulla salute umana. I sistemi urbani influenzati dalla *planetary urbanization* hanno trasformato l'assetto di un paesaggio in cui era chiaramente distinguibile il tessuto urbano e quello rurale (*Tuvikene et al., 2022*), producendo un continuum in cui l'urbano si espande e si fonde con le aree rurali circostanti, generando ampie e dilatate fasce suburbane e periurbane. La crescita urbana a bassa

densità conosciuta come “*sprawl*” (Couch et al., 2008; Ewing, 1994) è un fenomeno diffuso in Europa che, in Italia, assume caratteristiche di estrema dispersione, più propriamente riconducibile alla definizione di “*sprinkling*” (Romano et al., 2016). Rispetto allo *sprawl*, si sviluppa spontaneamente, seguendo intensità diverse in base all'orografia e spesso in assenza di una pianificazione urbana. Lo *sprinkling* è caratterizzato da aggregati di dimensioni molto variabili che generano paesaggi ibridi a bassa densità nelle aree rurali, le cui caratteristiche si mescolano con quelle delle aree urbane (Manganelli et al., 2020; Romano et al., 2019)(Figura 3 e Figura 4).



Figura 3. Esempio di *Sprawl* a Parigi (a sinistra) e di *Sprinkling* a Napoli (a destra). Fonte: Google Earth



Figura 4. Esempio di dispersione insediativa (*Sprinkling*) nelle aree rurali del basso Lazio. Fonte: foto di Angela Cimini

Questa configurazione è il risultato dei processi di pianificazione degli anni Sessanta e Settanta che hanno permesso la realizzazione di nuovi piani di zona sulle aree periferiche e la costruzione di nuovi complessi residenziali in campagna. Uno sviluppo del tessuto insediativo che ha

portato alla proliferazione di insediamenti in forma diffusa ai margini dei grandi centri urbani, influenzando la crescita delle frange periurbane e la trasposizione dei modelli urbani nelle campagne. Pertanto, alla presenza di forme urbane consolidate con ruoli di centralità, si uniscono insediamenti suburbani o periurbani, discontinui e a bassa densità, con dimensioni e ruoli marginali che limitano l'innescarsi di effetti di centralità (Palazzo & Aristone, 2016). Lo sfilacciamento dei margini delle aree urbane, oltre ad aggravare i problemi connessi con l'uso estensivo del territorio, rende più complessa la delimitazione dei margini tra città e campagna e la definizione di un criterio univoco per circoscriverli (Pagliacci, 2017). È quindi necessario adottare nuove rappresentazioni del paesaggio urbano che siano in grado di descriverli in termini di "Continuum urbano-rurale", superando la vecchia dicotomia urbano-rurale e le definizioni basate su limiti amministrativi (Cattivelli, 2021; Urso, 2021; van Vliet et al., 2020).

1.3.1 Leggere il paesaggio tramite l'uso e la copertura del suolo

La lettura del paesaggio passa, storicamente, attraverso l'interpretazione di cartografie e rappresentazioni sintetiche di informazioni geografiche, demografiche, economiche, politiche e culturali; un esempio è la sezione di valle di Geddes (Figura 5) che cerca di dare forma a una realtà complessa, traducendo le dinamiche territoriali in un linguaggio comprensibile e funzionale. La sezione si concentra su un frammento, un taglio nel tempo e nello spazio, mentre la cartografia adotta una prospettiva più ampia, quasi panoramica. Qui il paesaggio è suddiviso, classificato e ricondotto a categorie funzionali. È un approccio che invita a guardare il territorio come un insieme di superfici e usi, come una rete di scopi umani sovrapposta al substrato naturale che, tuttavia, è variabile nel tempo e nello spazio in base alle specifiche condizioni ambientali e socioeconomiche (Ferretti, 2017; Geddes, 1925).

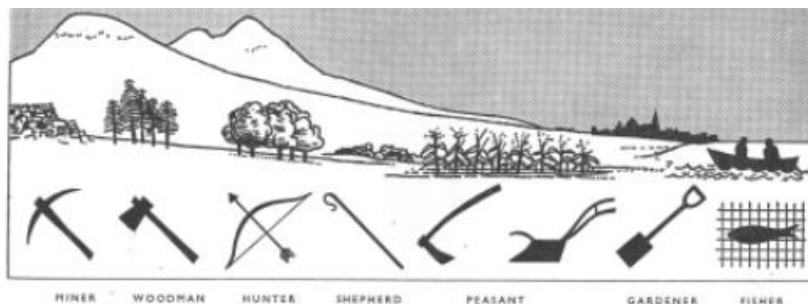


Figura 5. *Valley Section*, Patrick Geddes, 1909

Con l'avvento delle cartografie digitali le possibilità di produzione e di utilizzo delle mappe di uso e copertura si sono ampliate, tanto da diventare elemento imprescindibile per la formulazione di strategie di gestione ambientale e del territorio (Anderson, 1976; Konecny, 2011). In questo senso, sono state portate avanti numerose esperienze nella definizione di criteri per individuare la dimensione spaziale delle aree urbane, con riferimento al contesto italiano ma anche a scala europea e globale. Le diverse metodologie differiscono tra loro in primo luogo per l'approccio utilizzato, in alcuni casi riferito a una caratterizzazione basata sull'osservazione della sola presenza di superfici artificiali o in base all'area funzionale (vale a dire includendo le aree circostanti che dipendono da essa per servizi e occupazione), mentre in altri casi vengono utilizzate informazioni sull'uso e copertura del suolo, anche integrate con dati demografici o con informazioni di carattere economico. La scelta di attingere ad uno specifico set di dati condiziona sia i risultati che l'ambito di applicazione delle informazioni ottenute, pertanto di seguito viene offerta una sintesi dei principali prodotti di uso e copertura del suolo disponibili per la rappresentazione del paesaggio urbano e del paesaggio forestale, ai quali si farà riferimento nel lavoro di ricerca per mettere a punto strumenti aggiornati, di maggiore dettaglio spaziale e tematico, in grado di rispondere alle esigenze di monitoraggio stabilite dalle normative europee e internazionali e di supportare i decisori politici nella programmazione degli interventi strategici di forestazione urbana.

Contesto internazionale ed europeo

A livello internazionale ed europeo, i principali prodotti per la rappresentazione delle aree urbane fanno capo al *Joint Research Centre* (JRC), a cui si deve lo sviluppo del concetto di *Global Human Settlement Layer* (GHSL) (*European Commission, 2023*). Si tratta di un insieme di strati introdotti con l'obiettivo di fornire una rappresentazione dettagliata e a scala globale di supporto alla comprensione della struttura urbana. In dettaglio, i dati GHSL mappano la distribuzione delle superfici artificiali e della loro evoluzione (dato GHS-BUILT-S, ovvero *built-up surface*), l'estensione delle *Functional Urban Area* (dato GHSL-OECD-FUAs, realizzato con OCSE su griglia di 1 km), le caratteristiche morfologiche e di uso degli insediamenti (dato GHS-BUILT-C, ossia *Settlement Characteristics*); a questi dati si aggiunge il GHS-SMOD (*Settlement Model grid*), uno strato che descrive l'impronta degli insediamenti umani a scala globale (Degree of Urbanisation – DEGURBA) e che è stato adottato dalle Nazioni Unite e dalla Commissione Europea come riferimento metodologico universale per la rappresentazione e il monitoraggio delle aree urbane (Cfr. § 2.2.2 Metodologia per la produzione della carta nazionale del Continuum urbano - rurale e del DEGURBA).

L'*European Settlement Map* (ESM) è un ulteriore prodotto offerto dalla Commissione Europea per la mappatura della superficie edificata al 2015. Al primo livello di classificazione individua le aree edificate ("built-up") con una risoluzione spaziale di 2 metri, tramite classificazione di dati satellitari ad altissima risoluzione (Pleiades, Airbus, DEIMOS, GeoEye, Spot) ottenuta impiegando tecniche di *Symbolic Machine Learning* che operano in combinazione con caratteristiche di *texture* e morfologia degli oggetti presenti sulle immagini (*Corbane et al., 2020*). Il secondo livello di classificazione permette di distinguere le aree edificate in residenziali e non residenziali con dettaglio di 10 metri; tale attività è svolta utilizzando come dato ancillare il dato di uso e copertura del suolo prodotto nell'ambito del progetto ENACT (*ENhancing ACTivity and population mapping*) della Commissione Europea, di derivazione

CORINE Land Cover 2012 con dettaglio aumentato a 1 ettaro (*Rosina et al., 2020*).

Tra le iniziative di livello internazionale di supporto alla rappresentazione delle aree urbane e degli elementi che la compongono, meritano, una menzione *OpenStreetMap*¹ (OSM), e lo strumento *Dynamic world*. Nel primo caso si tratta di un'iniziativa di *Volunteered Geographical Information* (VGI) internazionale, che offre una mappatura *Open Source* ad altissima risoluzione dell'uso e della copertura del suolo a scala globale. Le informazioni sono digitalizzate in formato vettoriale e ciascuna geometria è corredata da attributi chiamati "key" e "tag". Tali chiavi consentono di individuare le aree urbane e distinguere gli usi residenziali da quelli non residenziali (*Brinkhoff, 2016*). *Dynamic world*, sviluppato da *Google* e dal *World Resources Institute*, classifica l'uso e la copertura del suolo a scala globale in *Near Real-Time* con risoluzione spaziale di 10 metri (*Brown et al., 2022*).

In Europa il Servizio di monitoraggio del territorio del Programma Copernicus (CLMS²) offre strumenti a diverse scale di dettaglio sia spaziale che tematico per descrivere l'uso e la copertura del suolo e, in particolare, la dimensione spaziale delle aree urbane. I dati di uso e copertura del suolo sono organizzati in due categorie principali:

- *Land Cover and Land Use Mapping*, alla quale afferiscono gli strati del progetto CORINE Land Cover (CLC), CORINE Land Cover Plus Backbone (CLC+) e gli *High Resolution Layer* (HRL);
- *Priority Area Monitoring*, forniscono informazioni di maggiore dettaglio rispetto ai dati CLC su aree ritenute critiche dal punto di vista ambientale: le aree urbane (*Urban Atlas*), le aree costiere (*Coastal Zones*), le aree ripariali (*Riparian Zones*) e le aree naturali protette (Natura2000).

¹ <https://www.openstreetmap.org/#map=14/41.93185/12.56287>

² <https://land.copernicus.eu/en>

Urban Atlas Land Cover/Land Use (UA) e CLC adottano una definizione di area urbana che considera le aree stabilmente popolate e le superfici dominate dall'influenza delle attività umane, escludendo quelle a uso agricolo. Queste aree comprendono tutte le strutture artificiali (edifici, strade, tutte le infrastrutture e le altre aree pavimentate) e le superfici non impermeabilizzate e vegetate ad esse associate, tra le quali le aree verdi urbane (classe 141 - *Green Urban Areas* e 142 - *Sports and leisure facilities*). La differenza principale tra i due strati riguarda la risoluzione geometrica e la copertura: il CORINE Land Cover è prodotto per l'intero territorio europeo con un'unità minima di mappa (MMU) di 25 ha (Büttner et al., 2021), mentre Urban Atlas è disponibile solo per 788 *Functional Urban Areas* (FUAs) con popolazione maggiore di 50.000 abitanti e viene realizzato con una MMU di 0,25ha per le classi artificiali e di 1ha per le aree naturali (European Commission, 2020a). Più recentemente il CLMS ha reso disponibile il CLC+ che rappresenta la nuova generazione di dati di copertura del suolo a livello pan-europeo. Il dato è disponibile in formato raster per il 2018 e il 2021 e fornisce una mappatura della copertura del suolo in 11 classi (una classe per le superfici artificiali, quattro per la vegetazione legnosa, due per la vegetazione erbacea, una per licheni e muschi, una per le superfici abiotiche naturali, una per i corpi idrici e una per i ghiacciai e le nevi perenni) con dettaglio a 10 metri e valori di accuratezza del 90%. Il dato vettoriale, realizzato con MMU di 0,5 ha e dettaglio tematico di 18 classi più attributi aggiuntivi, è disponibile per il 2018 (Corbane et al., 2020).

Gli HRL sono quattro famiglie di dati raster che offrono informazioni di maggiore dettaglio sia spaziale che temporale su alcune componenti di copertura del suolo, tra le quali quella artificiale (HRL *Imperviousness*) e quella arborea (HRL *Forest*) e devono considerarsi strati complementari ai dati di uso e copertura del suolo, utili a condurre studi settoriali. I *datasets* degli HRL *Imperviousness* e *Forest* contengono strati che descrivono il territorio Pan-europeo in termini di percentuale di area occupata da superfici artificiali (*Imperviousness Density - ID*) o da chiome arboree (*Tree Cover Density - TCD*) e di aree stabilmente occupate da costruzioni (*Imperviousness Built-up - IBU*) oppure da boschi (*Forest Type - FT*) o da copertura arborea (*Dominant Leaf Type -*

DLT), anche distinguendo conifere e latifoglie (*European Environment Agency, 2021*).

Nell'ambito del Programma Copernicus, l'*EIONET Action Group on Land Monitoring in Europe* (EAGLE) ha introdotto una metodologia concettuale di descrizione, classificazione, archiviazione delle informazioni su uso e copertura del suolo in un modello dati consistente e scalabile, mantenendo la compatibilità con i database già esistenti senza la perdita di contenuto informativo (*Arnold et al., 2021*). Il modello EAGLE è esplicitamente menzionato nei *Copernicus Work Programmes* come pilastro essenziale per sostenere i nuovi casi d'uso del CLC+ e propone un modello di dati basato sulla definizione di tre blocchi (Figura 6):

- componenti di copertura del suolo (*Land Cover Components - LCC*), con riferimento alla definizione fornita dalla direttiva INSPIRE 2007/2/CE, ovvero la “copertura biofisica della superficie terrestre”;
- attributi di uso del suolo (*Land Use Attributes - LUA*), con riferimento alla definizione fornita dalla direttiva INSPIRE 2007/2/CE, ovvero la “classificazione del territorio in base alla dimensione funzionale o alla destinazione socioeconomica presenti e programmate per il futuro”;
- caratteristiche del paesaggio (*Landscape Characteristics - LCH*), che forniscono informazioni di dettaglio su specifiche proprietà delle unità territoriali.

L'utilizzo di classi coerenti con il modello EAGLE consente la creazione di flussi di dati omogenei dal punto di vista tecnico e semantico, valorizzando l'integrazione e la comparabilità tra le attività di *Land monitoring* nazionali e le iniziative europee.

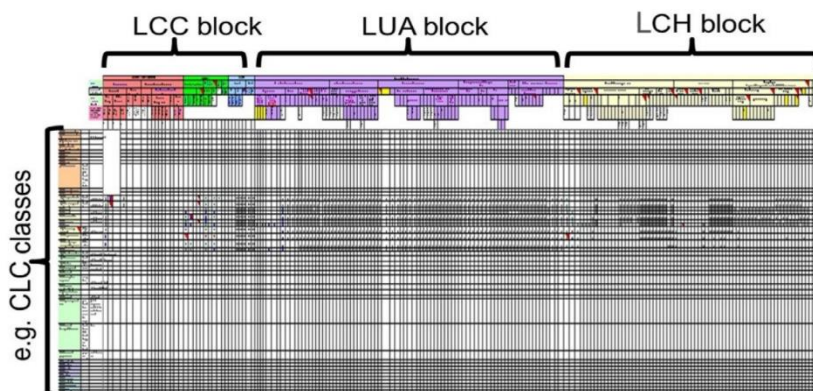


Figura 6. La matrice EAGLE con le componenti di copertura del suolo (Land Cover Component - LCC), gli attributi di uso (Land Use Attribute - LUA) e le caratteristiche di paesaggio (Landscape Characteristics - LCH).

Contesto nazionale

In Italia, l'Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT) produce dal 1991 e aggiorna con cadenza decennale i dati geografici del sistema delle basi territoriali alla scala delle sezioni di censimento, offrendo informazioni, in formato vettoriale, su centri abitati, nuclei abitati, località produttive e case sparse (ISTAT, 2024b).

L'Osservatorio del Mercato Immobiliare (OMI) dell'Agenzia delle Entrate, invece, ripartisce gli ambiti amministrativi comunali in insiemi omogenei in termini di comportamento del mercato immobiliare, distinguendo cinque fasce: centrale, semicentrale, periferica, suburbana ed extraurbana (Osservatorio del Mercato Immobiliare, 2018).

L'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) propone due diverse metodologie per la rappresentazione delle aree urbane, tutte basate sulla Carta nazionale del consumo di suolo. Nel primo caso la delimitazione delle diverse tipologie di tessuto urbano considera esclusivamente elementi legati alla densità di superfici artificiali entro una distanza di 300m (carta del grado di artificializzazione) e classifica l'intero territorio nazionale in tre classi: urbano (densità delle superfici artificiali >50%), suburbano (la densità è

compresa tra il 10% e il 50%) e rurale (la densità è inferiore al 10%). La seconda rappresentazione (carta del grado di urbanizzazione) si avvicina al sistema di classificazione del DEGURBA, in quanto vengono presi in considerazione anche dati sulla densità di popolazione³ permettendo di approfondire il sistema di classificazione precedente. Le aree urbane vengono distinte tra quelle ad alta densità di popolazione (> 1.500 abitanti per km²) e quelle a media densità di popolazione (300 - 1.500 abitanti per km²) e viene introdotta una classe relativa alle zone produttive, considerando le aree caratterizzate da elevata densità di superfici artificiali e densità di popolazione inferiore a 300 abitanti per km² (Munafò, 2023).

Per la rappresentazione dell'uso e della copertura del suolo, l'Istituto ha messo a punto due mappe a copertura nazionale, realizzate tramite integrazione dei dati CLMS e della carta nazionale del consumo di suolo con l'obiettivo di superare i limiti connessi con la risoluzione spaziale e tematica del dato CLC e valorizzare i punti di forza dei nuovi strati CLC+ e di quelli afferenti alle *Priority Area Monitoring*. Fatta eccezione per la classe relativa alle superfici artificiali, l'aggiornamento di queste mappe segue quello dei dati *Copernicus* (De Fioravante et al., 2022, 2023). Per superare questo limite, l'ISPRA ha sperimentato la mappatura della copertura del suolo per l'intero territorio nazionale al 2018 anche tramite tecniche di *Remote Sensing* e algoritmi basati su regole decisionali che sfruttano le informazioni derivabili dalle immagini multispettrali e *radar* dei satelliti Sentinel (De Fioravante et al., 2021).

La Tabella 2 e le immagini di Figura 7 e Figura 8 restituiscono una panoramica delle principali caratteristiche dei dati appena descritti e disponibili in formato *Open Source* per l'intero territorio nazionale.

³ ISPRA ha prodotto nel 2011 una griglia di popolazione a partire dalle informazioni derivabili dai dati ISTAT relativi alle sezioni di censimento spazializzate sulla carta nazionale del consumo di suolo.

Tabella 2 Dati disponibili per la rappresentazione delle aree urbane e della copertura arborea

Produttore	Dato	Estensione	ris. spaziale	Classi	Aggiornamento	Anni
Joint Research Center	GHS - Built - Surface	Globale	10 m 100 m 1km	1 o 2	5 anni	1975 - 2030
	GHS - SMOD	Globale	1 km	8	5 anni	1975 - 2030
	GHS - Built - Characteristics	Globale	10 m	15	-	2018
	GHS - FUA	Globale	1 km	-	-	2018
	European Settlement Map	Europea	2 m 10 m	3 3	3 anni	2012 - 2015
Open Street Map	OSM built-up features	Globale	-	Key e Value	48 ore	2004
Google	Dynamic World	Globale	10 m	9	Near real-time	2021
Copernicus	Urban Atlas	788 città Europee	Da 0,25 ha a 1 ha	27	6 anni	2006 - 2018
	Riparian Zones					2012 - 2018
	Natura 2000	Europea parziale	0,5 ha	55	6 anni	2006 - 2018
	Coastal Zones					2012 - 2018
	CORINE Land Cover	Europea	25 ha	44	6 anni	2000 - 2018
	CLC+ Backbone	Europea	10 m	11	2 anni	2018 - 2021
			0,5 ha	18	-	2018
	Imperviousness (Density)	Europea	10 m – 20 m e 100 m	10	3 anni	2006 - 2018
	Imperviousness (Built-up)	Europea	10m – 100m	2	-	2018
	Tree Cover Density	Europea	10 m - 100 m	10	3 anni	2012 - 2018
	Dominant Leaf Type	Europea	10m – 100m	2	3 anni	2012 - 2018
ISTAT	Sezioni di censimento	Nazionale	da 1:5.000 a 1: 25.000	-	10 anni	1991 – 2011 – 2021
Agenzia delle Entrate	Osservatorio del Mercato Immobiliare	Nazionale	1:5.000	5	6 mesi	2006 - 2022
ISPRA	CORINE Land Cover IV livello	Nazionale	25 ha	66	6 anni	2000 - 2018
	Carta Nazionale del Consumo di suolo	Nazionale	10 m	22	1 anno	2006 - 2023
	Grado di artificializzazione	Nazionale	10 m	3	1 anno	2006 - 2023
	Grado di urbanizzazione	Nazionale	10 m	4	1 anno	2012 - 2023
	CCS/CUS	Nazionale	Variabile	12 11	1 anno (componente artificiale)	2012 - 2023
	Copertura del suolo da Sentinel	Nazionale	10m	8	1 anno	2018

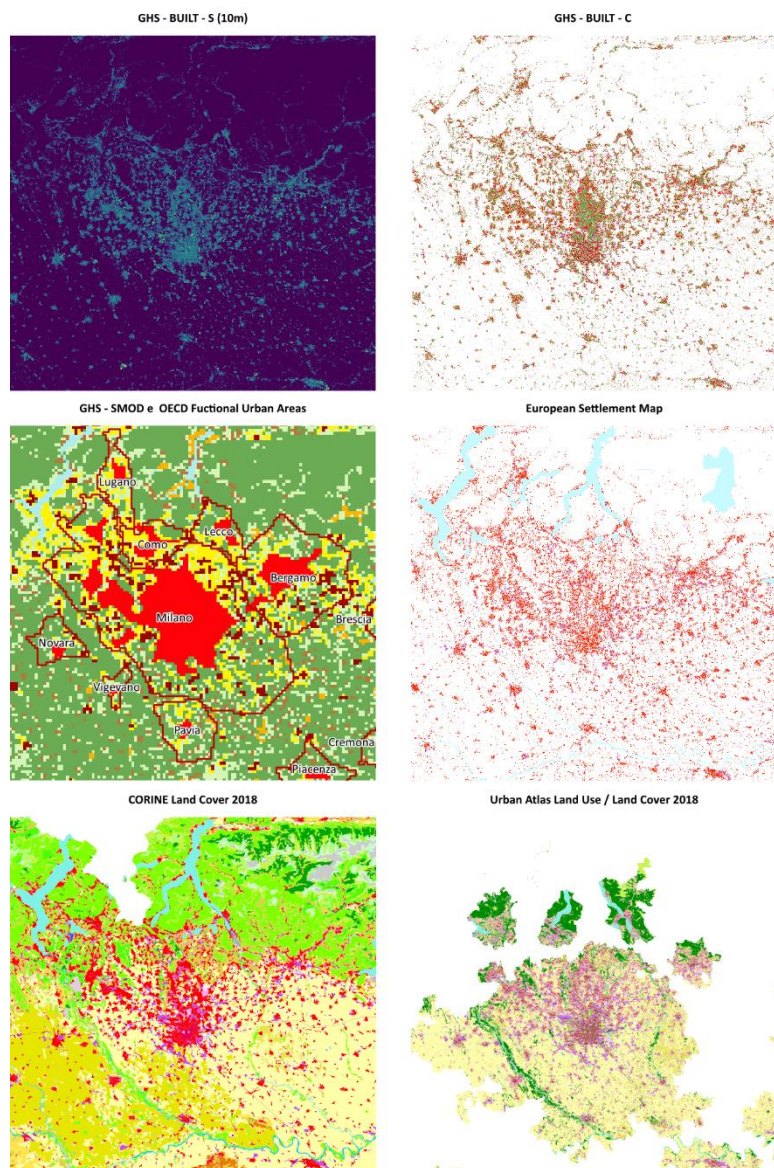


Figura 7. Esempi di rappresentazione dell'uso e della copertura del suolo di Milano rispetto ai principali dati *Open Source* disponibili in ambito internazionale ed europeo.

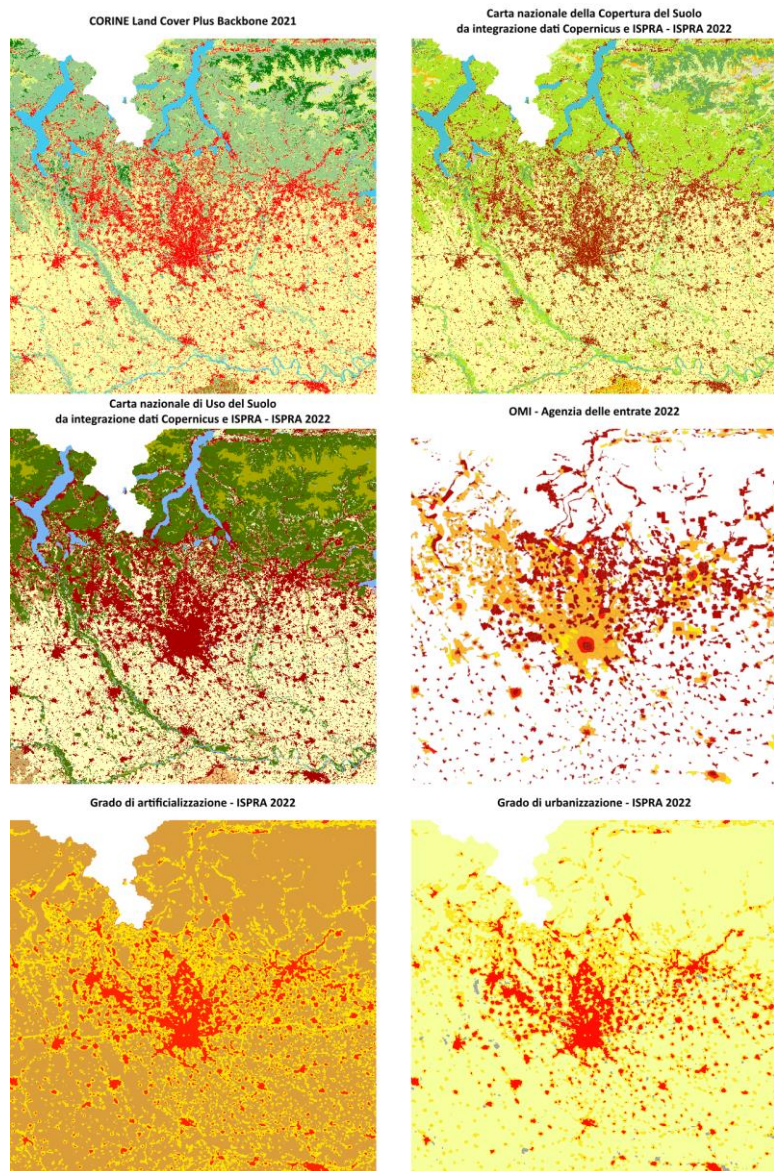


Figura 8. Esempi di rappresentazione dell'uso e della copertura del suolo di Milano rispetto ai principali dati *Open Source* disponibili in ambito europeo e nazionale.

1.3.2 Il paradosso dell'uso del suolo urbano: il consumo di suolo

L'edificabilità dei suoli urbani è una questione irrisolta e da cui dipende la capacità di garantire la conservazione e il ripristino di aree naturali sufficientemente estese da assicurare la fornitura di servizi ecosistemici all'interno delle aree urbane.

In tutte le sue attività, l'uomo deve sempre considerare che il suolo è una risorsa non rinnovabile, con tempi di formazione e rigenerazione estremamente lenti (Daily et al., 1997; Ziter & Turner, 2018). Tuttavia, il consumo di suolo rappresenta ancora la causa principale di perdita irreversibile della risorsa. Con il termine consumo di suolo si intende il processo di trasformazione di superfici naturali e semi-naturali in superfici artificiali (Munafò, 2024). L'Unione Europea ha adottato la duplice definizione di *Soil Sealing* e *Land Take* per distinguere, rispettivamente, l'artificializzazione e l'impermeabilizzazione del suolo (Peroni et al., 2022). Nel primo caso si fa riferimento a interventi che alterano solo parzialmente le funzionalità del suolo come, ad esempio, la compattazione o l'escavazione, nel secondo caso ci si riferisce a trasformazioni irreversibili che compromettono e sigillano in modo definitivo la risorsa, come la copertura con materiali impermeabili.

I suoli urbani, in particolare, rispetto a quelli agricoli e forestali, sono spesso visti come risorse da sfruttare per soddisfare le esigenze abitative e commerciali, ignorando le loro funzioni ecologiche e i servizi ecosistemici che possono fornire (Morel et al., 2015). Ciò ha portato a consumare suolo anche in assenza di una reale richiesta abitativa contribuendo alla degradazione degli spazi urbani e alla scarsità di aree verdi. Queste dinamiche sono associate all'infrastrutturazione, all'espansione delle città e alla densificazione e conversione dei suoli all'interno delle aree urbane con effetti sulla frammentazione del paesaggio e sull'aumento delle temperature. La relazione tra tutela del suolo, dei servizi ecosistemici erogati e adattamento al cambiamento climatico sono più che mai attuali e strettamente connessi con il tema della forestazione urbana che ha come obiettivo lo sviluppo sostenibile delle aree urbane.

Diversi studi hanno dimostrato come, le variazioni nel pattern della copertura e dell'uso del suolo influenzano la temperatura urbana (X. L. Chen et al., 2006; Maheng et al., 2024; Morabito et al., 2016). In particolare, la rimozione della vegetazione riduce il tasso di evapotraspirazione e la sostituzione con materiali impermeabili come cemento e asfalto, che hanno un elevato coefficiente di rifrazione, condizionano il bilancio energetico superficiale (Oke, 1982; Winbourne et al., 2020). Tali dinamiche, unitamente all'aumento globale delle temperature sono la causa principale dell'aumento dell'intensità e della frequenza delle ondate di calore e, in particolare, del fenomeno "isola di calore urbana" soprattutto nelle aree del Mediterraneo (Ward et al., 2016).

La gestione sostenibile del suolo, e in particolare di quelli in ambito urbano è, invece, una delle condizioni primarie necessarie per mitigare gli impatti della crisi climatica e garantire il benessere della popolazione (Massaro et al., 2023), per questo è al centro di diverse politiche e strategie europee: nel Green Deal europeo, nei target dell'Agenda Globale per lo sviluppo sostenibile, nella Strategia per il suolo per il 2030, nel Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza, nel Piano per la Transizione Ecologica e nella recente NRR.

In Italia il monitoraggio del consumo di suolo è assicurato dal Sistema Nazionale per la Protezione Ambientale (SNPA) coordinato dall'ISPRA, come sancito dalla legge 132/2016, che produce e aggiorna la carta nazionale del consumo di suolo (Munafò, 2024), uno strato in formato raster a 10 metri di risoluzione che mappa le superfici artificiali secondo il sistema di classificazione a tre livelli riportato in Tabella 3. La carta offre una copertura per l'intero territorio nazionale rispetto agli anni 2006, 2012 e per tutti gli anni dal 2015 in poi (Figura 9). La metodologia di produzione del dato, basata su un attento ed estensivo processo interpretativo di immagini telerilevate⁴, unitamente all'elevato dettaglio

⁴ Consiste nella realizzazione di un dato vettoriale ottenuto digitalizzando a video i poligoni delle aree che hanno subito variazioni, basandosi sull'analisi diacronica di immagini satellitari e ortofoto digitali ad altissima risoluzione.

spaziale, temporale e tematico, rende questo prodotto l'unico strumento conoscitivo attualmente disponibile a livello nazionale per l'analisi in continuo delle trasformazioni del territorio, dell'estensione delle superfici artificiali e per la classificazione delle aree urbane. In questo senso, il monitoraggio proposto da ISPRA-SNPA è stato suggerito dall'Agenzia Ambientale Europea come esempio virtuoso da riproporre in altri paesi europei. Inoltre, dal 2024 il consumo di suolo è stato introdotto come indicatore per la misura del Benessere Equo e Sostenibile (BES) da considerare nel Documento di Economia e Finanza (DEF) per valutare l'impatto delle politiche pubbliche sulla loro evoluzione (ISTAT, 2024a).

Tabella 3 Sistema di classificazione del consumo di suolo adottato da ISPRA -SNPA

11	Consumo di suolo
111	Edifici, fabbricati
112.	Strade pavimentate
113.	Sede ferroviaria
114.	Aeroporti (piste e aree di movimentazione impermeabili/pavimentate)
115.	Porti (banchine e aree di movimentazione impermeabili/pavimentate)
116.	Altre aree impermeabili/pavimentate non edificate (piazze, parcheggi, cortili, campi sportivi, etc.)
117.	Serre permanenti pavimentate
118.	Discariche
12.	Consumo di suolo reversibile
121.	Strade non pavimentate
122.	Cantieri e altre aree in terra battuta (piazze, parcheggi, cortili, campi sportivi, depositi permanenti di materiale, etc.)
123.	Aree estrattive non rinaturalizzate
124.	Cave in falda
125.	Impianti fotovoltaici a terra
126.	Altre coperture artificiali non connesse alle attività agricole la cui rimozione ripristini le condizioni iniziali del suolo
2.	Altre forme di copertura non incluse nel consumo di suolo
201.	Corpi idrici artificiali (escluse cave in falda)
202.	Aree permeabili intercluse tra svincoli e rotonde stradali, aree pertinenziali associate alle infrastrutture viarie
203.	Serre non pavimentate
204.	Ponti e viadotti su suolo non artificiale
205.	Impianti fotovoltaici a bassa densità

La ricerca sulla forestazione urbana e, in particolare, sugli strumenti utili a supportarne la progettazione, deve passare necessariamente per l'analisi delle dinamiche di urbanizzazione che interessano il Paese e degli impatti che hanno sul territorio per individuare aree critiche che necessitano in via prioritaria di interventi, restando connessi con il

quadro normativo internazionale ed europeo. In dettaglio, il tema del consumo di suolo e delle dinamiche di urbanizzazione è affrontato dall'SDG 11 delle Nazioni Unite “rendere le città e gli insediamenti umani inclusivi, sicuri, duraturi e sostenibili”, mentre, più recentemente, la NRR ha introdotto l'obbligo, per gli Stati membri, ad azzerare la perdita netta di spazi verdi e di copertura arborea in ambito urbano tra il 2024 e il 2030 e a incrementare la superficie vegetata a partire dal 2031, secondo quanto stabilito nei piani di ripristino. Questi ultimi devono essere messi a punto dagli Stati sulla base di evidenze scientifiche, derivabili dagli strumenti disponibili nell'ambito del Programma europeo Copernicus o prodotti direttamente dagli Stati stessi, come quelli che, ai sensi della L. 132/2016, sono assicurati in Italia dal Sistema Nazionale a rete per la Protezione dell'Ambiente (SNPA).

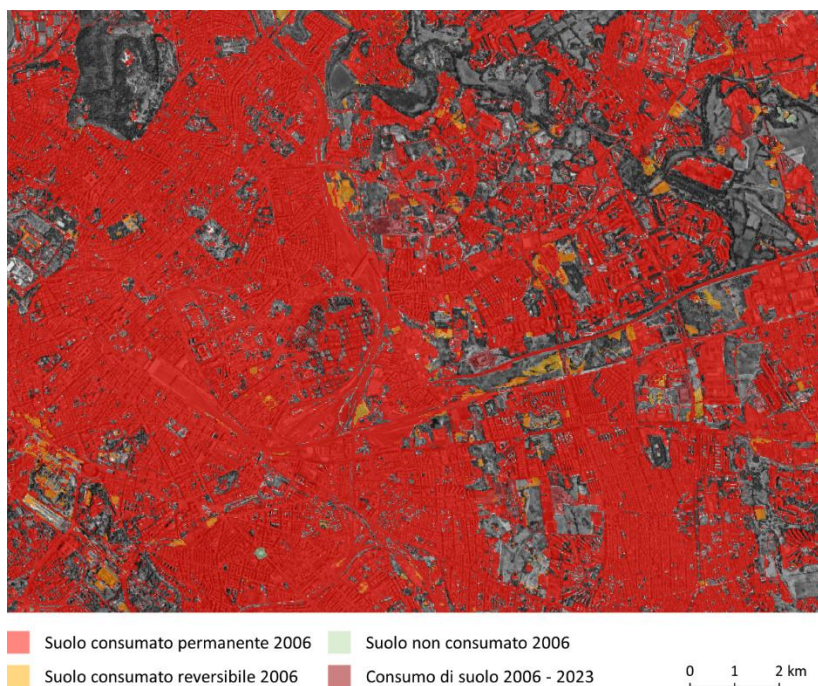


Figura 9. Carta nazionale del consumo di suolo 2006 e cambiamenti 2006 – 2023 registrati sull'area del comune di Roma. Fonte: elaborazione su dati ISPRA - SNPA

In questa ricerca, le informazioni derivanti dalle attività di monitoraggio del consumo di suolo hanno una duplice valenza, consentendo, in primo luogo, di comprendere in che modo le dinamiche di urbanizzazione interessano e gravano sulla conservazione degli spazi aperti in ambito urbano, e costituendo l'informazione alla base della rappresentazione delle aree urbane secondo la metodologia e le definizioni indicate in ambito europeo e internazionale dalla NRR e per il calcolo degli indicatori SDG. In dettaglio, la carta del consumo di suolo, integrata con altri dati di uso del suolo e di popolazione, ha permesso di rappresentare il territorio in funzione della distribuzione della popolazione residente, consentendo di delimitare le aree più densamente urbanizzate, poi utilizzate come area di interesse per il calcolo degli indicatori SDG 11.3.1 (che correla il tasso di variazione del consumo di suolo e della popolazione in un certo ambito) e 11.7.1 (relativo all'accessibilità agli spazi aperti pubblici entro una breve distanza a piedi dalla propria abitazione). La mappa è stata, inoltre, utilizzata per l'individuazione dei comuni italiani con caratteristiche tali da risultare interessati dagli obblighi della NRR.



Figura 10. Cantiere per la realizzazione di un'area commerciale nel comune di Lanciano (CH). Foto scattata da Antonello Cimini il 30 ottobre 2023

1.4 Il ruolo delle foreste urbane nel ripristino degli ecosistemi urbani

Le sfide imposte dalla combinazione delle dinamiche insediative con il cambiamento climatico hanno incoraggiato l'introduzione di alcuni concetti chiave alla base della pianificazione delle città del futuro, come: NBS, foreste urbane, infrastrutture verdi e servizi ecosistemici urbani (*Escobedo et al., 2019*). In Italia sono state avviate diverse iniziative sostenute da enti pubblici, privati e associazioni non governative che hanno l'obiettivo di implementare tali concetti nella pianificazione dei paesaggi urbani per ripensarli in un'ottica di sostenibilità sia ambientale che sociale, come il progetto "ForestaMi di Milano, il Kilometro verde di Parma, Urban Jungle di Prato, il progetto Ossigeno della Regione Lazio e il più ambizioso progetto che interessa tutto il territorio nazionale "Parco Italia" che ha l'obiettivo di mettere a dimora un albero per ciascun cittadino delle 14 città metropolitane italiane: 22 milioni di alberi entro il 2040 creando, contestualmente, corridoi verdi in grado di collegare le città lungo la dorsale appenninica e il sistema alpino (*Boeri et al., 2022*). Questi progetti necessitano, tuttavia, di un quadro conoscitivo di supporto che sia aggiornato, facilmente aggiornabile e di dettaglio, per poter realizzare sul territorio azioni in grado di generare benefici reali per la popolazione (*Resemini et al., 2025*).

Il paragrafo fa chiarezza sulle definizioni di foreste urbane e sui servizi ecosistemici valutati in questo lavoro di ricerca per sostenere lo sviluppo di strumenti di supporto decisionale utili alla progettazione di interventi di forestazione urbana sul territorio nazionale e in grado di contribuire efficacemente al miglioramento delle prestazioni ecosistemiche offerte.

Foreste urbane - definizioni

Il termine "foresta urbana" per come lo conosciamo oggi è stato utilizzato per la prima volta in Europa nel XIX secolo quando, l'industrializzazione ha dato avvio al fenomeno di migrazione di massa della classe operaia dalla campagna verso le città, con una conseguente crescita della densità fondiaria e dilatazione delle aree urbane

(Konijnendijk, 1999). A quel punto, in quello che Guido Ferrara definisce “l'uomo a condizione urbanocentrica” (Ferrara, 1968), si è innescato il bisogno impellente di ritrovare all'interno delle città quei benefici estetici, sociali e ambientali propri della natura. Di fatto, la definizione di foresta urbana racchiude in sé i significati più estesi e complessi delle due parole che lo compongono: gli elementi vegetazionali e l'ambito paesaggistico di riferimento. Affiancare la parola “urbano” alle foreste ha gradualmente suscitato l'interesse di discipline diverse da quelle forestali, come, ad esempio quelle dell'architettura del paesaggio e delle scienze sociali proponendo prospettive di gestione e pianificazione integrate e olistiche che si collocano nel più ampio campo scientifico della selvicoltura urbana (Helms, 1998), la cui unità elementare di riferimento è l'albero (Agrimi, 2013). Come specificato in molti studi e nella definizione della FAO, le foreste urbane si riferiscono a tutti gli alberi, singoli o in comunità, all'interno e in prossimità delle aree urbane, coprendo quindi un significato piuttosto generico e ampio (FAO, 2016). A livello globale, per standardizzare la classificazione delle foreste è stata adottata la definizione di bosco della FAO stabilita nell'ambito del *Global Forest Resources Assessment* (FRA), secondo cui un bosco è un territorio con una copertura arborea superiore al 10%, un'estensione minima di 0,5 ettari e gli alberi devono avere un'altezza minima o almeno media di 5 metri (FAO, 2023). In Italia, il Testo Unico in Materia Forestale e Filieri Forestali (TUFF) definisce Bosco una superficie coperta da alberi e vegetazione che abbia un'estensione minima di 2.000 m², l'altezza media degli alberi sia di almeno 5 metri, la densità media della copertura arborea sia pari ad almeno il 20% e abbia una larghezza minima di almeno 20 metri (D.lgs 3 aprile 2018 n.34). Entrambe le definizioni non si riferiscono a risorse forestali in ambito agricolo e urbano e nemmeno a tutti gli alberi presenti all'interno di un paesaggio. In particolare, non vengono menzionati, quindi inventariati e monitorati, le formazioni arboree cresciute al di fuori di un ambito forestale o di un bosco, in contesti prevalentemente agricoli o urbani, nonostante l'importante ruolo paesaggistico, ambientale e sociale che svolgono (Long & Ramachandran, 1999; Ottaviano & Marchetti, 2023; Thomas et al., 2021). Sulla base di queste considerazioni la FRA-FAO ha coniato nel

1995 il termine *Trees Outside Forest* (TOF) e nel 2000 ha introdotto questa categoria nelle valutazioni globali delle risorse forestali (*De Foresta et al., 2013*). Successivamente nel 2005 la FAO ha aggiunto la categoria “Altri suoli con copertura arborea” (Other Land with Tree Cover - OLwTC) per tenere conto delle formazioni boschive all’interno di contesti agricoli o urbani. Tuttavia, i TOF non sono sempre inclusi negli Inventari Nazionali Forestali (INF) o non esistono misure standardizzate per il loro monitoraggio (*Beckschäfer et al., 2017; Corona et al., 2009; Natale, 2006; Schnell et al., 2015*).

L’ultimo progetto coordinato a livello nazionale di mappatura e classificazione delle superfici forestali a una scala di dettaglio, compatibile con la gestione forestale era rappresentato dalla Carta della Milizia Forestale del 1936 (*Ferretti et al., 2018*). Alcune esperienze di mappatura condotte in Italia a scala nazionale si basano su criteri inventariali che, sebbene forniscano informazioni preziose sulle risorse forestali, presentano limiti legati a costi, precisione, rappresentazione spaziale e temporale che devono essere tenuti in considerazione nell’interpretazione dei risultati (*Gasparini et al., 2022*). Altri studi integrano rilievi condotti su immagini telerilevate e a terra più speditivi e di agevole applicazione per misurare direttamente estensione e struttura dei paesaggi. Solo recentemente, il 14 novembre 2024, è stata pubblicata dal Sistema Informativo Nazionale Forestale (SINFor) la nuova carta forestale nazionale⁵ realizzata tramite fotointerpretazione alla scala 1: 10.000 coerentemente con le definizioni di bosco del TUFF e della FAO.

Fino a quella data l’unica carta più recente prodotta a livello nazionale con un sistema di nomenclatura specifico per la componente forestale è stata l’approfondimento tematico di quarto e quinto livello della copertura forestale dal progetto CORINE Land Cover con l’ultimo aggiornamento a cura di ISPRA e relativo al 2018 (*Bologna et al., 2004*).

⁵ <https://sinforang.geodatalab.cloud/#/carta>

In alternativa erano presenti dati prodotti dalle singole regioni e province autonome con sistemi di classificazione diversi tra loro. Un esempio è la carta forestale su base tipologica della Regione Lazio (Figura 11). Si tratta di un dato vettoriale aggiornato al 2011, che approfondisce la carta dell'uso del suolo della Regione Lazio al quarto e al quinto livello di classificazione CORINE Land Cover realizzata con una *Minimum Mapping Unit* (MMU) di 0,5 ha e secondo un approccio gerarchico. Nello specifico, le aree forestali omogenee dal punto di vista ecologico, floristico e colturale, rappresentano le unità fondamentali o tipi. Complessivamente la carta presenta 17 categorie e 35 tipi forestali, rilevati tramite fotointerpretazione delle ortofoto digitali (Volo IT 2000 anni 1998/1999), delle immagini satellitari provenienti dalla missione Landsat 7 ETM+ (anni 1999/2000), della Carta Tecnica Regionale (anni 1990/1991) e rilievi di campagna (*Regione Lazio, 2010*).

Questa parte della ricerca, condotta prima della pubblicazione della nuova carta forestale nazionale, offre una risposta alla richiesta di informazioni sul patrimonio arboreo e forestale aggiornate e a maggiore risoluzione, proponendo una metodologia economica sia in termini di tempo che di risorse impiegate, basata sull'integrazione di dati locali con le più recenti informazioni sulla copertura arborea derivabili dai dati del Programma Copernicus e restituendo mappe inedite sulla distribuzione spaziale dei boschi e degli alberi fuori foresta nella Città Metropolitana di Roma. Come dimostrato in studi precedenti, sebbene gli spazi verdi nelle aree edificate contribuiscano in modo significativo alla salute e al benessere umano in ambienti antropizzati, non sono sempre disponibili dati e informazioni di dettaglio su scala vasta utili a valutare il contributo ecosistemico dei TOF e delle foreste urbane e periurbane (*Sallustio et al., 2019*).

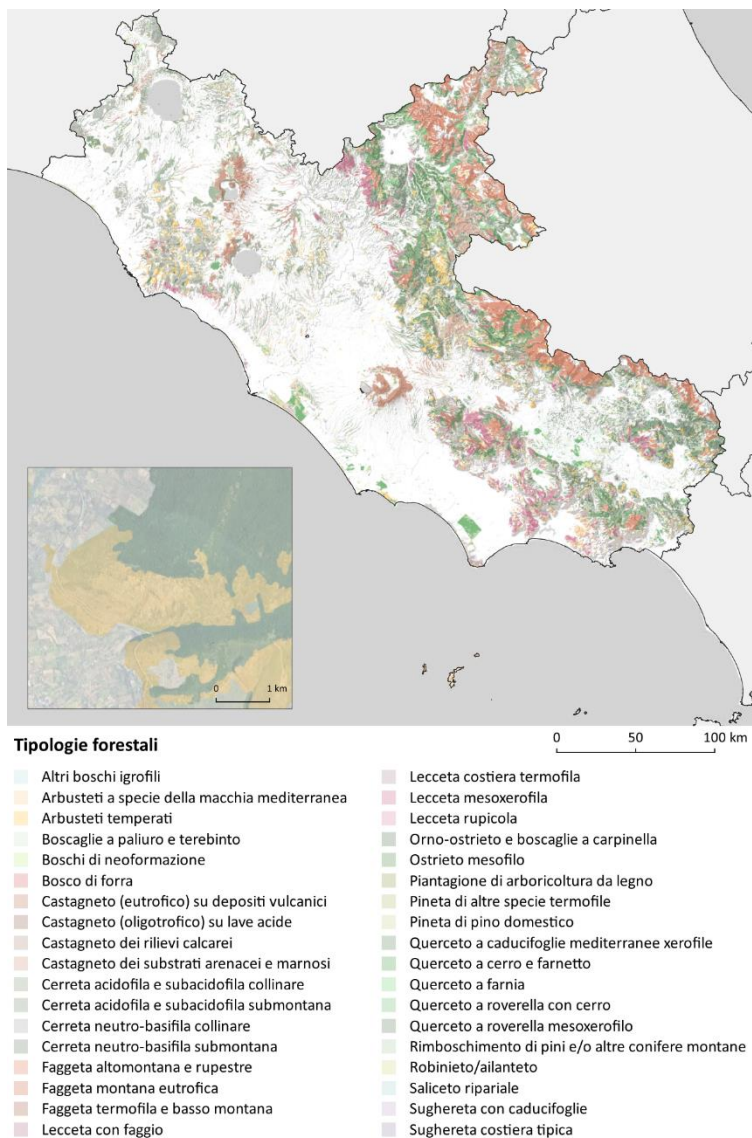


Figura 11. Carta forestale su base tipologica della regione Lazio 2011, derivata dalla carta delle formazioni naturali e seminaturali. Fonte: elaborazione su dati Regione Lazio – Agenzia Regionale Parchi.

Foreste urbane - Servizi Ecosistemici Urbani

Il *Millennium Ecosystem Assessment* (*Millennium Ecosystem Assessment, 2005*) fu il primo progetto di ricerca internazionale sviluppato per valutare gli effetti delle variazioni ecosistemiche sul benessere umano stabilendo la base scientifica di supporto alle iniziative di ripristino. Nel tempo, la definizione di “servizi ecosistemici” (SE) è stata raffinata per separare i concetti di “funzioni”, “servizi” e “benefici”(Costanza et al., 1997). I servizi possono essere classificati in quattro ampie categorie: (i) servizi di supporto come il ciclo dell'acqua e la biodiversità, (ii) servizi di approvvigionamento come la fornitura di cibo e fibre; (iii) servizi di regolazione come la purificazione dell'acqua e la regolazione del clima locale e globale, e (iv) servizi culturali come le relazioni sociali e la buona salute.



Figura 12. Classificazione dei servizi ecosistemici secondo il MEA. Fonte: *Millennium Ecosystem Assessment*.

Più recentemente il concetto è stato affiancato agli ambienti urbani per comprendere meglio l'interfaccia uomo-ambiente. In questo senso, i servizi ecosistemici urbani (SEU) sono stati definiti come quei servizi prodotti direttamente dalle strutture ecologiche all'interno delle aree urbane o delle regioni periurbane (Haase et al., 2014; McGranahan et al., 2005), per migliorare la qualità della vita della popolazione. La variabilità del contesto, delle identità culturali e delle percezioni che è possibile rintracciare nei paesaggi urbani rende più complessa la valutazione dei

SE, che possono assumere valori sensibilmente diversi anche tra ambiti appartenenti allo stesso nucleo urbano, introducendo la necessità di coinvolgere la comunità nel processo di valutazione. Questo aspetto fu esplorato già negli anni '60 dall'urbanista Kevin Lynch con il lavoro "L'immagine della città" (Lynch, 2013), nel quale egli esplora la diversa percezione degli spazi urbani da parte delle persone e l'interazione uomo-ambiente. Oggi la mappatura partecipata rappresenta uno strumento cruciale per la raccolta, la validazione e l'aggiornamento dei dati geografici, attraverso il coinvolgimento diretto delle comunità locali. Questa metodologia si fonda sull'idea che le persone che vivono e operano in un determinato territorio sono le migliori conoscitrici delle sue caratteristiche e dinamiche. Non solo permette di ottenere dati accurati, ma favorisce anche la democratizzazione delle informazioni e l'*empowerment* delle comunità. Inoltre, le informazioni raccolte dagli attori locali tendono ad essere più accurate perché derivano dalla conoscenza diretta del territorio e facilitano la trasparenza e la responsabilità, poiché i dati sono raccolti o validati in modo aperto e collaborativo. Questa ricerca sperimenta l'approccio partecipato sia per raccogliere informazioni utili a validare gli attuali strumenti cartografici di uso e copertura del suolo che per suggerirne l'implementazione nella valutazione di alcuni servizi ecosistemici urbani.

Molti studi hanno dimostrato gli effetti benefici del verde sulla salute, in termini di miglioramento del benessere percepito, salute mentale, riduzione delle malattie cardiovascolari e diminuzione della mortalità, ma anche miglioramento della qualità dell'aria, mitigazione del clima, infiltrazione dell'acqua e benefici paesaggistici ed estetici, migliorando la coesione sociale, l'interazione e l'uguaglianza. La presenza di aree verdi ben gestite e sufficientemente estese ha anche un beneficio economico, con effetti sul valore degli immobili e sulle attività commerciali. Tuttavia, una grande sfida è passare dalla conoscenza scientifica al processo decisionale nel mondo reale (Ruckelshaus *et al.*, 2015) e questo cambiamento richiede la capacità di valutare più SE e di sintetizzare i risultati (Cortinovis *et al.*, 2021). Come mostrato dalla ricerca di (Luederitz *et al.*, 2015) la prospettiva meno comune negli studi sui servizi ecosistemici urbani è proprio quella legata alla governance

per spiegare quali strumenti potrebbero migliorare i processi decisionali. L'uso integrato delle cartografie digitali prodotte in questa ricerca mostra il potenziale per restituire metriche quantitative a diverse scale di analisi e per alcuni servizi ecosistemici forniti dalle foreste nei paesaggi urbani italiani, per valutarne la multifunzionalità e supportare la pianificazione di azioni strategiche di forestazione.



Figura 13. Area verde Rosa Raimondi Garibaldi, quartiere Garbatella, Roma. Foto scattata da Angela Cimini a luglio 2023.

L'attività si è focalizzata sulla valutazione di due servizi ecosistemici offerti dalle foreste urbane, collocandosi all'interno di ricerche in corso in ambito nazionale e finalizzate a produrre strumenti operativi per la Pubblica Amministrazione. Il primo SE si riferisce alla capacità di regolazione microclimatica delle foreste in ambito urbano, il secondo alla capacità di accedere alle aree verdi pubbliche in ambito urbano, garantendo la possibilità di compiere esperienze ricreative, sportive, educative, di osservazione della natura e associate ai valori simbolici, spirituali, paesaggistici e di conservazione della memoria storica e culturale all'interno dei paesaggi urbani. Inoltre, viene proposta un'analisi integrata dei due SE analizzati, utile a restituire un quadro conoscitivo articolato e in grado di fornire indicazioni sulle azioni prioritarie da concretizzare nei paesaggi urbani italiani.

1.4.1 Mitigazione dell'isola di calore urbana

Le ondate di calore sono definite come periodi di calore eccessivo che si protraggono per diversi giorni consecutivi e possono avere un impatto sugli organismi e sugli ecosistemi in termini di capacità di assorbimento del carbonio, aumento del rischio incendi, riduzione della produzione primaria ma anche sull'economia e sull'aumento della mortalità (Perkins & Alexander, 2013). Secondo il World Health Organization (WHO), tra il 2000 e il 2020 la mortalità dovuta a ondate di calore è aumentata del 94%, con effetti più pronunciati nelle città. Negli ultimi decenni le regioni mediterranee dell'Europa sono state soggette ai maggiori impatti in termini di riduzione delle precipitazioni e incremento delle ondate di calore che nel 2003 hanno causato oltre 70.000 decessi nei mesi estivi (Robine *et al.*, 2008). Secondo il Copernicus Climate Change Service l'estate del 2022 è stata la stagione più calda mai registrata in Europa, caratterizzata da un'intensa serie di ondate di calore, siccità e incendi (European Commission, 2022). Lo studio di Joan Ballester su Nature Medicine ha stimato oltre 60.000 decessi correlati al calore con i più alti tassi di mortalità nei paesi vicino al Mar Mediterraneo e, in particolare in Italia, Grecia, Spagna e Portogallo (Ballester *et al.*, 2023).

Gli effetti del cambiamento climatico sull'ambiente e sulla salute umana sono particolarmente rilevanti nelle aree urbane, nelle quali è presente la più elevata densità di popolazione e le temperature sono generalmente più elevate rispetto al loro intorno. Questo modello di distribuzione termica noto con il termine "isola di calore urbana" (Urban Heat Island – UHI) è stato esplorato per la prima volta nel 1818 da Luke Howard sulla città di Londra (Howard, 2012). La scelta della parola "isola" è simbolica e rappresenta l'idea di un'area isolata, in questo caso, un microclima caldo che emerge in un ambiente più fresco. Questa analogia aiuta a visualizzare come le città, circondate da spazi rurali o naturali, possano presentare un "nucleo" di calore che si comporta in modo diverso rispetto al resto del territorio (Figura 14). Inoltre, Howard, sottolinea che la distribuzione delle temperature nelle aree urbane non è uniforme; le zone con alta densità di superfici

costruite tendono a presentare temperature più elevate e nel grafico delle isoterme sono ravvisabili nelle "cime", dove l'intensità del fenomeno è massima, mentre le aree verdi o i corpi idrici mostrano temperature inferiori.

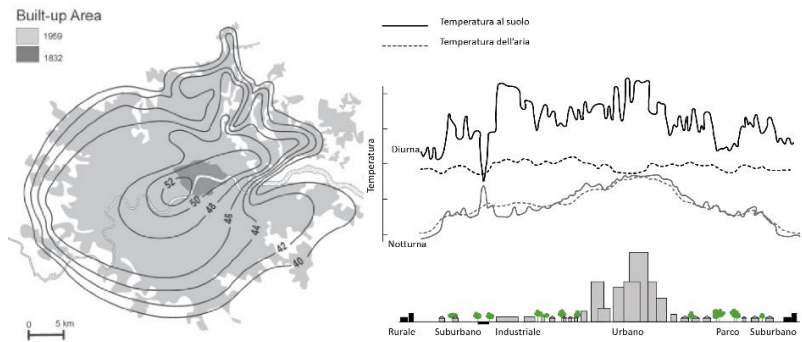


Figura 14. Grafico delle isoterme di Howard (a sinistra) e andamento delle temperature al suolo e dell'aria, di giorno e di notte lungo il gradiente urbano-rurale (a destra).

La sua eredità scientifica ha influenzato gli studi moderni sulle interazioni tra ambiente urbano e clima; Oke ha dimostrato che l'isola di calore è in gran parte un fenomeno notturno attribuibile alla differenza di raffreddamento delle aree urbane rispetto a quelle rurali e ha sottolineato come il suo andamento spaziale sia legato alla distribuzione e alle caratteristiche della copertura del suolo. I fattori che concorrono a rendere le aree urbane più calde sono stati definiti da (Ahmed Memon et al., 2008), che li distingue in incontrollabili, se attribuibili a condizioni naturali, e controllabili, se dipendenti dalle attività antropiche (Tabella 4). In quest'ultimo caso è possibile prevedere interventi di mitigazione.

Tabella 4 Fattori controllabili e incontrollabili che influiscono sull'isola di calore urbana

Fattori incontrollabili	Fattori controllabili
Posizione geografica	Caratteristiche radiative e termiche dei materiali
Condizioni meteorologiche	Morfologia urbana (geometria degli edifici, canyon urbani e rugosità)
Stagionalità	Calore antropogenico
Caratteristiche topografiche	Presenza e stato della vegetazione e delle aree verdi

Nell'ambito dell'analisi dell'isola di calore urbana viene valutata la relazione tra distribuzione e composizione della copertura arborea all'interno e intorno alle aree urbane, e la capacità di mitigare le temperature durante la stagione estiva. Le superfici verdi sono in grado di assorbire la radiazione solare e di rimuovere buona parte del calore accumulato attraverso l'evapotraspirazione (un processo secondo cui il vapore acqueo rilasciato nell'aria contribuisce al raffreddamento delle aree limitrofe), mentre le aree naturali con vegetazione rada o assente mostrano, generalmente, temperature più alte rispetto a quelle in cui la vegetazione è più fitta e rigogliosa (Sayão et al., 2020). Significa che la copertura arborea ha un effetto di raffreddamento maggiore rispetto all'erba e questo perché gli alberi, oltre all'effetto di ombreggiamento, hanno un processo di evapotraspirazione più intenso rispetto a un'area equivalente di erba. Inoltre, nella letteratura scientifica vi è un ampio consenso sulla variabilità dell'effetto di raffreddamento della copertura arborea tra le diverse specie, per diverse ragioni, come i diversi tratti fisiologici, la densità del fogliame, l'altezza dell'albero e la geometria della chioma (Morakinyo et al., 2020; Rahman et al., 2020).

In generale è comunque possibile affermare che tra le tecniche di mitigazione, quelle che generalmente sembrano produrre risultati migliori sono l'aumento della copertura arborea e l'utilizzo di materiali in grado di riflettere una maggior quota di radiazione solare. Ad esempio, (Akbari & Konopacki, 2005) stima che la temperatura estiva massima di Los Angeles si abbasserebbe di 2-3 K se venissero piantati tre alberi per ogni casa e se i due terzi della superficie urbana incrementasse la propria albedo⁶. In questo senso, i parchi urbani rivestono un ruolo fondamentale nella mitigazione del fenomeno dell'isola di calore. Diversi studi hanno dimostrato la relazione tra dimensione, forma, configurazione spaziale della copertura vegetale nei parchi urbani e miglioramento del comfort termico suggerendo alcuni elementi da

⁶ L'albedo indica la capacità di un materiale di riflettere la luce e rappresenta la frazione di radiazione solare riflessa da una superficie rispetto a quella incidente. Più alto è l'albedo minore è la capacità di una superficie di trattenere il calore e, quindi, di riscaldarsi.

tenere in considerazione nella progettazione di nuove aree verdi in ambito urbano. Uno studio pubblicato da *Forests (Barradas et al., 2022)* ha dimostrato che parchi con una distribuzione strategica degli alberi permette di massimizzare l'ombreggiamento durante le ore più calde, riducendo così le temperature superficiali e migliorando la qualità dell'aria. Anche la scelta delle specie arboree può influenzare l'efficacia del raffreddamento; ad esempio, specie ad alto tasso di crescita e con ampie chiome sono particolarmente efficaci nel fornire ombra. La dimensione dei parchi è un altro fattore determinante. La ricerca condotta da *Cheng et al., 2015* ha dimostrato le modalità secondo cui parchi più ampi tendono a generare microclimi più freschi rispetto a spazi verdi più piccoli. Questo perché i parchi di dimensioni maggiori possono ospitare una varietà più ampia di specie vegetali, contribuendo anche ad una maggiore diversità ecologica. Inoltre, la presenza di corpi d'acqua può ulteriormente abbattere le temperature attraverso il raffreddamento evaporativo. La densità di copertura arborea è un altro elemento chiave nella progettazione dei parchi urbani in quanto una maggiore densità di alberi è correlata a una riduzione significativa delle temperature superficiali nelle aree urbane. Tuttavia, nella progettazione degli spazi verdi urbani, questi parametri devono essere osservati tenendo conto delle interazioni tra elementi naturali, costruiti e popolazione allo scopo di ottimizzare il comfort termico ma soprattutto per promuovere l'uso degli spazi pubblici.

Tradizionalmente, la ricerca sul clima urbano ha adottato la semplice dicotomia “urbano-rurale”, ignorando le differenze intra-urbane che necessitano di una descrizione più dettagliata. Stewart e Oke hanno formalmente proposto un sistema di classificazione delle Zone Climatiche Locali, come quadro generico per lo studio del clima urbano (*Stewart et al., 2014*). Si tratta di un sistema di classificazione del paesaggio in 10 tipologie di edificato e 7 tipologie di copertura del suolo, ognuna delle quali ha parametri fisici rilevanti per il clima. Nonostante i progressi ottenuti nella produzione di mappe LCZ, la difficoltà di reperimento di dati di elevata qualità a vasta scala unitamente alla rigidità del sistema di classificazione non permettono di rappresentare adeguatamente la grande diversità tra città e le diverse configurazioni

che le classi LCZ possono assumere tra diversi paesaggi urbani (F. Huang et al., 2023). Pertanto, il fenomeno isola di calore urbana viene esplorato proponendo una rappresentazione sintetica del paesaggio basata sulla configurazione e distribuzione spaziale delle due componenti di copertura del suolo che gli studi hanno dimostrato influire maggiormente sulla variazione di temperatura: le superfici artificiali e la copertura arborea. Questi elementi interagiscono tra loro e influenzano il progetto del paesaggio urbano, enfatizzando l'importanza di un approccio informato nella progettazione degli spazi verdi (Craul, 1992).

1.4.1.1 Il telerilevamento per il monitoraggio dell'isola di calore urbana

Ai fini di questo lavoro è utile chiarire le diverse declinazioni che il fenomeno isola di calore assume nell'ambito delle tecniche di misurazione, al fine di dichiarare lo specifico settore di analisi a cui si fa riferimento nella ricerca. Le macro-tipologie di UHI sono sintetizzabili come segue:

- **atmosferica**, ulteriormente distinta in *Boundary Layer Urban Heat Island* (BUHI - interessa lo strato al di sopra dell'altezza media degli edifici) e *Canopy Layer Urban Heat Island* (CLUHI - interessa lo strato al di sotto dell'altezza media degli edifici);
- **superficiale** (Surface UHI - SUHI);
- **sottosuolo** (subsurface UHI).

La correlazione tra queste diverse tipologie di isola di calore è stata dimostrata in numerosi studi (Kawashima et al., 2000; Zhang et al., 2014), tuttavia, la differenza in termini di origine, tecniche di misurazione e caratteristiche temporali di acquisizione delle informazioni sono fattori da tenere in considerazione nella lettura dei dati.

Le UHI atmosferiche si riferiscono alle misure della temperatura dell'aria e viene determinata attraverso sensori collocati su stazioni meteorologiche fisse o a postazione mobile in grado di fornire dati dettagliati, ma la distribuzione eterogenea di questi strumenti sul

territorio può introdurre incertezze nelle misurazioni e limitare l'applicabilità alla scala vasta.

Le SUHI fanno riferimento alla *Land Surface Temperature* (LST), definita come la temperatura termodinamica di uno strato sottile nell'interfaccia tra suolo, vegetazione o altri componenti della superficie e l'atmosfera e descrive quanto calda o fredda sarebbe la superficie terrestre al tatto. Tale misura si ottiene applicando algoritmi di conversione dei valori di radianza emessa dalla superficie terrestre e registrata dai sensori (influenzata sia dalle proprietà termiche dei materiali, sia dalle condizioni meteorologiche), in valori di temperatura (Voogt & Oke, 2003).

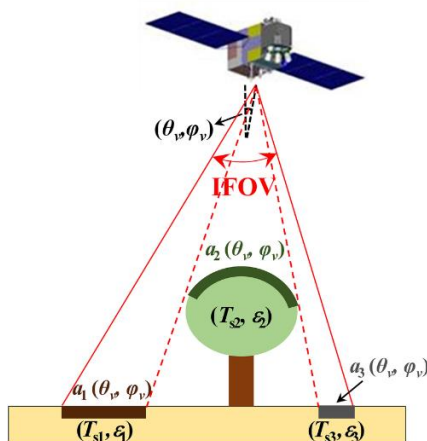


Figura 15. Schema della superficie terrestre nel telerilevamento T_{si} , ϵ e a_i sono Temperatura superficiale, emissività e peso dell'area proiettata.

La LST viene comunemente misurata mediante sensori di telerilevamento che registrano la radiazione elettromagnetica emessa dalla superficie terrestre, in particolare nella banda dell'infrarosso termico (TIR)⁷. Tale energia (radianza osservata - B_λ) è convertita in

⁷ Porzione dello spettro elettromagnetico all'interno del quale i sensori passivi sono in grado di acquisire la radiazione elettromagnetica emessa dalla superficie terrestre nella gamma di lunghezze d'onda compresa tra $8\mu\text{m}$ e $14\mu\text{m}$ dove l'assorbimento atmosferico è ridotto. Tale radiazione è associata alla temperatura della superficie osservata.

un'immagine digitale, dove ogni elemento dell'immagine, o pixel, ha un valore discreto in unità di numero digitale (NASA, 2013). Quest'ultimo viene tradotto in termini di Temperatura di luminosità al sensore (*Brightness Temperature*⁸) applicando la legge di Plank inversa⁹ secondo la formula:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)}$$

Dove:

T = Temperatura di luminosità al satellite

L_λ = Radianza *Top Of Atmosphere* (Watts/(m²*srad*μm))

K₁ = Costante di calibrazione 1

K₂ = Costante di calibrazione 2

Questo valore di temperatura si riferisce ad un corpo nero ideale e, pertanto, non tiene in considerazione l'emissività degli elementi presenti sulla superficie terrestre e gli effetti legati all'interferenza atmosferica.

L'emissività (ε) misura la capacità di una superficie di emettere radiazione termica rispetto ad un corpo nero ideale alla stessa temperatura. Un corpo nero ideale ha un'emissività pari a 1; ciò significa che converte tutta l'energia ricevuta in radiazione termica. Le superfici reali hanno, invece, emissività compresa tra 0 e 1 e varia in funzione del materiale, della rugosità, dell'angolo di incidenza della radiazione e alla lunghezza d'onda della radiazione osservata. In altre parole, l'emissività

⁸ È la temperatura che avrebbe un corpo nero ideale se emettesse la stessa radianza rilevata dal sensore.

⁹ La legge di Planck descrive la radiazione emessa da un corpo nero in funzione della temperatura e della lunghezza d'onda (λ). I sensori satellitari misurano la radianza emessa dalla superficie terrestre. Tuttavia, non misurano direttamente la temperatura, ma la quantità di energia ricevuta sotto forma di radiazione elettromagnetica in una determinata lunghezza d'onda. Pertanto, applicando la legge di Plank a partire dalla conoscenza dei valori di radianza al sensore nella lunghezza d'onda dell'infrarosso termico è possibile dedurre la temperatura che avrebbe un corpo nero ideale.

è il parametro chiave che consente di trasformare le misurazioni di radianza in informazioni affidabili sulla temperatura reale delle superfici terrestri e può essere stimata usando diverse metodologie basate su dati spettrali, mappe di uso del suolo e modelli empirici. Inoltre, la radiazione emessa dalla superficie terrestre può subire alterazioni durante il suo passaggio attraverso l'atmosfera, a causa di:

- Assorbimento (es. da parte di gas come vapore acqueo, anidride carbonica e ozono);
- Scattering (dispersione della radiazione da parte di molecole e aerosol).

Le correzioni atmosferiche vengono effettuate utilizzando modelli fisici e informazioni ausiliarie come profili atmosferici di temperatura e umidità, derivati da sensori meteorologici o modelli climatici.

Il *Global Climate Observing System Implementation Plan* del 2016 ha suggerito la LST derivata da satellite, come fattore climatico chiave per studiare il fenomeno dell'isola di calore superficiale e gli impatti ad esso associati. L'uso di dati telerilevati permette di restituire informazioni a scala locale e regionale in modo economico e tempestivo, superando i limiti connessi con la disponibilità di informazioni provenienti dalle stazioni meteorologiche.

Gli studi sul clima urbano tramite telerilevamento satellitare hanno avuto inizio negli anni '70 come risultato di programmi satellitari di successo come il Television InfraRed Observational Satellite (TIROS), Nimbus, Environmental Science Services Administration Satellite (ESSA) e Landsat, che hanno portato al lancio di diversi satelliti, in particolare TIROS-1 (1960), Nimbus series (1964-1978), ESSA-1 (1966) e Landsat (dal 1972). Le caratteristiche più rilevanti da valutare nell'analisi dei prodotti LST da immagini satellitari che determinano potenzialità e limiti delle applicazioni sono la risoluzione spaziale e la risoluzione temporale. Per risoluzione spaziale si intende la dimensione dell'unità più piccola dell'immagine, cioè il pixel, mentre la risoluzione temporale indica la frequenza con la quale un satellite può acquisire immagini della stessa area sulla superficie terrestre. L'alta risoluzione spaziale è

considerata nell'ordine di centinaia di metri, mentre la risoluzione spaziale media e la bassa risoluzione spaziale sono rispettivamente e nell'ordine di chilometri e di diversi chilometri. Nella tabella che segue sono riportati i principali prodotti LST disponibili in ambito globale ed europeo (Z. L. Li et al., 2023).

Per il monitoraggio dell'isola di calore a livello locale è necessario disporre di informazioni con risoluzioni spaziali e temporali elevate al fine di evitare possibili lacune nell'acquisizione dei dati. Per questo motivo, in questo lavoro si è fatto riferimento ai prodotti LST ad elevata risoluzione derivati dalle missioni satellitari della NASA (*National Aeronautics and Space Administration* degli Stati Uniti d'America) e distribuiti dallo *United States Geological Survey* (USGS) gratuitamente. Tra quelli ad elevata risoluzione spaziale si è fatto riferimento alle immagini satellitari delle missioni Landsat, mentre per quelli ad elevata risoluzione temporale sono state utilizzate le immagini restituite dal sensore MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) montato sui satelliti Terra e Aqua.

Landsat

Landsat è un insieme di satelliti multispettrali sviluppati dalla NASA dall'inizio degli anni Settanta, molto utilizzati nella ricerca e monitoraggio dell'isola di calore. Dal lancio del primo satellite Landsat nel 1972, questa serie di missioni ha fornito dati fondamentali per lo studio e la gestione delle risorse naturali, l'analisi del cambiamento climatico e il supporto a innumerevoli applicazioni scientifiche e commerciali.

Landsat 7 è stato lanciato il 15 aprile 1999 con il sensore *l'Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) che include una banda pancromatica ad alta risoluzione (15 metri) e sette bande multispettrali che coprono lunghezze d'onda che vanno dal visibile all'infrarosso termico. Nel 2003 il satellite ha subito un guasto al suo *Scan Line Corrector* (SLC), causando la perdita di alcune linee di dati nelle immagini.

Landsat 8 è stato lanciato l'11 febbraio 2013, con l'obiettivo di proseguire e migliorare le osservazioni terrestri fornite dai suoi

predecessori. È equipaggiato con due strumenti scientifici principali: l'*Operational Land Imager* (OLI) progettato per catturare dati multispettrali con nove bande spettrali e il *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) misura la radiazione termica con due bande nell'infrarosso termico, migliorando la capacità di monitorare fenomeni come l'evapotraspirazione e il bilancio energetico. Le bande multispettrali hanno una risoluzione spaziale di 30m, quella pancromatica di 15m, mentre le bande termiche hanno una risoluzione orizzontale di 100m che viene ricampionata e distribuita a 30m. Landsat 8 acquisisce immagini con un intervallo temporale di 16 giorni.

Landsat 9, lanciato il 27 settembre 2021 affianca Landsat 8 prendendo l'orbita del precedente Landsat 7 e utilizza gli stessi strumenti di Landsat 8. La combinazione dei due satelliti ha permesso di migliorare la frequenza di osservazioni che passa da 16 giorni a 8 giorni consentendo un monitoraggio più tempestivo e accurato. Grazie alla loro risoluzione spaziale e alla sensibilità radiometrica, queste immagini permettono di identificare hotspot termici, valutare l'efficacia delle infrastrutture verdi e pianificare interventi per mitigare l'effetto UHI.

Landsat acquisisce immagini anche durante i passaggi notturni ascendenti dell'orbita, tuttavia, gli intervalli di acquisizione sono variabili e non coprono tutta la superficie terrestre. Di fatto non è ancora disponibile nessuno studio che abbia utilizzato dati TIR notturni di Landsat sia per il recupero che per la validazione di LST notturna (Sekertekin & Bonafoni, 2020).

MODIS

I satelliti Terra e Aqua fanno parte del programma Earth Observing System (EOS) della NASA. Tra gli strumenti principali, il sensore *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) è progettato per raccogliere dati multispettrali su una vasta gamma di lunghezze d'onda, coprendo il visibile, il vicino infrarosso, l'infrarosso medio e l'infrarosso termico, con una risoluzione spaziale variabile (250 m, 500 m e 1 km per l'infrarosso termico), una copertura globale ogni 1-2 giorni e la possibilità di registrare due osservazioni al giorno. Le immagini

MODIS sono state ampiamente utilizzate per sviluppare prodotti LST utilizzando l'algoritmo generalizzato *split-window* e l'algoritmo giorno/notte in quanto una delle caratteristiche più innovative di MODIS è la sua capacità di acquisire dati nell'infrarosso termico anche durante la notte.

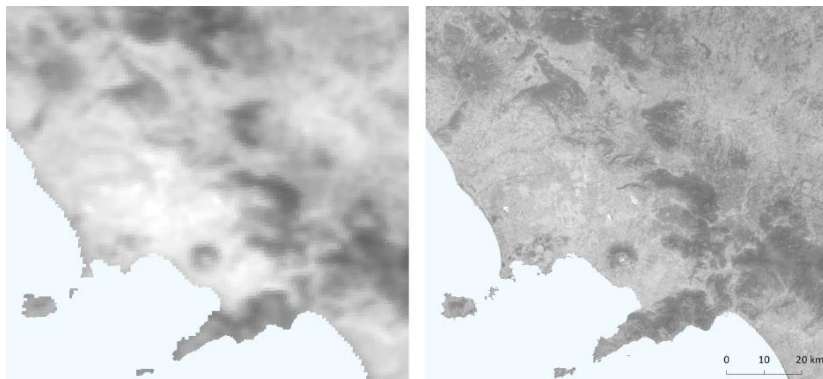


Figura 16 L'immagine dell'area metropolitana di Napoli mostra il diverso dettaglio spaziale restituito dal sensore MODIS (a sinistra) e TIRS (a destra).

L'evoluzione della tecnologia satellitare ha portato alla generazione di enormi quantità di dati telerilevati, offrendo l'opportunità di approfondire le dinamiche ambientali, la gestione urbana e il monitoraggio delle risorse naturali e diventando strumenti indispensabili per comprendere “come siamo influenzati e come stiamo influenzando il pianeta” (Zhong, 2024), ma questa enorme mole di informazioni rappresenta anche una sfida in termini gestionali. Google Earth Engine (GEE) è emerso come uno strumento fondamentale nel campo del *Remote Sensing*, grazie alla sua capacità di gestire e analizzare enormi volumi di dati geospaziali, i così detti *Big EO Data*. Dalla sua introduzione nel 2010, GEE ha rivoluzionato l'accesso e l'utilizzo di dati satellitari, facilitando studi su scala globale e locale in vari ambiti scientifici. Nell'articolo di Gorelick et al., 2017 viene fornita una panoramica dettagliata dell'architettura del sistema GEE, evidenziando come la sua infrastruttura *cloud-based* permette l'accesso a un vasto catalogo di immagini satellitari storiche e attuali e strumenti per l'analisi spaziale, inclusi algoritmi per il calcolo della

temperatura della superficie terrestre (LST) e la possibilità di utilizzare script personalizzati per adattare le analisi a specifiche esigenze.

Sfruttando le più recenti informazioni satellitari e gli strumenti di gestione ed elaborazione di dati telerilevati sono stati migliorati gli attuali prodotti disponibili in ambito nazionale per il monitoraggio del fenomeno isola di calore urbana e per renderli disponibili e pronti all'uso da parte della Pubblica Amministrazione, che a vario titolo si occupa di governo del territorio. In questo senso, il lavoro si colloca nell'ambito delle attività di ricerca dell'ISPRA sugli impatti del consumo di suolo e nel progetto di ricerca MIRIFICUS (**M**onitoraggio degli **I**nterventi di **R**iforestazione per l'**I**sola di **C**alore **U**rbana tramite **S**atelliti) promosso dal dipartimento IBE del CNR di Firenze in collaborazione con ISPRA e finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) che ha l'obiettivo di restituire dati e indicatori spazializzati, utili a veicolare la progettazione e a monitorare gli effetti degli interventi di forestazione a livello nazionale. La ricerca fornisce un esempio di applicazione integrata di dati satellitari e strumenti di pianificazione locale sul comune di Roma per individuare le aree prioritarie di interventi.



Figura 17. Villa Lazzaroni (Roma). Foto scattata da Angela Cimini l'8 ottobre 2023.

1.4.2 L'accessibilità al verde pubblico per l'inclusione sociale, la salute e il benessere della popolazione

Sebbene la disponibilità di spazi verdi nelle aree più urbanizzate sia diventata una condizione essenziale per affrontare le sfide imposte dalla crisi climatica, in Europa solo il 44% della popolazione urbana ha accesso a un parco pubblico nel raggio di 300 m, con variazioni significative tra le città dell'Est e del Mediterraneo (*Kabisch et al., 2016*).

Il crescente interesse per le città e per le dinamiche insediative e demografiche ha evidenziato la necessità di introdurre definizioni di aree urbane, spazi verdi e accessibilità che siano spazialmente esplicite, supportate da evidenze scientifiche e riconosciute dai principali strumenti normativi. L'introduzione dell'Obiettivo 11 di Sviluppo Sostenibile delle Nazioni Unite “Rendere le città inclusive, sicure, resilienti e sostenibili” ha fornito definizioni e metodologie standardizzate per la mappatura delle aree urbane (*Eurostat, 2021*), ma la definizione degli spazi verdi, soprattutto quelli pubblici, non è ancora univoca. In genere, gli spazi verdi pubblici nelle aree urbane sono i parchi pubblici, ma possono includere anche giardini privati, foreste, parchi giochi, filari di alberi lungo le infrastrutture stradali o infrastrutture blu, a seconda degli obiettivi dell'analisi. Attualmente non esiste una definizione universalmente accettata di spazi verdi pubblici urbani (*Green Urban Public Space - GUPS*), ma varia a seconda del contesto e degli obiettivi specifici delle ricerche (*B. X. Huang et al., 2023; Marinosci, 2009; Przewoźna et al., 2024; Sangwan et al., 2022; Taylor & Hochuli, 2017; World Health Organization, 2017*). A livello normativo, la legge sul ripristino della natura ha introdotto una definizione di verde urbano da conservare e implementare immediatamente che include tutti gli alberi, i cespugli, gli arbusti, l'erba permanente, i licheni e i muschi, gli stagni e i corsi d'acqua all'interno delle città e dei piccoli agglomerati urbani ed esclude tutte le coperture artificiali e i suoli agricoli (le misure previste per gli ecosistemi agricoli sono descritte nell'articolo 11). Per valutare l'impatto delle aree verdi urbane sulla salute e sul benessere umano, è importante considerare altri aspetti oltre alla presenza di vegetazione, come le dimensioni, gli usi e le funzioni che ospitano

(*Cardinali et al., 2024; Pastore et al., 2025*). L'entità dei benefici è anche strettamente connessa con la possibilità di raggiungere le aree verdi pubbliche tramite brevi spostamenti.

Per quanto riguarda le dimensioni, la regola del 3-30-300 (Konijnendijk, 2023), adottata dall'Unione Internazionale per la Conservazione della Natura (IUCN), raccomanda il riferimento ad aree verdi di almeno un ettaro, così come nello studio di Matilda Annerstedt Van Den Bosch (*Annerstedt Van Den Bosch et al., 2016*).

Il regime di proprietà consente di valutare la funzione dell'area verde per promuovere l'uguaglianza, l'inclusione e l'interazione sociale. Bencivenni e De Vico Fallani (Bencivenni & De Vico, 2003) evidenziano come le caratteristiche principali del verde pubblico urbano devono essere il “libero accesso e il libero godimento da parte dei cittadini [...] tutti i giorni dell'anno” e per le funzioni che svolgono devono essere attribuiti alla categoria di “beni culturali fondamentali” nell'obiettivo di riconoscere a tutti i cittadini il diritto alla salute, al benessere e alla cultura. Tali affermazioni sono sostenute anche dall'SDG 11.7 (“entro il 2030, fornire l'accesso universale a spazi verdi e pubblici sicuri, inclusivi e accessibili, in particolare per le donne e i bambini, gli anziani e le persone con disabilità”) che suggerisce, in assenza di informazioni dettagliate o di una mappatura del regime di proprietà o della fruibilità delle aree verdi, l'uso del database *OpenStreetMap* (OSM) (*UN Habitat, 2018b*).

Il concetto di accessibilità ha assunto nel tempo diversi significati che richiedono la combinazione della dimensione normativa con quella qualitativa e quantitativa (*Levine, 2020*). L'obiettivo generale di questo studio è la valutazione dell'accessibilità su scala nazionale utilizzando la metodologia prevista dall'indicatore 11.7.1 dell'SDG delle Nazioni Unite, con riferimento agli spazi pubblici verdi (una delle tre componenti considerate dai metadati dell'indicatore, insieme alle infrastrutture grigie e blu). L'attenzione agli spazi verdi è dovuta alla loro importanza nell'attuale quadro delle politiche europee e internazionali, prima fra tutte la nuova legge sul ripristino della natura, lo stesso SDG 11.7.1 o, a livello nazionale, gli interventi di forestazione previsti dal Piano

Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR). In questo senso, la valutazione dell'accessibilità è stata effettuata nel rispetto delle definizioni e delle metodologie di calcolo previste dal contesto normativo, per ottenere dati territoriali idonei a supportare i processi decisionali, tra i quali l'individuazione delle aree prioritarie per gli interventi di forestazione urbana.

Un obiettivo specifico riguarda l'analisi delle fasi tecniche per il calcolo dell'accessibilità alle GUPS secondo la metodologia proposta dall'indicatore SDG 11.7.1, con un focus sui dati di input disponibili per il territorio italiano, valutandone l'idoneità in relazione a caratteristiche quali risoluzione spaziale, frequenza di aggiornamento, sistema di classificazione e livello di copertura. In particolare, sono stati presi in considerazione OSM e Urban Atlas (UA). Questi ultimi, sono i dati più dettagliati disponibili per la mappatura delle aree urbane ma si basano su sistemi di classificazione, logiche di mappatura e aggiornamento differenti. UA appartiene al CLMS, ed è prodotta e aggiornata secondo una metodologia standardizzata che fornisce una mappatura omogenea sulle principali FUA in termini di unità minima di mappatura, sistema di classificazione, anno di riferimento e accuratezza; OSM ha una maggiore eterogeneità geometrica e temporale, ma offre una copertura molto più ampia e dettagliata di UA e più flessibile dal punto di vista tematico, permettendo anche di introdurre nuovi attributi. L'ultimo obiettivo specifico è la valutazione dell'accessibilità alle GUPS nelle aree urbane delle 14 città metropolitane italiane (delimitate attraverso la metodologia DEGURBA di Eurostat), con l'introduzione di due indici ausiliari che descrivono la presenza di GUPS pro capite rispetto al totale degli spazi verdi urbani pro capite.

1.4.2.1 Esperienze di mappatura dell'accessibilità alle aree verdi pubbliche

Molti studi analizzano l'accessibilità alle GUPS considerando diverse tecniche, strumenti, definizioni, ambiti di analisi. Ad esempio, lo studio condotto dall'azienda Deda Next (*Olivari et al., 2023*) si riferisce al concetto di "Accessibilità per prossimità" (Silva & Larsson, 2018) e alla teoria delle "città a 15 minuti", come la possibilità per una persona di

raggiungere servizi di interesse rilevanti (negozi di alimentari, servizi sanitari o ricreativi come le aree verdi), entro 15 minuti a piedi o in bicicletta. Alcune esperienze di calcolo sono basate sulla definizione di un buffer intorno alle aree di interesse, e quindi riferite alla distanza in linea d'aria dall'obiettivo (*De La Barrera et al., 2016; Kabisch et al., 2016*), mentre altri studi fanno riferimento ai tempi di percorrenza e altri ancora alla distanza considerando la percorribilità lungo la rete stradale (*Fang et al., 2025*). Inoltre, la valutazione è condizionata anche dalle caratteristiche dei diversi elementi coinvolti (*Ekkel & de Vries, 2017*): infatti, per valutare l'accessibilità alle GUPS, è importante rappresentare in modo appropriato le aree urbane (l'area all'interno della quale si valuta l'accessibilità alle GUPS), le GUPS (da raggiungere) e i relativi punti di accesso, le distanze (da percorrere per accedere alle GUPS) e la popolazione (che può accedere alle GUPS). L'area urbana può essere identificata con diversi approcci. *Poelman Giuliani e La Rosa* considerano l'impronta delle Aree Urbane Funzionali (FUA) di Urban Atlas Land Use/Land Cover (*Giuliani et al., 2021; La Rosa, 2014; Poelman, 2018*), mentre altre esperienze fanno riferimento all'intero territorio comunale (*Benati et al., 2024; Olivari et al., 2023*). Gli SDGs delle Nazioni Unite hanno introdotto il concetto di DEGURBA (Cfr. § 1.3.1 Leggere il paesaggio tramite l'uso e la copertura del suolo, basato sulla metodologia adottata da Eurostat, che rappresenta gli insediamenti attraverso la definizione di soglie sul numero di abitanti e sulla densità di popolazione. Questo strumento è stato ufficialmente adottato dalla legge sul ripristino della natura e per il monitoraggio dell'SDG11. Le GUPS possono essere identificate a partire dalle classi di UA "1.4- Aree verdi urbane" (*Benati et al., 2024; La Rosa, 2014*) e "3- Foresta" (*Poelman, 2018*), oppure estraendo da OSM categorie rappresentative di spazi verdi pubblici, combinando le informazioni sull'uso/copertura del suolo con il riferimento ad aree protette, aree agricole, cimiteri, aree sportive, arredi verdi o anche grandi aree boschive ai margini del tessuto insediativo (*Giuliani et al., 2021; Ito World, 2022*). Una volta identificate le GUPS, un aspetto fondamentale per la valutazione dell'accessibilità è la disponibilità di informazioni sulle caratteristiche dei margini e, in particolare, sui punti di accesso, che può influire notevolmente sui

risultati dell'analisi, soprattutto quando, per valutare le distanze, si utilizzano strumenti di analisi di rete più accurate delle metodologie basate sulla distanza euclidea (La Rosa, 2014). Se le informazioni sui punti di accesso non sono disponibili, si possono considerare i centroidi dei poligoni GUPS (Giuliani et al., 2021; Olivari et al., 2023) o disporre i punti di accesso a intervalli regolari lungo il perimetro del poligono (Benati et al., 2024; Burdziej, 2019; La Rosa, 2014; Poelman, 2018; UN Habitat, 2018b). Per valutare il numero di abitanti che si trovano in prossimità delle GUPS, e che quindi hanno accesso ad esse, è necessario avere informazioni di dettaglio sulla distribuzione spaziale della popolazione. In questo senso, è importante disporre di dati spazializzati sulla popolazione o definire un criterio per produrli a partire dai dati demografici più dettagliati. A livello globale è disponibile la *Population Grid di Eurostat* (aggiornata al 2011 per il territorio italiano), mentre, in Italia, i dati ISTAT sulla popolazione sono aggiornati annualmente a livello comunale e ogni 10 anni a livello sub-comunale (le sezioni di censimento sono disponibili per il 2001, 2011 e 2021). Per valutare la capacità delle città di offrire servizi ricreativi alla popolazione è stata proposta per la prima volta una valutazione su scala nazionale dell'accessibilità ai GUPS in conformità con le indicazioni di legge della NRR per il monitoraggio degli ecosistemi urbani e basata sulla metodologia fornita dagli SDG, consentendo di ottenere stime coerenti e confrontabili tra le diverse aree del territorio italiano, utilizzando dati *OpenSource* e fornendo spunti operativi utili per applicazioni in altri contesti del territorio nazionale.

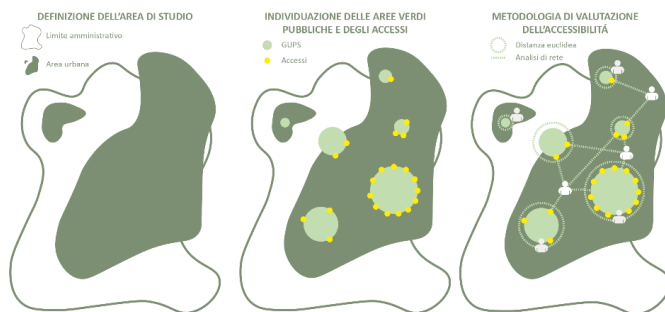


Figura 18. Elementi per mappare l'accessibilità spaziale alle aree verdi pubbliche urbane.

2. INNOVAZIONI E APPLICAZIONI

2.1 Area studio

Il territorio nazionale e le 14 città metropolitane

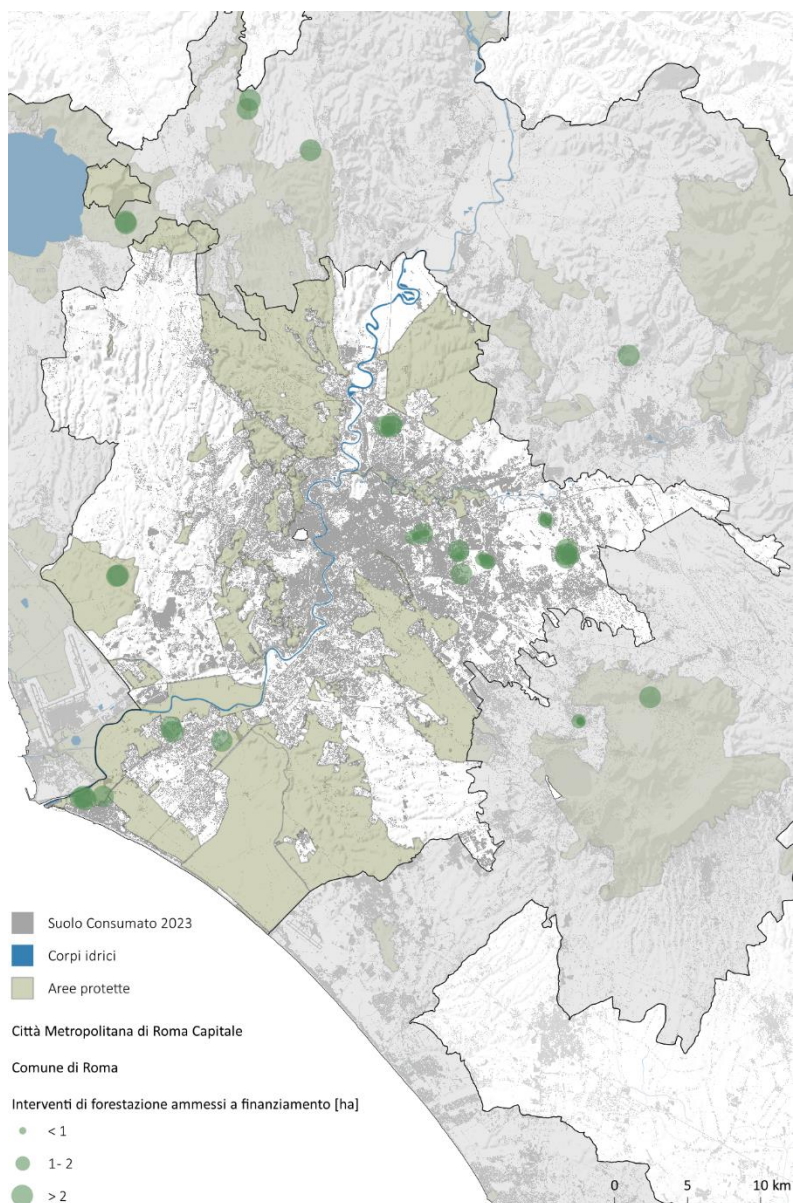


La posizione geografica unitamente alla grande varietà paesaggistica fa sì che l'Italia si configuri come un Paese unico nel contesto europeo e del Mediterraneo sia in termini di risorse naturali e varietà climatica che di fragilità territoriali. Il 35% del Paese è composto da montagne, il 42% da colline, il 23% da aree di pianura e da circa 8.300 km di costa, per il 18% circa interessata da processi di erosione (*ISPRA SNPA, 2020*); le foreste occupano il 40% circa del territorio (*MIPAAFT, 2019*) e rappresentano la principale infrastruttura verde del Paese. Dal punto di vista climatico rientra principalmente nella categoria C del sistema di classificazione Köppen-Geiger (*Kottek et al., 2006*), che comprende i climi temperati, con due sottocategorie principali: Csa (clima mediterraneo con estate calda e secca) e Cfa (clima temperato umido con estate calda e senza stagione secca). Secondo i dati ISPRA le temperature in Italia nel 2023 hanno fatto registrare un'anomalia media di +1,14°C (*ISPRA, 2023*), e considerando che il 14% del territorio nazionale è caratterizzato da aree a pericolosità idraulica alle quali risultano esposte oltre 12 milioni di persone (*Trigila et al., 2021*), tali alterazioni contribuiscono a rendere il Paese un hotspot del bacino del mediterraneo per quanto riguarda cambiamenti climatici in atto, eventi estremi e impatti sulla popolazione. A queste dinamiche si sommano quelle di urbanizzazione che hanno causato la perdita di quasi 129.000 ha di superfici naturali negli ultimi 17 anni (*Munafò, 2024*). Le statistiche europee pubblicate da *Land Use and Coverage Area frame Survey* nel 2018 (LUCAS) posizionano l'Italia al sesto posto tra i Paesi Europei con la quota più elevata di suolo consumato.

La misura 2 - componente 4 - investimento 3.1 "Tutela e valorizzazione del verde urbano ed extraurbano" del PNRR e il progetto Parco Italia, nato dalla visione di Stefano Boeri, hanno l'obiettivo di rispondere alla crisi climatica in atto ripristinando, tramite interventi di forestazione, le connessioni ecologiche lungo tutta la penisola e focalizzandosi, in via prioritaria, sui territori delle 14 città metropolitane italiane (*Boeri et al., 2022*).

Area studio

Comune di Roma



Il comune di Roma rappresenta un caso studio di particolare interesse per via dell'estensione della superficie territoriale, la più elevata del territorio nazionale, dell'eterogeneità delle caratteristiche ambientali, delle dinamiche di urbanizzazione e delle iniziative di forestazione finanziate dal PNRR per la conservazione e il ripristino delle aree naturali. Il territorio comunale rientra nella classe "Csa" del sistema di classificazione Köppen-Geiger. Con la codifica "Cs" si indicano i climi temperati caratterizzati da estati aride e inverni miti, mentre la lettera "a" indica che la temperatura media del mese più caldo supera i 22°C. In termini di copertura del suolo, le superfici artificiali occupano il 24% circa del territorio comunale, poco più di un quinto è caratterizzato da copertura arborea e più della metà da superfici erbacee. Inoltre, è innervato da una estesa rete di aree naturali che si estendono all'interno e intorno al nucleo urbano per oltre 42.000 ettari, parzialmente connesse con le principali aste fluviali del Tevere e dell'Aniene. Più del 95% della popolazione vive nell'area urbana e questa percentuale è aumentata del 4% negli ultimi dieci anni. La crescita demografica è stata accompagnata da un aumento del consumo di suolo che dal 2006 ha visto la scomparsa di 1.546 ettari di suoli naturali dovuti alla realizzazione di nuovi cantieri, edifici e infrastrutture (Figura 19).

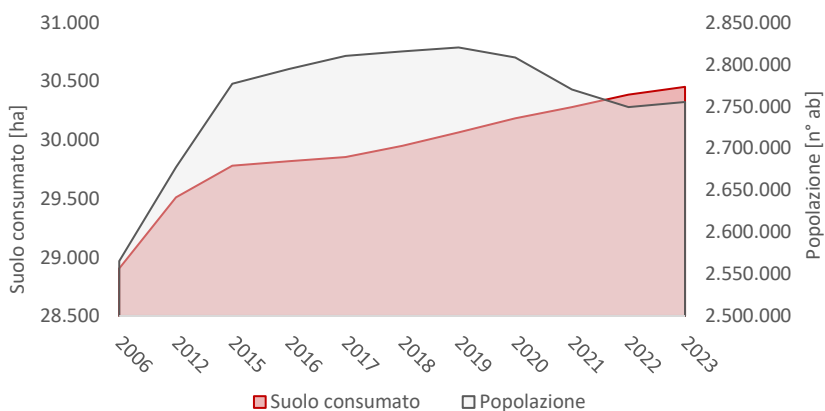


Figura 19. Suolo consumato e dinamiche demografiche tra il 2006 e il 2023.

2.2 Rappresentare e monitorare il paesaggio urbano...

La tendenza all'espansione delle città al di fuori dei loro margini e alla dispersione insediativa nelle campagne ha trasformato l'assetto di un paesaggio in cui era chiaramente distinguibile il tessuto urbano e quello rurale, producendo un continuum in cui l'urbano si espande e si fonde con le aree rurali circostanti, generando ampie e dilatate fasce suburbane e periurbane i cui confini non sono più rintracciabili all'interno dei tradizionali limiti amministrativi.

Il principale obiettivo di questo lavoro è mettere a punto uno strumento in grado di descrivere l'estensione spaziale dei paesaggi urbani, cogliendo le specificità del territorio nazionale e restando collegato con il quadro europeo in tema di monitoraggio degli interventi di forestazione urbana previsti anche dalla NRR e degli obiettivi di sviluppo sostenibile. Lo studio è stato svolto nell'ambito delle attività di monitoraggio delle trasformazioni del territorio e del paesaggio condotte dall'ISPRA e propone una classificazione delle aree urbane per il territorio italiano secondo le definizioni ufficiali sviluppate dall'Eurostat per la produzione dello strato DEGURBA. Questo modello propone una chiave per codificare la complessità dei paesaggi urbani e per tradurla secondo uno schema replicabile e condiviso, divenuto ancora più attuale a seguito dell'adozione da parte dell'SDG 11 "*Sustainable Cities and Communities*" delle Nazioni Unite e della NRR per monitorare gli ambiti territoriali soggetti agli obblighi di legge e per supportare la redazione dei PNR (per i quali è prevista anche l'individuazione degli interventi di forestazione). Al momento della ricerca, l'aggiornamento più recente del DEGURBA di Eurostat per l'Italia è relativo al 2018, con massimo dettaglio spaziale riferito ai limiti amministrativi, mentre la griglia di popolazione è riferita a dati 2011. La NRR garantisce parziale autonomia agli stati membri per la produzione del dato, utilizzando strati di base messi a punto dagli Stati stessi oppure attingendo ai servizi del Programma Copernicus. In questa sezione la metodologia DEGURBA viene applicata al contesto italiano, valorizzando i dati disponibili in ambito nazionale e CLMS con l'obiettivo di sviluppare strumenti aggiornabili e con caratteristiche idonee a supportare l'adempimento

degli obblighi di monitoraggio dei paesaggi urbani imposti in ambito europeo e internazionale, con particolare riferimento all'azzeramento della perdita netta di copertura arborea entro il 2030 e all'incremento della stessa entro il 2050.

Lo sviluppo della metodologia è stato influenzato dalla disponibilità di dati di popolazione ad elevato dettaglio ed ha portato alla realizzazione di tre rappresentazioni, che si differenziano per il livello di dettaglio dei dati di popolazione utilizzati e per la risoluzione spaziale dei prodotti finali. La prima rappresentazione del Continuum urbano-rurale è stata realizzata spazializzando i dati di popolazione ISTAT 2018 di livello comunale e ha permesso di calibrare il modello sul territorio italiano e di ottenere una rappresentazione con risoluzione di 10 metri aggiornabile con frequenza annuale. Con la pubblicazione dei dati di popolazione ISTAT disaggregati rispetto alle sezioni censuarie è stato possibile produrre una seconda versione della mappa, ancora con risoluzione di 10 metri ma basata su informazioni più dettagliate circa la distribuzione spaziale della popolazione, riferita al 2011 e al 2021 e maggiormente in linea con le indicazioni fornite dai metadati degli SDG per la valutazione del target 11.3.1. Mentre le prime due rappresentazioni sono realizzate allo scopo di valorizzare al massimo il livello di dettaglio offerto dai dati di input e di fornire un utile strumento a supporto della definizione dei piani di ripristino previsti dalla NRR, è stata realizzata anche una terza rappresentazione, con risoluzione spaziale di 1km, in linea con quella proposta da Eurostat e coerente con le indicazioni della NRR in termini di individuazione delle aree da sottoporre agli obblighi di legge.

Nei paragrafi successivi vengono descritte le fasi per la realizzazione della carta nazionale delle aree urbane e per la valutazione degli indicatori. Le fasi metodologiche (a meno di alcune differenze, evidenziate di volta in volta) sono comuni sia alla versione della mappa basata su dati comunali che a quella riferita alle sezioni censuarie, ed è articolata come segue:

- 1- Creazione dello strato di popolazione spazializzata, basato su dati demografici ISTAT;

- 2- Produzione dello strato Continuum urbano-rurale a partire dalla combinazione di densità di superfici artificiali e densità di popolazione;
- 3- Applicazione della classificazione per la valutazione del target 11.3.1. e di indicatori ancillari;
- 4- Applicazione della classificazione per il monitoraggio degli obblighi di legge previsti dalla NRR

I risultati di questa ricerca sono stati pubblicati nei seguenti articoli scientifici, contributi e piattaforme digitali istituzionali, riportati di seguito in ordine cronologico:

- Cimini A, De Fioravante P, Riitano N, Dichicco P, Calò A, Scarascia Mugnozza G, Marchetti M, Munafò M. Land Consumption Dynamics and Urban–Rural Continuum Mapping in Italy for SDG 11.3.1 Indicator Assessment. Land. 2023; 12(1):155. <https://doi.org/10.3390/land12010155>
- Munafò, M. (a cura di), 2023. Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici. Edizione 2023. [Report SNPA 37/23](#).
- De Corso S., De Benedetti A.A., Di Leginio M., Munafò, M. (a cura di), 2023. Atlante dei dati ambientali. Edizione 2023. ISPRA. [ISBN 978-88-448-1154-9](#)
- De Corso S., De Benedetti A.A., Cimini A., De Fioravante P., d'Antona M., Di Leginio M., Finocchiaro G., Vaccaro L., Giunta M., Munafò, M. (a cura di), 2024. Atlante dei dati ambientali. Edizione 2024. ISPRA. [ISBN 978-88-448-1228-7](#)
- Munafò, M. (a cura di), 2024. Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici. Edizione 2023. Report SNPA 37/23.
- Fabbro S., Faraone C., Assennato F., Cimini A., Riitano N., / *territori provinciali italiani con caratteristiche ecopolitane*. In: *Postmetropoli e sistemi ecopolitani*, a cura di Sandro Fabbro. Roma: Carocci editore, 2024, pp. 91-100. ISBN 978-88-290-2771-2

- Munafò, M. (a cura di), 2024. [EcoAtl@nte. Viaggio nell'ambiente in Italia. Facile come leggere una storia.](#)
- Cimini, A., De Fioravante, P., Munafò, M. (2024), La Nature Restoration Regulation e il ripristino degli ecosistemi urbani. In Urbanistica Informazioni, 317, Anno LII, sett.-ott. 2024.
- Munafò, M., De Fioravante, P., Cimini, A., Riitano, N., d'Antona, M., Di Leginio, M., Marinosci, M., Assennato, F., Luise, A., Falconi, M., Vecchio, A., Jacomini, C., ISPRA Land and Soil Monitoring, mapping, and assessment activities. In Dazzi, C., Benedetti, A., Corti, G., & Costantini, E. A. (2024). *Soil Science in Italy: 1861 to 2024*. Springer Nature.

Di seguito vengono riportate alcune testate giornalistiche che hanno pubblicato articoli relativi al lavoro svolto:

- Talignani Giacomo, *Ispira e gli ecosistemi urbani da ripristinare: ecco la mappa*, "la Repubblica", 01/10/2024. [link](#)
- Federica Pacella, *Alberi, parchi e verde: il 40% delle città lombarde deve impegnarsi di più. Lo dice l'Europa*, "Il Giorno", 05/10/2024. [link](#)
- Davide Madeddu, *Entro il 2030 il 28% dei Comuni Italiani deve risanare le aree urbane degradate*, "Il sole 24 ore", 27/11/24. [link](#)

Il lavoro è stato presentato alla III edizione degli Stati generali per la salute del suolo che si è tenuta a Rimini in occasione della fiera ECOMONDO, curata dal Comitato Tecnico Scientifico Ecomondo & European Mission A Soil Deal for Europe, Re Soil Foundation, Coldiretti e dal Gruppo Coordinamento Nazionale per la Bioeconomia (GCNB). Inoltre, la mappatura trova applicazione anche nell'ambito delle attività di *ecosystem accounting* svolte a livello nazionale, per adempiere agli obblighi Comunitari di contabilità degli ecosistemi, secondo lo schema concettuale del System of Environmental Economic Accounts - Ecosystem Accounting¹⁰ (SEEA-EA), adottato anche dalle Nazioni Unite.

¹⁰ <https://seea.un.org/ecosystem-accounting>

2.2.1 Struttura e progettazione della griglia di popolazione nazionale

ISTAT fornisce annualmente informazioni sulla popolazione residente per l'intero territorio nazionale con massimo livello di approfondimento alla scala municipale (popolazione comunale totale), e ogni 10 anni, a partire dal 1991, rilascia dati a livello sub-comunale per sezioni di censimento. Secondo la metodologia EUROSTAT, in assenza di dati di censimento geo codificati o registri di popolazione, è possibile disaggregare le informazioni all'interno di una griglia regolare, combinando la più piccola unità di censimento disponibile con dati di uso e copertura del suolo (*European Commission, 2021a*).

La prima rappresentazione del Continuum urbano-rurale è stata realizzata per valutare la replicabilità della metodologia Eurostat in assenza di dati di popolazione di dettaglio sub-comunale aggiornati. In particolare, per ottenere una griglia di popolazione il più possibile accurata, è stata utilizzata la Carta nazionale del consumo di suolo dell'ISPRA integrata con le informazioni di uso del suolo derivabili dalle *Priority Area Monitoring* e dai prodotti di *Land Cover/Land Use Mapping* di Copernicus, disponibili con aggiornamento più recente al 2018 (è stato considerato il medesimo anno di riferimento anche per i dati comunali di popolazione). Questa integrazione, che ha portato alla produzione di un dato *raster* con risoluzione orizzontale di 10 metri, sebbene non sia specificata nella metodologia implementata dal JRC nel GHS-SMOD, è utile per discriminare le aree residenziali e non residenziali e, quindi, per distribuire la popolazione in modo più realistico all'interno dei territori comunali. In particolare, assumendo che la popolazione sia localizzata all'interno di edifici residenziali, sono stati considerati i pixel con codice 1 (suolo consumato), 11 (suolo consumato permanente) e 111 (Edifici, fabbricati) della Carta nazionale del consumo di suolo. La scelta di includere i pixel classificati al primo e al secondo livello (1 e 11) è dovuta alla disomogenea attribuzione dei codici al terzo livello di classificazione all'interno del territorio nazionale. Per la discriminazione delle aree residenziali è stata messa a punto una maschera basata sull'integrazione dei dati *Urban Atlas*, *Coastal Zone*, *Riparian Zone*, *Natura2000*, *CORINE Land Cover* ed *European*

Settlement Map (ESM), da cui sono stati estratti e mosaicati i poligoni afferenti alle classi di aree impermeabilizzate non residenziali come, ad esempio le aree industriali, commerciali e per servizi, porti, aeroporti, aree estrattive, aree verdi urbane e quelle dedicate allo sport e al tempo libero. Per ogni comune, il dato totale di popolazione è stato, quindi, distribuito uniforme sui pixel di edificato residenziale.

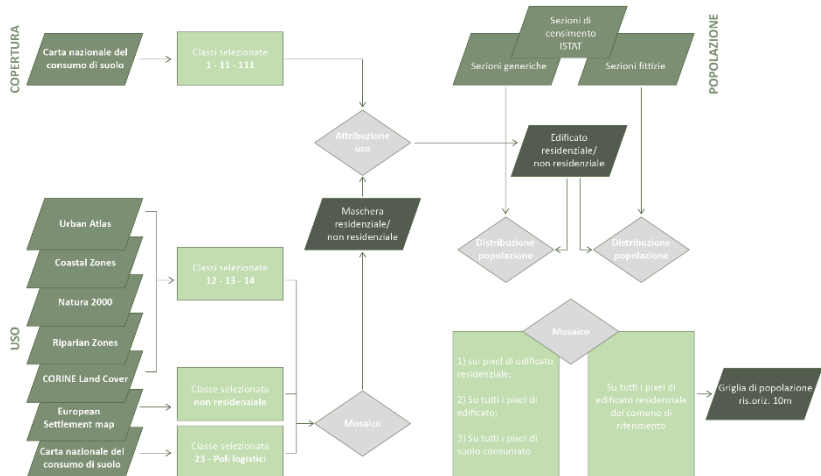


Figura 20 *Workflow* della metodologia utilizzata per produrre la griglia nazionale di popolazione a partire da dati di popolazione ISTAT a scala municipale

La medesima metodologia è stata implementata anche rispetto ai (più dettagliati) dati di popolazione aggregati rispetto alle sezioni di censimento e disponibili per gli anni 2011 e 2021¹¹. Anche in questo caso, è stata costruita la maschera delle aree residenziali 2012 e 2021 e applicata alle classi 1, 11 e 111 della Carta nazionale del consumo di suolo relativa allo stesso anno di monitoraggio. La maschera 2021 aggiunge alla mosaicatura dei dati Copernicus relativi al 2018 le aree destinate alla logistica, mappate tra il 2006 e il 2021 dalla Carta nazionale del consumo di suolo. Il dato di popolazione per sezione di

¹¹ A febbraio 2024 ISTAT ha rilasciato le variabili censuarie 2021 e le basi territoriali provvisorie. Le basi territoriali 2021 definitive sono state rilasciate a settembre 2024.

censimento è stato distribuito uniformemente sui pixel di edificato residenziale della carta nazionale del consumo di suolo 2012 (per il dato 2011) e 2021 (per il dato di popolazione 2021). In assenza di edifici residenziali, la popolazione è stata distribuita su tutti i pixel di edificato e, in assenza anche di questi, è stata considerata una distribuzione uniforme su tutti i pixel di suolo consumato della sezione. Nell'elenco delle sezioni di censimento sono presenti anche sezioni fittizie¹² nelle quali vengono censite il numero di persone “senza tetto” o “senza fissa dimora” iscritte in anagrafe e le zone contese tra due più comuni, in questo caso il dato di popolazione è stato distribuito su tutti i pixel residenziali del comune di riferimento (Figura 20).

Nel terzo esperimento si è fatto riferimento alla griglia Eurostat a 1km (a differenza dei due casi precedenti, in cui il prodotto finale aveva risoluzione di 10 metri), allo scopo di ottenere un dato perfettamente coerente con la metodologia DEGURBA, utilizzabile dalle amministrazioni per rispondere agli obblighi previsti dalle vigenti normative europee. In particolare, il *Toolkit* GHS-DEGURBA v2.7¹³ messo a punto dal *Joint Research Centre* (JRC) permette di implementare la metodologia DEGURBA utilizzando il proprio set di dati. Nel caso specifico è stato utilizzato il *tool* GHS- *Population Warping* v3.3 (POPWARP), che ha permesso di convertire e allineare la griglia *raster* di popolazione 2021 (nativamente a 10m) in un *raster* a 1km, preservando l'informazione sulla popolazione.

¹² Le sezioni fittizie sono indicate con i codici 888888X e 999999x. Il primo codice fa riferimento alle persone “senza tetto” e “senza fissa dimora” iscritte in anagrafe. Il secondo codice si riferisce a zone in contestazione e contese tra due o più comuni

¹³ È stata utilizzata la versione basata sulle funzionalità di MATLAB Runtime 9.9 che sfrutta l'interfaccia grafica di ArcGis Pro. Disponibile al seguente link: <https://human-settlement.emergency.copernicus.eu/tools.php>

2.2.2 Metodologia per la produzione della carta nazionale del Continuum urbano - rurale e del DEGURBA

La costruzione della mappa DEGURBA di Eurostat parte dal dato di popolazione spazializzato e prevede due fasi, a cui corrispondono la produzione di due cartografie: la prima cartografia, definita di “Livello 1”, classifica la griglia di popolazione in base alla combinazione di regole di contiguità tra celle, soglie di densità della popolazione e popolazione totale; la seconda, definita “Livello 2” classifica gli ambiti amministrativi comunali in base alla distribuzione della popolazione nelle classi individuate al Livello 1. Per la produzione del primo strato è necessario individuare celle della griglia contigue e omogenee in termini di densità di popolazione e numero di abitanti (o *patch*¹⁴), come riportato in Tabella 5 e descritto di seguito:

- **Centri urbani:** *patch* (celle contigue secondo la regola delle 4 vie) con una densità abitativa di almeno 1.500 abitanti per km² e una popolazione totale di almeno 50.000 abitanti;
- **Nuclei urbani densi:** *patch* (celle contigue secondo la regola delle 4 vie) con una densità abitativa di almeno 1.500 abitanti per km² e una popolazione totale compresa tra 5.000 e 50.000 abitanti;
- **Nuclei urbani semi-densi:** *patch* (celle contigue secondo la regola delle 8 vie) con una densità abitativa di almeno 300 abitanti per km² e una popolazione totale di almeno 5.000 abitanti;
- **Celle suburbane o periurbane:** celle residue (contigue secondo la regola delle 8 vie) che non sono parte di nuclei urbani ma sono contigue ad essi;
- **Nuclei rurali:** *patch* (celle contigue secondo la regola delle 8 vie) con una densità di popolazione di almeno 300 abitanti per

¹⁴ Si tratta di gruppi di pixel in cui ogni pixel confina sui 4 lati (regola delle 4 vie) o sui 4 lati e lungo le diagonali (regola delle 8 vie) con pixel della stessa classe.

km² e una popolazione complessiva compresa tra 500 e 4.999 abitanti

- **Rurale a bassa densità:** celle con una densità abitativa di almeno 50 abitanti per km² e non sono parte di un cluster rurale
- **Rurale a densità molto bassa:** celle con una densità abitativa inferiore a 50 abitanti per km².

Tabella 5. Sistema di classificazione della griglia di popolazione proposto da EUROSTAT e adottato come riferimento per la valutazione degli SDGs delle Nazioni Unite e degli obblighi di Legge della NRR.

		Popolazione totale [n° abitanti]			Esenti da criteri dimensionali
		≥ 50.000	5.000 – 50.000	500 – 5.000	
Densità popolazione. [ab/km ²]	≥ 1.500	Grandi centri urbani	Nuclei urbani densi		
	≥ 300		Nuclei urbani semi-densi	Centri rurali	Periurbano
	≥ 50				Rurale a bassa densità
	< 50				Rurale a densità molto bassa

Il Livello 2 classifica gli ambiti amministrativi comunali in base alla distribuzione della popolazione comunale nelle sette classi del DEGURBA. La disponibilità di questa mappa a livello nazionale è di particolare importanza nell’ambito dell’applicazione degli obiettivi sanciti nella NRR, poiché la legge prevede che gli Stati membri dell’UE individuino i comuni che, entro il 2030, devono azzerare la perdita di superfici vegetate e di copertura arborea (con riferimento all’intera area comunale o alla porzione classificata come ecosistema urbano secondo la definizione EUROSTAT). I comuni interessati sono quelli classificati come “centri urbani” e “agglomerati urbani” e, se ritenuto necessario, è possibile considerare anche quelli classificati come “periurbani o suburbani” secondo le regole di classificazione del DEGURBA descritte nella Tabella 6.

Tabella 6. Sistema di classificazione degli ambiti amministrativi comunali proposto da EUROSTAT e adottato come riferimento per la valutazione degli obblighi di Legge della NRR.

Classi DEGURBA	Regola 1	Regola 2
Centri urbani	50% Pop. in Centri urbani	-
Nuclei urbani densi	Pop. Nuclei urbani densi > Pop Nuclei urbani semi-densi	Pop. Nuclei urbani densi + Pop. Nuclei urbani semi-densi > Pop. Suburbano o periurbano
Nuclei urbani semi-densi	Pop. Nuclei urbani semi-densi > Pop. Nuclei urbani densi	Pop. Nuclei urbani densi + Pop. Nuclei urbani semi-densi > Pop. Suburbano o periurbano
Suburbano o periurbano	Pop. Suburbano o periurbano > Pop. Nuclei urbani densi + Pop. Nuclei urbani semi-densi	-
Nuclei rurali	Pop. Nuclei rurali > Pop. Rurale a bassa densità e Pop. Rurale a densità molto bassa	-
Rurale a bassa densità	Pop. Nuclei rurali a bassa densità > Pop. Rurale e Pop. Rurale a bassa densità	-
Rurale a densità molto bassa	Pop. Rurale a densità molto bassa > Pop. Rurale e Pop. rurale a bassa densità	-

Rispetto alla metodologia Eurostat, la griglia di popolazione realizzata per il 2018 e per i due intervalli censuari 2011 e 2021, ha una risoluzione spaziale di 10m (pari ad un'area del pixel di 100 m²); pertanto, per ogni pixel della griglia è stata considerata la densità di popolazione in un intorno di 1km² tramite statistiche focali¹⁵(Figura 21).

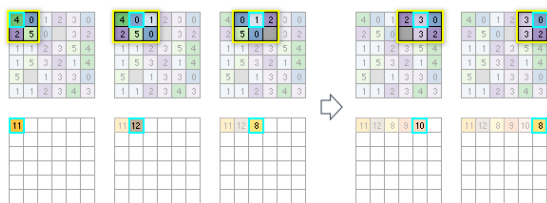


Figura 21. Diagramma del processo di calcolo utilizzato dall'algoritmo "statistiche focali" del software ArcGis Pro. Fonte: ESRI

¹⁵ Geoprocesso implementato su software ArcGis Pro che calcola per ogni cella (o pixel) di input una statistica dei valori all'interno di un intorno di analisi specificato. Nel caso specifico è stato utilizzato un intorno circolare di raggio pari a 600m, equivalente ad una superficie circolare di 1,13km².

Nel caso della griglia relativa al 2018, basata su dati di livello comunale, le soglie Eurostat sono state adattate al contesto italiano tramite *trial and error* per tenere conto dei limiti legati alla scala dei dati di input utilizzati per creare il *layer* della popolazione e assicurare un risultato il più possibile coerente con il GHS-SMOD. Le soglie di densità della popolazione utilizzate nel primo esperimento sono:

- Classe 1, con oltre 2.000 abitanti per km²;
- Classe 2, per ambiti territoriali con una densità di popolazione compresa tra 500 e 2.000 abitanti per km²;
- Classe 3, per ambiti territoriali con una densità di popolazione compresa tra 100 e 500 abitanti per km²;
- Classe 4, con meno di 100 abitanti per km².

Al secondo livello di approfondimento, la classe 1 è stata caratterizzata ulteriormente in base a soglie di valori relative al numero di abitanti totali (Figura 22), permettendo di discriminare:

- **Grandi centri urbani** con oltre 2.000 abitanti per km² e una popolazione residente superiore a 10.000 abitanti;
- **Cluster urbani densi**, con oltre 2.000 abitanti per km² e una popolazione residente inferiore a 10.000 abitanti.

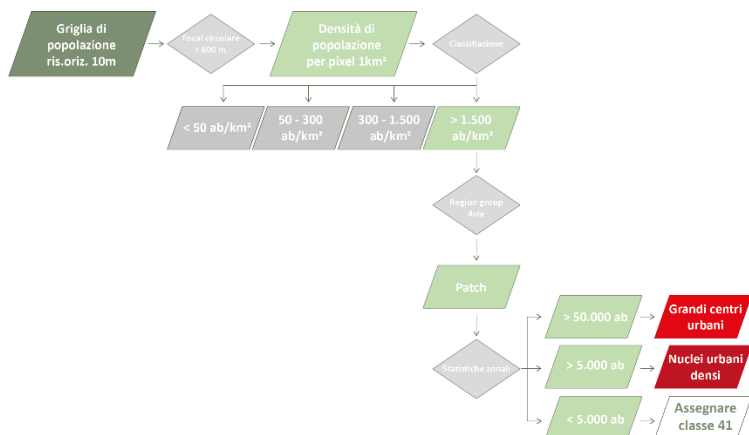


Figura 22. Prima parte del flusso di lavoro. Le soglie indicate sono quelle suggerite da EUROSTAT e utilizzate nel secondo esperimento.

La classe 2 è stata organizzata in due sottoclassi utilizzando un criterio di contiguità tra pixel (Figura 23):

- Rientrano nelle **aree suburbane** i pixel contigui alla classe 1 con una densità di popolazione compresa tra 500 e 2.000 abitanti per km²;
- **Cluster urbani semidensi** contigui alla classe 1 e presentano valori di densità di popolazione compresa tra 500 e 2.000 abitanti per km² e una popolazione complessiva superiore a 5.000 abitanti;
- **Cluster rurali** con una densità di popolazione compresa tra 500 e 2.000 abitanti per km² e la popolazione totale inferiore a 5.000 abitanti.

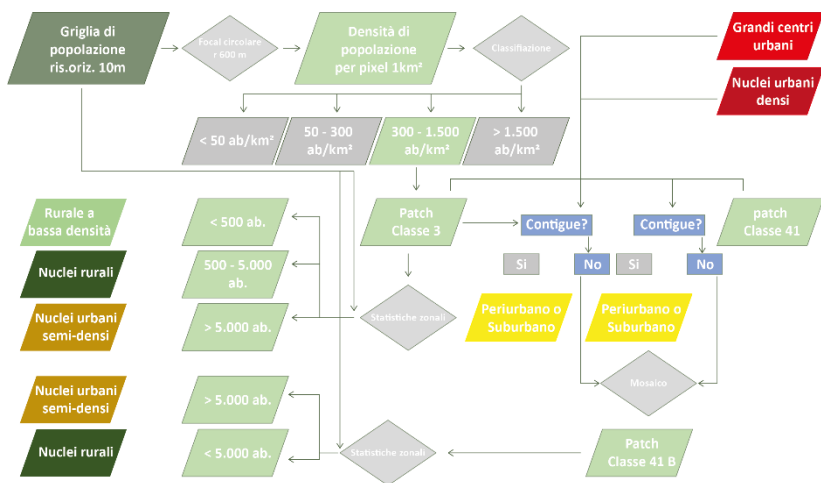


Figura 23. Seconda parte del flusso di lavoro. Le soglie indicate sono quelle suggerite da EUROSTAT e utilizzate nel secondo esperimento

La classe 4 non ha subito ulteriori approfondimenti, mentre le aree che non rientrano nelle classi precedenti sono state classificate come aree rurali a densità molto bassa. Rispetto alla classificazione Eurostat/JRC è stata introdotta una classe aggiuntiva utile a descrivere porzioni di territorio ad alta densità di superfici costruite e bassa densità di popolazione, riconducibili alla presenza di impianti produttivi,

commerciali e logistici. In particolare, è stata considerata una soglia di densità delle superfici artificiali non residenziale in un intorno di 1km² superiore al 50% (Figura 24).

La mappa che descrive gli ambiti amministrativi comunali in classi del Continuum urbano- rurale è stata ottenuta associando a ciascuna unità amministrativa la classe urbano-rurale prevalente (cioè, quella in cui si concentra la maggioranza della popolazione).

Tabella 7. Sistema di classificazione Eurostat/JRC e adattamento al contesto italiano. La revisione delle soglie tiene conto delle differenze tra i dati GHS-POP e i dati proposti, in termini di risoluzione spaziale e criteri di spazializzazione della popolazione.

Classe (I livello)	Classe (II livello)	Definizione	Soglie Eurostat/JRC			Soglie proposte		
			Den. SC [%]	Den. Pop. [ab/km ²]	Pop. [n° ab]	Den. SC [%]	Den. Pop. [ab/km ²]	Pop. [n° ab]
1	30	Grandi centri urbani	≥ 50	≥ 1500	≥ 50.000	≥ 50	≥ 2000	> 10.000
	23	Cluster urbani densi	≥ 50	≥ 1500	5.000 – 49.999	≥ 50	≥ 2000	≤ 10.000
	22	Cluster urbani semi-densi	10 - 50	300–1500	5.000 – 49.999	10 - 50	500–2000	> 5.000
2	21	Suburbano	10 - 50	300–1500	-	10 - 50	500–2000	-
	13	Cluster rurali	< 10	300–1500	500 – 4.999	< 10	500–2000	≤ 5.000
3	12	Rurale a bassa densità	< 10	50 - 300	-	< 10	100 - 500	-
4	11	Rurale a densità molto bassa	< 10	< 50	-	< 10	< 100	-
	50	Aree industriali, commerciali e per servizi	n/d	n/d	n/d	> 10	< 100	-
	60	Corpi idrici	0	0	0	0	0	0

Nel secondo esperimento il maggiore livello di dettaglio offerto dalle sezioni di censimento ha permesso di produrre una classificazione della griglia di popolazione e dei limiti amministrativi comunali utilizzando le soglie Eurostat senza necessità di adeguamenti. Anche in questo caso, è stata introdotta la classe “Aree industriali, commerciali e per servizi”

considerando oltre alla soglia di densità delle superfici artificiali anche un valore di densità di popolazione inferiore a 300 abitanti per km² (Figura 24).

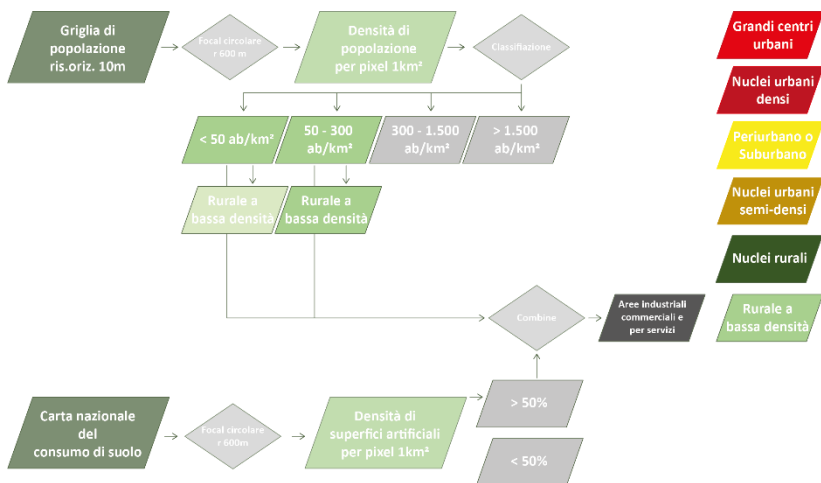


Figura 24. Terza parte del flusso di lavoro per introdurre la classe “Aree industriali, commerciali e per servizi”.

Il terzo esperimento è stato svolto utilizzando due *tools* del JRC per classificare la griglia di popolazione 2021 a 1km e i limiti amministrativi comunali. Nello specifico, si è fatto riferimento, rispettivamente, al *tool* GHS- *Degree of Urbanisation Grid* v6.4 (DUG) e al *tool* GHS- *Degree of Urbanisation – Territorial Units Classifier* v3.5 (DU-TUC).

I dati di input inseriti nel *tool* DUG per ottenere la griglia DEGURBA 2021 sono:

- il raster binario dell’edificato residenziale 2021 (al codice 1 corrispondono i pixel di edificato residenziale, con il codice 0 viene descritta la porzione residua del territorio nazionale);
- il raster binario relativo ai corpi idrici (descritti con il codice 1);
- la griglia di popolazione a 1km ottenuto con l’applicazione del *tool* “Population Warping”.

Per la classificazione dei limiti amministrativi, il tool GHS-DU-TUC prevede l'inserimento dei seguenti dati:

- la griglia “DEGURBA 2021”;
- i limiti amministrativi comunali 2021;
- la griglia di popolazione 2021 a 1km.

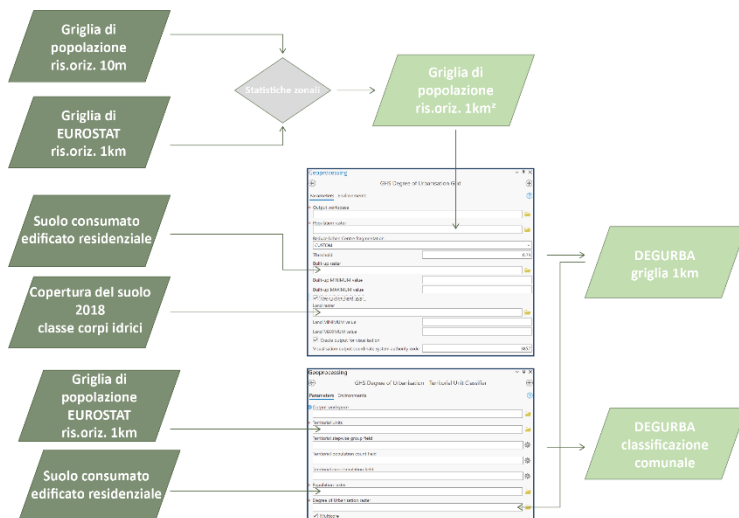


Figura 25. Dati di input implementati nei tool DUG e TUC del JRC per ottenere la griglia DEGURBA a 1km e la classificazione dei comuni in classi del DEGURBA richiesta nell'ambito della NRR.

2.2.2.1 Introduzione degli attributi di uso alla carta del suolo consumato

La disponibilità di informazioni aggiornate sull'uso del suolo, con particolare riferimento agli ambiti residenziali e non residenziali permette di spazializzare con maggiore precisione la popolazione, soprattutto in assenza di un dato di dettaglio sub-comunale. Nell'ambito delle attività di monitoraggio del consumo di suolo di ISPRA, questa ricerca ha contribuito all'introduzione, in via sperimentale, di un sistema di classificazione dell'uso del suolo delle nuove aree di suolo consumato che ha l'obiettivo di colmare questo limite ma anche di raccogliere informazioni dettagliate sulle trasformazioni in atto sul territorio nazionale, sfruttando le conoscenze degli attori locali e, in particolare, della rete SNPA. A tale scopo è stato definito un sistema di classificazione (Tabella 8) a due livelli di approfondimento, in linea con le indicazioni fornite in ambito europeo dall'EIONET *Action Group on Land monitoring in Europe* (EAGLE).

Tabella 8. Sistema di classificazione dell'uso del suolo

1	Residenziale
2	Non residenziale
2.1	Attività produttive (industrie manifatturiere)
2.2	Attività commerciali
2.3	Poli logistici
2.4	Servizi (servizi alla comunità, ospedali, luoghi di culto. Scuole, caserme, strutture sportive)
2.5	Produzione di energia da fonti rinnovabili (fotovoltaico, eolico, altro)
2.6	Settore primario (agricoltura, aree estrattive)
2.7	Utility (elettrodotti, depuratori, casse di espansione, discariche)
2.8	Altri usi (Aree di transizione e cantieri)
3	Infrastrutture (strade, parcheggi, distributori, ferrovie, aeroporti, porti)

In particolare, le classi adottate per la descrizione dell'uso afferiscono agli "attributi di uso del suolo della matrice EAGLE e sono state selezionate in accordo con la rete SNPA in base alla capacità di discriminare gli usi a partire da immagini satellitari, da informazioni deducibili dai principali strumenti Google e dalle conoscenze locali. Le classi di uso sono state attribuite esclusivamente ai poligoni di nuovo

consumo di suolo o a quelli riferiti ad aree già artificializzate (descritte con il codice 12*) e soggette a processi di impermeabilizzazione (descritte con il codice 11*).

2.2.2.2 Sperimentazione dell'approccio partecipato alla mappatura del consumo di suolo

Una delle attività svolte nell'ambito dell'approfondimento delle dinamiche del consumo di suolo, ha riguardato la definizione e lo sviluppo di un'iniziativa sperimentale per la condivisione dei dati preliminari derivanti dall'attività di monitoraggio, allo scopo di rendere il processo sempre più efficace e partecipato incentivando il confronto con i principali *stakeholder* istituzionali e consentendo di raccogliere informazioni di maggiore dettaglio sui cambiamenti in atto. A tale scopo nel 2023 è stato promosso il lancio di un'applicazione web, inizialmente riservata ai soli operatori di Comuni e Osservatori delle Regioni e Province autonome, che permette l'accesso e la consultazione della cartografia preliminare del consumo di suolo. La piattaforma è stata concepita nell'ottica di soddisfare tre requisiti base: consentire la visualizzazione dei dati cartografici, la gestione degli utenti e la raccolta di informazioni tramite interazione con la cartografia digitale.

Per dati cartografici si intendono i poligoni di cambiamento mappati per ogni anno di monitoraggio e le *basemap* ottenute tramite mosaicatura di immagini Sentinel-2 in grado di mostrare le variazioni di copertura del suolo. A tale scopo sono stati utilizzati gli strumenti PostGIS¹⁶ per la gestione dei dati spaziali, PHP Maker¹⁷ per l'interazione con il database e Leaflet¹⁸ per una visualizzazione interattiva e dinamica dei dati geografici (Figura 26).

¹⁶È una estensione di PostgreSQL che consente di memorizzare, interrogare e manipolare dati spaziali.

¹⁷È uno strumento di automazione per generare script che fungono da interfaccia tra il front-end e il database. Permette di manipolare i dati di un database PostgreSQL e gestire l'editing delle informazioni.

¹⁸È una libreria JavaScript open-source per la creazione di mappe interattive.

Rappresentare e monitorare il paesaggio urbano...



Figura 26. Struttura *Back-end* dell'applicativo Web-GIS per la verifica dei dati preliminari del consumo di suolo

La divulgazione dell'iniziativa è avvenuta tramite comunicazioni e-mail ai referenti degli Osservatori Regionali e Provinciali, sul sito web dell'ISPRA e dell'Associazione Nazionale Comuni Italiani (ANCI). Per l'accesso alla piattaforma è stato messo a punto un modulo di registrazione con l'inserimento obbligatorio di una mail istituzionale utile all'ISPRA per verificare l'appartenenza dell'utente ad un ente di governo del territorio o ad un'Agenzia della rete SNPA. La predisposizione dell'indirizzo mail datipreliminari@isprambiente.it ha permesso di controllare gli accessi e interagire con gli utenti. A seconda del tipo di organizzazione (comune, ARPA, APPA o regione), del livello amministrativo e della località selezionata, gli utenti hanno la possibilità di accedere alle informazioni cartografiche del territorio scelto in fase di registrazione e di interagire con la tabella attributi dello *shapefile* dei cambiamenti di copertura del suolo, inserendo commenti tramite il modulo dedicato. In questo senso, la tabella attributi è stata organizzata con i seguenti campi:

- Il codice identificativo univoco del poligono di cambiamento;
- Gli identificativi del livello amministrativo (comune, provincia e regione);

- Classe del cambiamento secondo il sistema di classificazione ISPRA;
- Tre campi testuali dedicati ai commenti di Comuni, Regioni, ARPA/APPA e alle controdeduzioni di ISPRA.

Ciascun cambiamento di nuovo consumo di suolo è descritto da una riga in tabella attributi e, in mappa, da un poligono e da un marker progettato per consentire una più agevole individuazione delle trasformazioni mappate e dei commenti inseriti. A seconda dell'ente, ovvero in base alla compilazione del campo in tabella attributi da parte dell'operatore, gli spicchi del marker assumevano una specifica colorazione:

- **Rosso:** il commento viene inserito da un rappresentante del comune, si colorerà di rosso il settore in alto a destra;
- **Blu:** il commento viene inserito dalle agenzie regionali (ARPA) o delle province autonome (APPA), si colorerà di blu il settore in basso a destra;
- **Giallo:** il commento viene inserito da un rappresentante dell'osservatorio regionale, si colorerà di giallo il settore in basso a sinistra;
- **Verde:** il commento viene inserito da un rappresentante dell'ISPRA, si colorerà di verde il settore in alto a sinistra.

qualora tutti i quattro soggetti inseriscano commenti, tutti i settori del marker risulterebbero colorati.

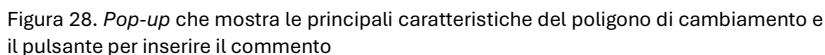
È stata prevista anche la possibilità di inserire un marker, cliccando sulla mappa, qualora l'utente voglia segnalare la presenza di cambiamenti di consumo di suolo omessi nel monitoraggio e di scaricare lo shapefile in locale per permettere la consultazione del dato su una piattaforma GIS esterna. Per consentire l'utilizzo della piattaforma web-gis anche ad utenti meno esperti è stata predisposta una guida all'utilizzo, consultabile una volta avuto l'accesso.

La Figura 27 mostra la struttura della schermata principale dell'applicazione, attraverso la quale gli utenti possono ispezionare i

cambiamenti avvenuti sulla relativa area di interesse e inserire eventuali commenti;



La Figura 28 e la Figura 29 mostrano l'interazione con i dati per aggiungere commenti



Rappresentare e monitorare il paesaggio urbano...

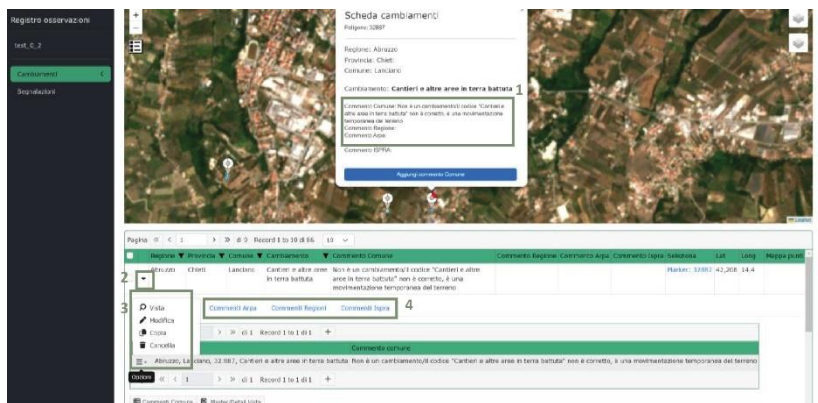


Figura 29. I commenti appena inseriti sono visibili nel *pop-up* del poligono (1), insieme a eventuali ulteriori commenti inseriti da altri soggetti coinvolti nel monitoraggio. È possibile interagire con i commenti dalla tabella attributi (2), in particolare si dispone delle opzioni di modifica, copia ed eliminazione. I commenti di altri soggetti sono visualizzati anche in tabella attributi (4).

La Figura 30 mostra l'interazione con la mappa per aggiungere cambiamenti.

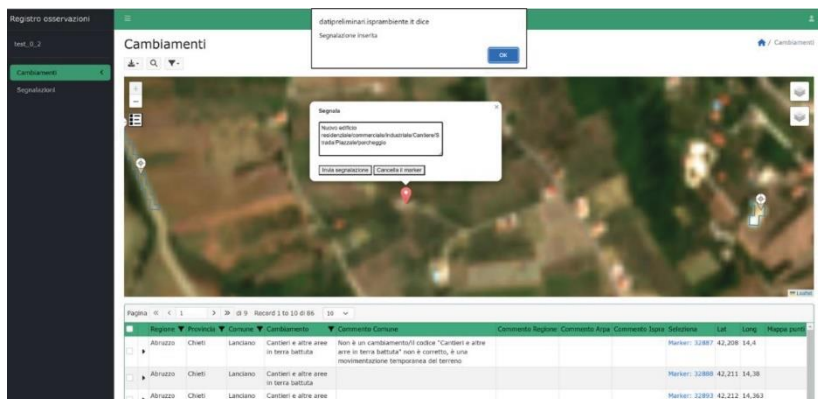


Figura 30. Finestra *pop-up* per la segnalazione di un cambiamento erroneamente omissso dal monitoraggio ISPRA-SNPA

2.2.3 SDG 11.3.1 “Ratio of Land Consumption Rate to Population Growth Rate”

La rappresentazione del Continuum urbano-rurale trova applicazione nella valutazione di alcuni target dell’SDG 11 “Rendere le città e gli insediamenti umani inclusivi, sicuri, resilienti e sostenibili”, tra i quali l’11.3.1 “Rapporto tra tasso di consumo di suolo e tasso di crescita della popolazione” (*Ratio of Land Consumption Rate to Population Growth Rate* - RLCRPGR). L’indicatore misura l’efficienza nell’uso del suolo all’interno dei contesti densamente urbanizzati e popolati, mettendo in relazione l’espansione urbana e la crescita demografica (*United Nations Human Settlements Programme, 2021*). Nel dettaglio, è definito come il rapporto tra il tasso di consumo di suolo (*Land Consumption Rate* - LCR) e il tasso di crescita della popolazione (*Population Growth Rate* - PGR):

$$RLCRPGR = \frac{LCR}{PGR} = \frac{\left[\frac{(CL_{t+n} - CL_t)}{CL_t} \right]}{\left[\frac{\ln \left(\frac{Pop_{t+n}}{Pop_t} \right)}{y} \right]}$$

Dove:

CL_t = Estensione totale della superficie consumata per il primo anno.

CL_{t+n} = Estensione totale della superficie consumata nell'ultimo anno.

T = Numero di anni tra i due intervalli di monitoraggio.

Pop_t = Popolazione totale nel primo anno.

Pop_{t+n} = Popolazione totale nell'ultimo anno.

y = Numero di anni tra i due intervalli di monitoraggio.

Il sistema di classificazione sviluppato dall’*Inter-Agency and Expert Group on SDGs* (IAEG-SDGs) per comprendere lo sviluppo metodologico e la disponibilità di dati a livello globale, ha classificato l’indicatore nel livello II, ciò significa che è concettualmente chiaro ed esiste una metodologia consolidata per la valutazione ma, per molti

paesi, i dati necessari non sono disponibili. I metadati dell'indicatore SDG 11.3.1 suggeriscono di calcolare il "Rapporto tra tasso di consumo di suolo e tasso di crescita della popolazione" considerando come area di riferimento quella afferente alle classi "grandi centri urbani", "Nuclei urbani densi" e "Nuclei urbani semi-densi" ottenute applicando la metodologia DEGURBA per la classificazione della griglia di popolazione. La valutazione richiede una conoscenza approfondita della distribuzione e della variazione spaziale del suolo consumato e della popolazione all'interno di queste aree, al fine di poter valutare con precisione la variazione delle due grandezze all'interno dell'area urbana di riferimento. Tuttavia, mentre per il consumo di suolo (Land Consumption Rate - LCR) la carta prodotta dall'ISPRA fornisce informazioni spazializzate e aggiornate annualmente, consentendo di individuare i cambiamenti in ogni classe del Continuum urbano-rurale, per i dati demografici (Population Growth Rate - PGR) la disponibilità di informazioni dettagliate e aggiornate è strettamente dipendente dalla frequenza di aggiornamento dei dati ISTAT, in particolare quelli a livello di sezioni di censimento. In questo senso sono state condotte due sperimentazioni nella valutazione dell'indicatore 11.3.1: la prima a partire dalla mappa del Continuum urbano-rurale 2018, la seconda sfruttando la carta 2012 e le griglie di popolazione 2011 e 2021. Per la prima sperimentazione non erano ancora disponibili informazioni utili a caratterizzare spazialmente in quali aree del comune si verificano variazioni demografiche (ad esempio, quanti abitanti di un comune vivono nel suo centro urbano o le migrazioni dalle aree urbane a quelle periurbane/suburbano o rurale e viceversa); pertanto, il calcolo è stato effettuato con riferimento alla mappa 2018 che caratterizza gli ambiti amministrativi comunali in classi del Continuum urbano-rurale. L'indicatore è stato quindi valutato per il periodo 2012-2018 sui comuni classificati come "Grande centro urbano", "Cluster Urbano Denso" e "Cluster Urbano Semidenso", valutando la variazione di popolazione comunale registrata tra il 2012 e il 2018 e la variazione di suolo consumato per gli stessi anni nel comune.

Per fornire informazioni di maggiore dettaglio sull'evoluzione delle aree urbanizzate all'interno del territorio comunale, sono stati introdotti tre

nuovi indicatori che valutano la distribuzione del consumo di suolo con riferimento alle classi urbane (1) suburbane/periurbane (2) e rurali (3) e che prendono il nome di “*Normalized Difference of Consumed Land*” (NDCL).

$$NDCL_u = \frac{CS_{area\ urbana} - (CS_{area\ rurale} + CS_{area\ suburbana})}{CS_{tot}} \quad (1)$$

$$NDCL_s = \frac{CS_{area\ suburbana} - (CS_{area\ rurale} + CS_{area\ urbana})}{CS_{tot}} \quad (2)$$

$$NDCL_r = \frac{CS_{area\ rurale} - (CS_{area\ urbana} + CS_{area\ suburbana})}{CS_{tot}} \quad (3)$$

Gli indicatori sono stati calcolati per gli stessi comuni urbani considerati per l'SDG 11.3.1. Il calcolo si è basato sulla Carta nazionale del consumo di suolo dell'ISPRA per i due anni di riferimento e l'interpretazione dei tre indicatori consente di descrivere la distribuzione spaziale del consumo di suolo nei comuni urbani (Figura 31). Ciascuno dei tre indicatori valuta la quota di consumo di suolo che interessa ciascuna delle tre classi (urbana, suburbana/periurbana e rurale) e quella che assume il valore più elevato rappresenta l'andamento prevalente di quel comune, in termini di:

- **Urban Infill**, il consumo di suolo interessa prevalentemente le aree urbane, occupando i residui di naturalità all'interno del tessuto urbano esistente.
- **Periurban Infill** se il consumo di suolo è concentrato nelle aree periurbane ai margini del tessuto urbano denso.
- **Dispersion**, indica il consumo di suolo a bassa densità nelle aree rurali.

Nella seconda sperimentazione, la disponibilità di informazioni sub-comunali sulla distribuzione della popolazione per i due intervalli censuari ha permesso, per la prima volta in Italia, di misurare l'indicatore su un ciclo di dieci anni come raccomandato dalle linee guida dell'SDG. In dettaglio, è stata utilizzata come *baseline* la carta del Continuum urbano-rurale 2012, ottenuta tramite classificazione della griglia di

popolazione 2011, con l'obiettivo di individuare le dinamiche di trasformazione che hanno interessato le aree urbane in Italia nei successivi 10 anni. Per la valutazione del tasso di incremento del suolo consumato (LCR) si è fatto riferimento alla Carta nazionale del consumo di suolo relativa al 2012 e al 2021 e per il tasso di variazione della popolazione (PGR) sono state utilizzate le griglie di popolazione 2011 e 2021 realizzate sulla base dei dati di popolazione sub-comunale di ISTAT. Come da metadata, l'analisi è stata condotta con riferimento alle classi "Grandi centri urbani", "Nuclei urbani densi" e "Nuclei urbani semi-densi".

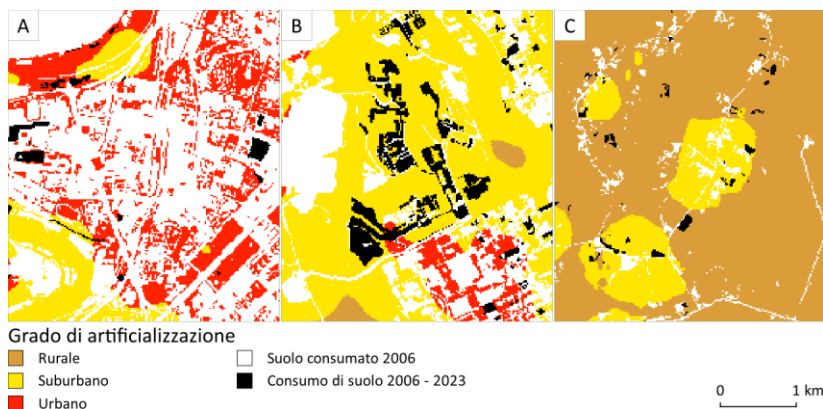


Figura 31. Esempi di riempimento del tessuto urbano consolidato (A), di densificazione delle aree periurbane (B) e di dispersione insediativa nelle aree rurali (C).

L'interpretazione dei valori assunti dall'indicatore è complessa e richiede l'osservazione accurata del segno dei due termini LCR e PGR. Se sono entrambi positivi (aumento del consumo di suolo e della popolazione) o negativi (diminuzione del consumo di suolo e della popolazione), l'indicatore assume valori positivi; altrimenti è negativo. Tuttavia, lo stesso valore di RLCRPGR può rappresentare dinamiche diverse (ad esempio, un valore di RLCRPGR negativo può derivare da un aumento di PGR e da una diminuzione di LCR o da un aumento dell'LCR e una diminuzione del PGR). In Tabella 9 sono riassunte le possibili combinazioni dei termini LCR e PGR con riferimento ai soli casi in cui il consumo di suolo aumenta o resta stabile. I casi nei quali si verifica una

complessiva diminuzione di suolo consumato nel periodo considerato risultano limitati e assimilabili prevalentemente a rinaturalizzazioni di aree di manovra e stoccaggio di materiali circostanti i cantieri di nuovi edifici, strade e infrastrutture, come nell'esempio di Figura 32, e non a veri e propri interventi di rigenerazione urbana che andrebbero valutati singolarmente.

Figura 32. L'immagine mostra un'area di cantiere stradale (terreno consumato reversibile) a Novara tra il 2012 (a sinistra) e il 2018 (a destra), ripristinata dopo il completamento della strada.



Tabella 9. Interpretazione del RLCRPGR basata sui valori dei due termini LCR (tasso di consumo di suolo) e PGR (tasso di crescita della popolazione), assumendo il consumo di suolo in crescita.

LCR	PGR	RLCRPGR	Descrizione
↑	↑↑	0 - 1	La popolazione aumenta di più (↑↑) del consumo di suolo (↑)
↑↑	↑	> 1	Il consumo di suolo aumenta di più (↑↑) della popolazione (↑)
↑	↓↓	-1 - 0	La popolazione diminuisce di più (↓↓) rispetto a quanto aumenta il consumo di suolo (↑)
↑↑	↓	< -1	Il consumo di suolo aumenta di più (↑↑) rispetto a quanto diminuisce la popolazione (↓)

2.2.4 Gli obiettivi del *Nature Restoration Regulation*

Ai sensi dell'articolo 3 del NRR, si prevede il monitoraggio delle dinamiche di artificializzazione o impermeabilizzazione del suolo che riducono la disponibilità di aree vegetate e di copertura arborea all'interno degli ecosistemi urbani, con riferimento ai comuni classificati dal DEGURBA come "Grandi centri urbani", "Nuclei urbani densi", "Nuclei urbani semi-densi" e, se ritenuto necessario, quelli "suburbani o periurbani". Le mappe del continuum urbano rurale presentate nei paragrafi precedenti consentono di determinare i comuni soggetti ai suddetti obblighi di legge e, al loro interno, di delimitare l'area urbana rispetto alla quale verificare la disponibilità di aree vegetate e arborate e definire gli ambiti da sottoporre a interventi di ripristino.

Lo studio offre una descrizione della composizione degli ecosistemi urbani italiani sfruttando le informazioni derivabili dal dato di copertura del suolo CORINE *Land Cover Plus Backbone* (coerentemente con le indicazioni di legge, che suggerisce l'uso di dati nazionali o, se non disponibili, dei servizi Copernicus), relativamente alle componenti naturali, e la Carta nazionale del consumo di suolo di ISPRA per le aree artificializzate. Entrambi i dati, in formato *raster* con risoluzione 10m, sono stati utilizzati con riferimento al 2021. Per ogni comune è stata valutata la quota di superfici artificiali (classe Impermeabilizzato), copertura arborea (con riferimento alle classi di vegetazione legnosa di conifere, vegetazione legnosa di latifoglie caducifoglie e sempreverdi) e superfici vegetate (considerando oltre alla vegetazione arborea anche gli arbusti, l'erba permanente e periodico) all'interno degli ecosistemi urbani. Inoltre, per simulare il monitoraggio dello stato di attuazione degli obblighi previsti dalla Legge (a partire dal 2024), per le stesse aree è stato valutato il consumo di suolo registrato tra il 2021 e il 2023.

2.3 ...e il paesaggio forestale

Le iniziative di forestazione urbana ed extraurbana hanno l'obiettivo di garantire benefici paesaggistici ed ambientali attraverso la realizzazione di nuovi spazi verdi o la modificazione di quelli esistenti. Questi benefici sono strettamente dipendenti dalle caratteristiche degli impianti, in termini di tipologia di copertura arborea, estensione, distribuzione e configurazione spaziale che assumono all'interno del paesaggio. Tutti elementi che impongono un approfondimento. Tra questi, si sottolinea il ruolo multifunzionale e strategico degli Alberi Fuori Foresta (AFF) all'interno del mosaico paesaggistico. La caratterizzazione quantitativa e qualitativa degli AFF è un aspetto cruciale nella progettazione delle aree verdi urbane perché ne valorizza il ruolo e consente la quantificazione del contributo in termini di servizi ecosistemici erogati ai fini di una gestione territoriale integrata e sostenibile. Tuttavia, la dimensione e la distribuzione spaziale di questi elementi nel mosaico paesaggistico rendono complesso il rilevamento. Lo studio presentato in questo capitolo è stato condotto in collaborazione con ISPRA e il Dipartimento per l'Innovazione nei sistemi Biologici, Agroalimentari e Forestali (DIBAF) dell'Università degli studi della Tuscia. Viene proposto l'aggiornamento della carta forestale su base tipologica della regione Lazio e la produzione di nuovi strati cartografici coerenti dal punto di vista geometrico, quindi comparabili e integrabili tra loro, utili a restituire un quadro informativo completo sulle caratteristiche strutturali e tipologiche della copertura arborea ed arbustiva nella Città Metropolitana di Roma Capitale (CMRC). In particolare, è stata sperimentata una metodologia basata su strumenti GIS di analisi spaziale che integra le informazioni derivabili dalla cartografia tematica regionale con dati di copertura del suolo della componente *Land* di Copernicus e mappe di uso del suolo prodotte da ISPRA per il territorio nazionale. L'obiettivo del lavoro è di restituire una cartografia tematica aggiornabile e scalabile a tutto il territorio regionale con bassi costi di produzione, in grado di assicurare un maggiore dettaglio sia temporale che spaziale.

Nei paragrafi successivi viene descritta la metodologia messa a punto per:

1. aggiornare la carta forestale su base tipologica della regione Lazio;
2. restituire uno strato informativo di densità della copertura arborea;
3. produrre una mappa in grado di mappare Boschi e AFF lungo il gradiente urbano-rurale.

Gli strumenti tecnici e metodologici sviluppati per la conduzione di questa attività hanno trovato applicazione anche nelle attività di mappatura degli ecosistemi svolte a livello nazionale in conformità con lo schema SEEA-EA.

2.3.1 Le categorie e le tipologie forestali

La carta forestale su base tipologica della regione Lazio è l'unico strato informativo attualmente disponibile per caratterizzare la copertura forestale regionale con elevato dettaglio tematico. L'aggiornamento e il miglioramento geometrico di questo strato richiede innanzitutto la disponibilità di una carta di copertura del suolo attuale e di elevato dettaglio spaziale. In questo senso, è stato scelto il CLC *Plus Backbone* relativo al 2018 e, in formato raster, come riferimento geometrico per l'individuazione delle aree con copertura arborea e arbustiva. In particolare, per la componente arborea si è fatto riferimento alle classi di conifere (*needle leaved trees*), latifoglie sempreverdi (*Broadleaved evergreen trees*) e latifoglie caducifoglie (*Broadleaved deciduous trees*), mentre per la componente arbustiva sono stati selezionati i pixel della classe "*Low-growing woody plants*". Per aumentare il dettaglio della descrizione dell'abiotico artificiale è stata introdotta la mappa del suolo consumato di ISPRA, sovrapponendola alla classe "Sealed" del CLC *Plus Backbone* e attribuendo ai pixel residuali la classe "altre aree aperte".

La copertura arborea del CLC *Plus Backbone* è stata inizialmente assegnata a tre macroclassi in base al contesto paesaggistico: urbano, agricolo o naturale. Questa operazione è stata svolta tramite *Overlay Analysis* con la carta di uso del suolo di ISPRA, ottenuta tramite integrazione di dati nazionali e dati Copernicus. La copertura arborea in ambito urbano è stata individuata a partire dalle classi "uso urbano e aree assimilate", mentre per quella in area agricola si è fatto riferimento alle cinque sottoclassi riconducibili alla classe al primo livello di "Uso agricolo". I pixel di albero che non rientravano in queste due macroclassi sono stati classificati come naturali.

Al secondo livello tematico è stata introdotta la classe Oliveti nella "copertura arborea in ambito agricolo", valorizzando il contenuto informativo offerto dalla carta di uso del suolo di ISPRA, mentre per la "copertura arborea in ambito naturale" sono state introdotte le 17 categorie forestali della carta forestale regionale. Tale operazione è stata svolta, tramite sovrapposizione dei due strati cartografici, mentre per i

pixel in corrispondenza dei quali non erano presenti le geometrie della carta forestale regionale, la categoria è stata attribuita per prossimità tramite lo strumento “*Euclidean allocation*” di ArcGis Pro (Figura 33). Questa tecnica è stata ampiamente utilizzata in letteratura per produrre previsioni spazialmente contigue di attributi forestali.

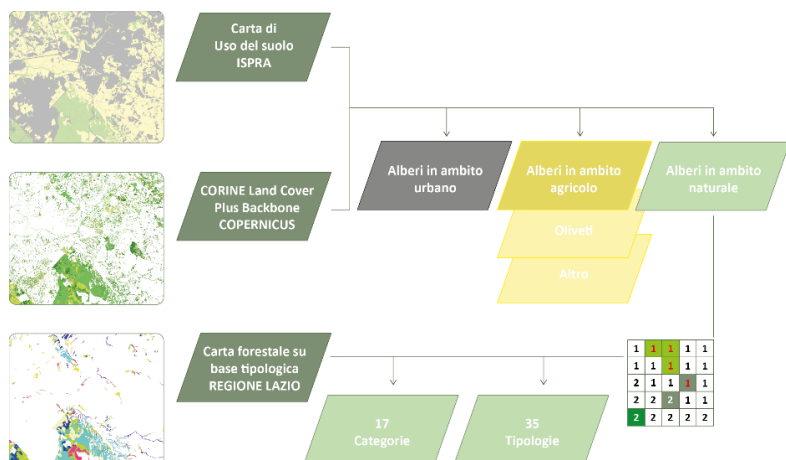


Figura 33. Flusso di lavoro per l’aggiornamento della Carta forestale su base tipologica della Regione Lazio

La stessa procedura è stata applicata anche per l’aggiornamento spaziale e tematico della vegetazione arbustiva.

2.3.2 La densità della copertura arborea

Il primo dato ausiliario prodotto nell’ambito dell’aggiornamento della carta forestale su base tipologica della regione Lazio per la CMRC ha l’obiettivo di restituire un’informazione sulla densità media della copertura arborea. Per la produzione della carta è stato utilizzato lo strato *Tree Cover Density* (TCD) 2018 di Copernicus. La coerenza geometrica tra la carta TCD e il CLC *Plus Backbone* ha permesso di associare a ciascun pixel di copertura arborea del CLC *Plus Backbone* il valore di densità fornito dal TCD. Successivamente, al fine di tradurre il dato fornito dal TCD per singolo pixel in un’informazione che tiene conto del contesto, è stata valutata la densità media di copertura arborea in un

intorno di 300 metri, tramite statistiche focali. Il risultato dell'analisi ha permesso di restituire una mappa in grado di descrivere la copertura arborea della CMRC secondo tre classi di densità: bassa (inferiore al 10%), media (compresa tra il 10% e il 50%) e alta (maggiore del 50%) (Figura 34).

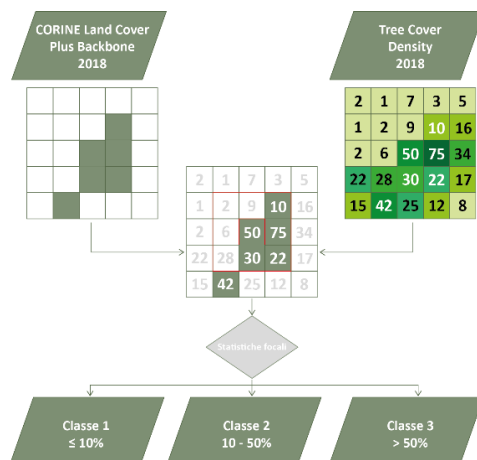


Figura 34. Workflow della metodologia utilizzata per derivare una mappa di densità media della copertura arborea

2.3.3 I boschi e gli alberi fuori foresta

Il secondo dato ausiliario propone una mappatura dei boschi e degli Alberi Fuori Foresta (AFF) per la CMRC spazialmente esplicita che utilizza i pixel di albero estratti dal CLC *Plus Backbone* e la definizione di bosco adottata dal TUFF. Le formazioni boschive e gli AFF sono stati discriminati, anche in questo caso, in funzione del contesto paesaggistico di riferimento in: agricolo, urbano e naturale utilizzando la carta di uso del suolo di ISPRA.

Per l'individuazione delle patch di bosco sono state utilizzate tecniche GIS di analisi spaziale che combinano regole di contiguità tra celle, soglie di superficie e soglie di densità della copertura arborea. Una patch descrive un gruppo di pixel appartenenti alla stessa classe in cui ogni pixel soddisfa una determinata regola di connettività. Nel caso

specifico è stata scelta la regola di connettività a otto vie, per cui ogni regione (o patch) è composta da pixel che confinano sui quattro lati e lungo la diagonale con celle (o pixel) della stessa classe. Successivamente, per ogni patch sono stati applicati i seguenti filtri dimensionali:

- superficie di almeno 2.000 m²;
- larghezza di almeno 20 m;
- densità media di copertura arborea maggiore del 20%.

La soglia relativa alla densità è stata valutata a partire dallo strato TCD di Copernicus. Le patch che non soddisfano i requisiti della categoria bosco sono state classificate come AFF.

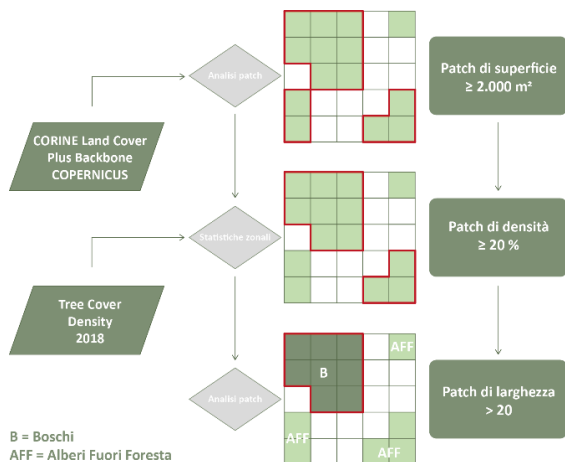


Figura 35. Flusso di lavoro per discriminare i Boschi dagli Alberi Fuori Foresta.

La caratterizzazione dei boschi e degli AFF in termini di contesto paesaggistico ha seguito le medesime regole descritte nel paragrafo 3.3.1 per l'assegnazione della copertura arborea alle tre macroclassi: urbano, agricolo e naturale (Figura 35).

2.4 Foreste urbane e comfort climatico: strumenti e approcci multi-scalari per l'analisi dell'isola di calore

L'utilizzo di dati telerilevati per l'analisi della temperatura superficiale al suolo (LST) garantisce significativi vantaggi per la ricerca in questo ambito, offrendo una rappresentazione globale e dettagliata dei modelli di temperatura e consentendo il confronto tra diversi ambiti territoriali con un livello di risoluzione e una continuità spaziale che non sarebbe possibile ottenere dai soli dati provenienti dalle stazioni meteorologiche, anche a causa della loro distribuzione disomogenea e spesso carente sul territorio nazionale (*Marando et al., 2019*).

Questo studio applica metodologie consolidate in studi precedenti per esplorare le caratteristiche climatiche del territorio nazionale rispetto ai paesaggi urbani, approfondendo il ruolo della componente arborea nella mitigazione delle temperature estreme che si registrano, in particolare, durante il periodo estivo (*Morabito et al., 2021*).

A tale scopo è stata sfruttata la disponibilità di immagini satellitari *Open-Source* con risoluzioni spaziali e temporali sempre maggiori unitamente a infrastrutture di calcolo *cloud-based* come Google Earth Engine (GEE). Queste ultime rappresentano un punto di forza per la produzione di strumenti aggiornabili e replicabili con bassi di costi di realizzazione, fruibili dalla comunità e dai *policy makers* per intraprendere azioni efficaci orientate al miglioramento del microclima intra-urbano e a ripensare i programmi di sviluppo delle città.

In questo capitolo vengono descritti i materiali e i metodi utilizzati per la conduzione di tre attività principali:

1. mettere a punto una mappa di LST a scala nazionale con un dettaglio spaziale maggiore rispetto alle cartografie attualmente disponibili, a partire da immagini *Open Source* acquisite dalle principali missioni satellitari Landsat.
2. Valutare il fenomeno *Surface Urban Heat Island* (SUHI) esplorando gli effetti che diverse composizioni del paesaggio hanno sul comportamento termico superficiale, correlando l'informazione anche con la presenza di popolazione;

3. individuare le aree prioritarie per interventi di forestazione nel comune di Roma.

La mappatura e le analisi sono state svolte con riferimento alla stagione estiva (da giugno ad agosto), durante la quale il fenomeno SUHI è più pronunciato. Questo studio si inquadra all'interno delle attività di ISPRA relative al monitoraggio degli impatti del consumo di suolo e ha permesso di superare i limiti connessi con la risoluzione spaziale del dato MODIS (utilizzato in precedenza per la conduzione di queste analisi) attraverso l'introduzione delle immagini provenienti dalle missioni satellitari Landsat 8 e Landsat 9, per l'intero territorio nazionale. L'affidabilità dello strato LST derivato da immagini Landsat, e la sua compatibilità con i precedenti dati di derivazione MODIS, è stata valutata tramite la conduzione di un'analisi di correlazione con le temperature derivanti dalle elaborazioni delle immagini proveniente dalle due piattaforme satellitari, per lo stesso intervallo temporale.

I risultati di questo lavoro sono stati pubblicati nei seguenti report, atti di convegno e piattaforme web:

- Munafò, M. (a cura di), 2023. Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici. Edizione 2023. Report SNPA 37/23.
- De Corso S., De Benedetti A.A., Cimini A., De Fioravante P., d'Antona M., Di Legnino M., Finocchiaro G., Vaccaro L., Giunta M., Munafò, M. (a cura di), 2024. Atlante dei dati ambientali. Edizione 2024. ISPRA. [ISBN 978-88-448-1228-7](#)
- SNPA, Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici. Edizione 2024. Report SNPA 37/23
- Munafò, M. (a cura di), 2024. [EcoAtl@nte. Viaggio nell'ambiente in Italia. Facile come leggere una storia.](#)
- G., Guerri, G., Albini, A., Casali, A., Cimini, L., Congedo, A., Crisci, A.A., De Benedetti, S., De Corso, P., Dichicco, M., Munafò, M., Morabito, *Activities and Development of a GIS Information Tool to Support Public Administrations to Counteract the Urban Heat Island Phenomenon: The First Year*

of Activity of the Mirificus Project, IGARSS 2024 - 2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Athens, Greece, 2024, pp. 1388-1393, doi: 10.1109/IGARSS53475.2024.10641083.

Lo strato LST a scala nazionale e le analisi spaziali finalizzate alla produzione di mappe di anomalie termiche per il comune di Roma sono state utilizzate nell'ambito del progetto di ricerca MIRIFICUS (**M**onitoraggio degli **I**nterventi di **R**IForestazione per l'**I**sola di **C**alore **U**rbana tramite i **S**atelliti) promosso dall'Istituto per la BioEconomia (IBE) del CNR di Firenze in collaborazione con ISPRA e finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI). Il progetto mira a rendere operativi i dati spaziali prodotti nell'ambito di altre ricerche condotte dal gruppo di lavoro, nell'obiettivo di fornire strumenti di supporto alla pubblica amministrazione per monitorare interventi di forestazione urbana indirizzati al miglioramento del microclima intra-urbano.

Il principio alla base del progetto è ben supportato dalle evidenze scientifiche del lavoro di Marando et al., 2022 nel quale si sottolinea la necessità di adottare valutazioni dettagliate sulle caratteristiche termiche delle città nella progettazione di piani di adattamento efficaci.

2.4.1 Carta nazionale di Temperatura media diurna estiva al suolo

La metodologia per la produzione dello strato di Temperatura Superficiale Terrestre (LST) a scala nazionale è stata elaborata interamente sulla piattaforma *Open Source* di *cloud computing* *Google Earth Engine* (GEE) utilizzando la banda termica *Surface Temperature* (ST) B10 relativa alla *Collection 2, Level 2, Tier 1* dei satelliti Landsat 8 e Landsat 9. Questa nuova collezione distribuita dall' *U.S. Geological Survey* (USGS) ha gradualmente sostituito la vecchia *Collection 1*, non più disponibile a partire dal 31 dicembre 2022, con diversi aggiornamenti nel sistema di acquisizione, elaborazione e distribuzione dei dati. Tra questi, il miglioramento dell'accuratezza di geolocalizzazione assoluta in linea con le coordinate ESA Sentinel-2 10 m GRI, la distribuzione di prodotti globali di riflettanza superficiale di livello 2 e di temperatura superficiale con una risoluzione spaziale di 30m¹⁹. La derivazione di dati affidabili di temperatura al suolo a partire dai valori di radianza all'infrarosso termico (TIR), richiede la correzione degli effetti di assorbimento da parte dell'atmosfera e il recupero dell'emissività spettrale dei diversi elementi che compongono la superficie terrestre. Rispetto al passato, gli utenti hanno a disposizione prodotti pronti all'uso, ottenuti con metodologie standardizzate e validate in grado di migliorare l'accuratezza e ridurre l'incertezza del dato finale. L'algoritmo utilizzato dall'USGS per generare il dato di temperatura superficiale si basa sull'acquisizione e l'elaborazione di set di dati atmosferici ausiliari e di emissività provenienti da diverse missioni satellitari. Il dato ottenuto è stato validato su diversi siti campione mostrando valori di accuratezza di circa 0,5 K e una precisione di circa 1 K (Cook et al., 2014). Pertanto, le operazioni condotte per la produzione dello strato LST medio diurno estivo dell'intero territorio nazionale hanno riguardato:

1. la definizione dell'area di studio;
2. la selezione delle immagini;

¹⁹ La risoluzione nominale della banda TIR è compresa tra 60 e 120 m.

3. il pre-processamento;
4. la mosaicatura nazionale.

1) La piattaforma GEE permette di esportare fino a 10.000 pixel per ogni richiesta. Pertanto, le elaborazioni sono state condotte iterando sulle geometrie delle piastrelle o “tiles” delle immagini Sentinel di Copernicus. Ognuna di queste *tiles* ha dimensioni di 100 km x 100 km, ma è rappresentata come un'area di 110 km x 110 km per garantire sovrapposizioni adeguate tra *tiles* adiacenti. Gli utenti possono selezionare le *tiles* di una specifica area geografica di interesse grazie ad un sistema di identificazione basato su un codice univoco della griglia composto da due numeri, corrispondenti al fuso, e tre lettere. Per l'Italia sono state selezionate 67 *tiles* riportate in Figura 36.

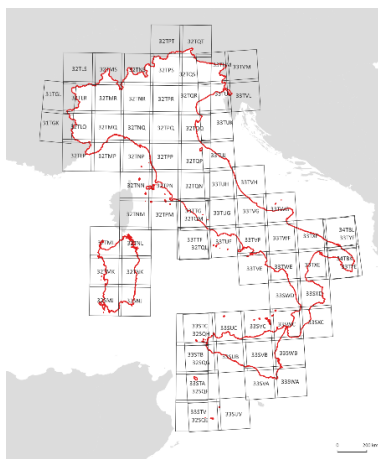


Figura 36. Griglia delle *tiles* Sentinel

2) Le *Collection 2, Level 2, Tier 1* di Landsat 8 e Landsat 9 sono state filtrate con l'obiettivo di acquisire tutte le immagini estive (da giugno ad agosto) per il 2023 e per il periodo 2013-2023 che presentavano una percentuale di copertura nuvolosa inferiore al 60%. La scelta dell'intervallo temporale di 10 anni e dell'integrazione della *Collection* di dati Landsat 9 è dovuta alla necessità di aumentare la disponibilità e la frequenza di acquisizione delle immagini per migliorare la consistenza e la coerenza nelle misurazioni.

3) La fase di pre-processamento delle immagini selezionate ha riguardato la mascheratura delle nuvole, necessaria per migliorare la qualità, l'affidabilità e la precisione dei dati satellitari, e l'applicazione del fattore di scala per convertire i valori digitali di radianza termica al sensore in valori di temperatura in gradi Celsius. Per la mascheratura delle nuvole è stata utilizzata la banda di valutazione della qualità dei pixel dell'immagine (QA_PIXEL). I pixel di questa banda sono caratterizzati da valori in termini di *bit* ai quali si associa la presenza di nuvole o di altre condizioni atmosferiche. Nello specifico, si è fatto riferimento ai valori 1,2, 3 e 4 che corrispondono rispettivamente alla rilevazione di nubi dilatate, cirri, nuvole e ombre delle nuvole (Figura 37) (USGS, 2024).

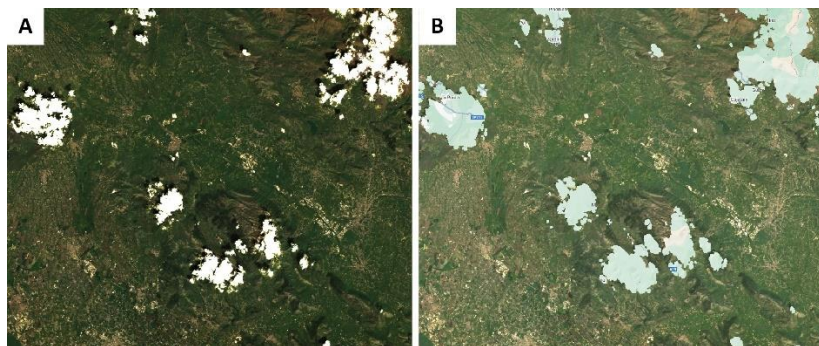


Figura 37. L'immagine originale (A) corretta (B) applicando l'algoritmo di mascheratura delle nuvole che sfrutta le informazioni contenute nella banda di valutazione della qualità dell'immagine QA_PIXEL.

Per riportare i dati di temperatura in valori decimali, viene fornito un fattore di scala e un offset da applicare a ciascun pixel dell'immagine secondo la formula:

$$T [^{\circ}\text{C}] = DN * \text{fattore di scala} + (\text{offset} - 273.15)$$

Dove *DN* è il valore digitale del singolo *pixel*. Per la banda termica (ST_B10) il fattore di scala è pari a 0,00341802 e il valore di *offset* aggiuntivo a 149. All'*offset* è stato sottratto il valore 273,15 per convertire l'unità di misura da gradi Kelvin a gradi Celsius.

4) L'ultima operazione svolta è consistita nel calcolo *pixel based* della temperatura media superficiale estiva utilizzando tutte le immagini selezionate e pre-processate.

Lo script, implementato su GEE, è disponibile in formato *Open Source* alla seguente *repository*:

<https://code.earthengine.google.com/05c0c71977e986b5ee1d38842475861f>

2.4.1.1 Confronto tra dati MODIS e Landsat

Utilizzando la stessa metodologia descritta nel paragrafo precedente, è stato prodotto lo strato LST medio diurno estivo con una risoluzione spaziale di 250 m per il 2013 e per il periodo 2013 – 2023, per l'intero territorio nazionale utilizzando le immagini della banda termica provenienti dalla missione MODIS Terra-Aqua, a partire dai prodotti della *Collection 6 (C06) MODIS Land Surface Temperature* (Wan, 2014). Le principali differenze riguardano la mascheratura delle nuvole, che in questo caso utilizza la banda di controllo della qualità per le immagini diurne (QC_Day), e il valore del fattore di scala per calibrare i valori digitali di riflettanza (0.02).

Come introdotto nel §1.4.1.1 Il telerilevamento per il monitoraggio dell'isola di calore urbana, oltre alla risoluzione spaziale, la differenza chiave tra i due dati riguarda la risoluzione temporale. La bassa frequenza di aggiornamento delle immagini Landsat 8 e Landsat 9 aumenta l'incertezza delle rilevazioni. Pertanto, è stata condotta un'analisi di correlazione tra gli strati LST ottenuti da scene Landsat e MODIS estive relative al 2013 e da immagini acquisite dalle stesse piattaforme satellitari da giugno ad agosto tra il 2013 e il 2023. L'obiettivo è di definire un intervallo di acquisizione delle immagini Landsat tale per cui, il dato di temperatura media diurna estiva al suolo a scala nazionale presenti una distribuzione e un numero di aree prive di informazioni accettabile, sia coerente con il dato MODIS e utilizzabile per le finalità sopra descritte. Per condurre questo studio il dato Landsat è stato ricampionato a 250 m.

2.4.2 Composizione del paesaggio e isola di calore urbana: modelli sintetici per l'analisi del fenomeno

Questa parte del lavoro esplora il fenomeno SUHI diurno estivo sull'intero territorio nazionale rispetto a copertura del suolo e orografia. L'andamento del profilo termico viene approfondito anche rispetto a sezioni territoriali significative tracciate sul territorio delle 14 città metropolitane, considerando anche la copertura del suolo e la presenza di popolazione.

All'interno dei paesaggi urbani è possibile osservare sinteticamente tre tipologie di copertura del suolo alle quali è possibile associare due comportamenti termici diversi: le superfici impermeabili, le superfici vegetate e gli specchi d'acqua. In corrispondenza di superfici impermeabili si osservano temperature più elevate per effetto dell'assorbimento e dell'immagazzinamento dell'energia solare durante il giorno, mentre le superfici vegetate e i corpi idrici producono effetti di raffrescamento grazie ai processi di evapotraspirazione, all'ombreggiatura e all'elevata capacità termica. Il bilancio tra queste componenti non condiziona solo la composizione dei paesaggi urbani ma ne determina anche le proprietà fisiche influenzando il loro microclima.

Il territorio nazionale è stato descritto in termini di densità di superfici artificiali e di densità della copertura arborea, a partire dalla carta del solo consumato relativa al 2023 e alla carta di copertura del suolo ottenuta da ISPRA tramite integrazione di dati Copernicus.

La densità di copertura artificiale è stata valutata come media di superfici artificiali in un intorno circolare di raggio 300m tramite statistiche focali (Grado di Artificializzazione). Per densità di copertura arborea si intende il numero totale di pixel di albero rispetto al totale dei pixel di superficie naturale nello stesso intorno di analisi. In questo modo è possibile individuare e valorizzare il ruolo della copertura arborea nei contesti densamente urbanizzati. Entrambi i risultati sono stati riclassificati in 3 classi di densità: bassa (<10%, classe 1), media (10% - 50%, classe 2) e alta (>50%, classe 3). Sovrapponendo queste

due informazioni è possibile ottenere una rappresentazione del paesaggio in termini di “Grado di Artificializzazione e di “Densità della copertura Arborea” (GADA) in grado di migliorare la descrizione spaziale dei diversi *pattern* urbani sulla base della combinazione delle tre classi di densità delle superfici artificiali e della copertura arborea, come descritti nella Tabella 10.

Classe		Classi di densità	
		Copertura artificiale	Copertura arborea
33	Paesaggi urbani ad elevata naturalità	Alta	Alta
32	Paesaggi urbani a media naturalità	Alta	Media
31	Paesaggi urbani a bassa naturalità	Alta	Bassa
23	Paesaggi suburbani ad elevata naturalità	Media	Alta
22	Paesaggi suburbani a media naturalità	Media	Media
21	Paesaggi suburbani a bassa naturalità	Media	Bassa
13	Paesaggi rurali ad elevata naturalità	Bassa	Alta
12	Paesaggi rurali a media naturalità	Bassa	Media
11	Paesaggi rurali a bassa naturalità	Bassa	Bassa

Tabella 10. Sistema di classificazione del territorio nazionale in termini di densità delle superfici artificiali e della copertura arborea

Un altro importante fattore da tenere in considerazione è legato alle caratteristiche geografiche e, in particolare, all'altitudine. Il territorio nazionale così rappresentato è stato ulteriormente suddiviso in tre fasce altimetriche riconducibili a pianura (< 200m s.l.m.), collina (200m – 600m s.l.m.) e montagna (> 600m s.l.m.), utilizzando il *Digital Elevation Model* (DEM) Tinitaly (Tarquini et al., 2012) disponibile in formato Open Source per tutto il territorio nazionale come griglia di celle a 10 m²⁰.

Per ogni comune, provincia e regione è stata valutata la temperatura media diurna estiva al suolo (LST) In funzione della variazione di densità delle superfici artificiali e della copertura arborea, della localizzazione geografica e delle caratteristiche altimetriche dei diversi paesaggi. Per il processamento dei dati è stato messo a punto uno script in grado di eseguire la catena di elaborazioni necessarie (Figura 38): dal pre-processamento dei dati di input fino alla restituzione dei dati in formato

²⁰Disponibile in formato Open Source al link: <https://tinitaly.pi.ingv.it/>

tabellare, sfruttando le potenzialità di calcolo del pacchetto Python “Remotior Sensus”²¹ sviluppato dall’Ing. Luca Congedo.

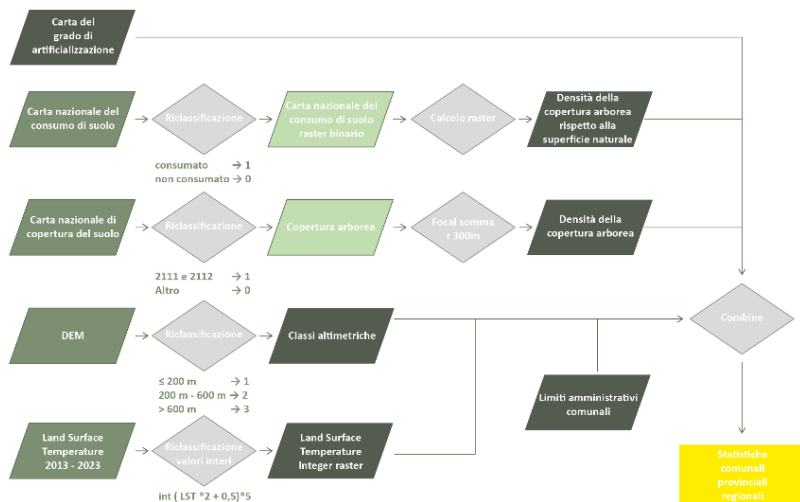


Figura 38. Flusso di elaborazione dei dati per l’analisi dell’isola di calore urbana a scala nazionale.

Le aree urbane costituiscono un ambito territoriale critico a causa della compresenza di temperature mediamente più elevate rispetto alle aree rurali e dell’elevata presenza di popolazione. In questo senso, ai processi di urbanizzazione in atto si associa la continua espansione del tessuto urbano e un costante aumento del numero di persone esposte a temperature elevate, estremamente pericolose per la salute. L’elevata risoluzione spaziale dei dati Landsat ha permesso di condurre analisi di dettaglio sul comportamento termico di alcune delle 14 città metropolitane selezionate per supportare i risultati ottenuti nella prima valutazione; in particolare, sono state condotte due tipologie di analisi:

- rispetto all’intero territorio è stato osservato il comportamento termico per fasce di densità di superfici artificiali, considerando anche la porzione di popolazione residente in ciascuna fascia.

²¹ <https://remotior-sensus.readthedocs.io/en/latest/>

Per il calcolo è stato utilizzato lo strato di densità delle superfici artificiali ottenuto tramite analisi focale a 300 metri a partire dalla carta nazionale del consumo di suolo per il 2023, riclassificata in 10 fasce di densità; per ogni fascia è stata valutata la temperatura media diurna estiva e la popolazione residente utilizzando il *raster* di popolazione 2021 (prodotto secondo la metodologia descritta paragrafo 2.2.1).

- Su aree significative dal punto di vista della relazione tra copertura del suolo e temperatura al suolo, sono state tracciate delle sezioni territoriali, utili ad analizzare il comportamento termico in funzione della presenza di infrastrutture verdi e di superfici artificiali. In questa analisi è stato considerato, per ogni punto della sezione, l'LST medio diurno estivo 2013 – 2023 e gli strati di densità di superfici artificiali e di copertura arborea utilizzati nell'analisi a scala nazionale.

2.4.3 Un approccio statistico per mappare le anomalie termiche

Per identificare *cluster* spaziali statisticamente significativi di valori di Temperatura al suolo (LST), è stata utilizzata la statistica Getis-Ord Gi* (Ord & Getis, 1995), ampiamente applicata in letteratura per la mappatura delle anomalie termiche intra-urbane (Guerra et al., 2021). Si tratta di un tipo di *Local Indicator of Spatial Association* (LISA) utilizzato per identificare aree di concentrazione di valori elevati o bassi in un dataset spaziale. A differenza delle misure globali come il Moran's I, che forniscono una valutazione complessiva della distribuzione spaziale, il Getis-Ord Gi* confronta il valore di un'osservazione con quelli dei suoi vicini e attribuisce un punteggio ad ogni singolo punto nel dataset (Figura 39). Questo permette di identificare "*hot spot*" (aree con valori elevati) e "*cold spot*" (aree con valori bassi) in un contesto spaziale. Per considerare un *hot-spot* (o *cool-spot*) come statisticamente significativo, è necessario che il punto osservato presenti il valore più alto (o più basso) e sia circondato da altri punti con valori elevati. Le analisi sono state condotte utilizzando lo strumento *Hot-Spot Analysis* (Getis-Ord Gi*) disponibile nell'ambiente ArcGIS di ESRI. Il metodo è stato applicato ai valori medi di LST estivo registrati per il periodo 2013 –

2023 sull'area del comune di Roma. Il dato *raster* è stato precedentemente convertiti in un formato vettoriale di punti e, per ogni punto è stata calcolata la statistica Getis-Ord G_i^* secondo la seguente formula:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{S \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{i,j})^2}{n-1}}}$$

Dove x_j rappresenta il valore dell'attributo per la caratteristica j , $w_{i,j}$ è il peso spaziale tra le caratteristiche i e j ed n è il numero totale di caratteristiche. Le medie e le varianze sono indicate rispettivamente da $\bar{X}$ e S :

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - (\bar{X})^2}$$

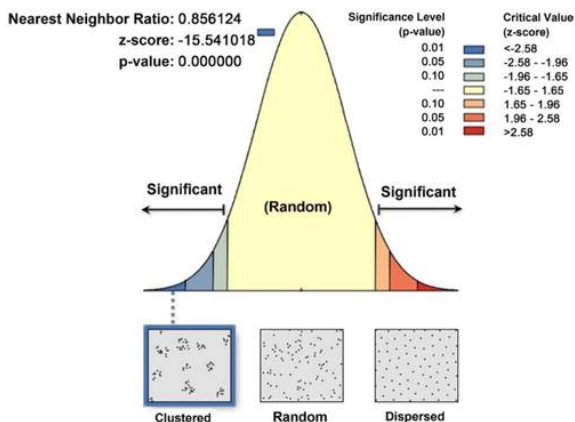


Figura 39. Diagramma di distribuzione del vicino più prossimo medio. Fonte: ESRI

L'applicazione della statistica Getis-Ord G_i^* in ambiente GIS richiede la scelta di una larghezza di banda adeguata (in metri) per garantire un'analisi accurata degli hot-spot. Il metodo suggerisce l'uso di

metriche come la distanza euclidea inversa e la distanza massima dal vicino più prossimo, considerando solo i pixel circostanti. In questo studio è stato adottato quest'ultimo approccio, considerando una larghezza fissa pari a 42,43 m (corrisponde alla distanza massima tra i centroidi dei pixel lungo la diagonale).

I risultati della statistica G_i^* forniscono anche misure di significatività statistica per ciascun punto: i valori p (p -value G_i^*) e i punteggi z (z -score G_i^*). Un punteggio z elevato insieme a un p -value basso indica un *hot-spot* significativo, mentre uno z -score negativo basso con un p -value ridotto indica un *cool-spot* significativo. Maggiore è il valore dello z -score, più marcato è il *clustering* osservato.

Sono stati identificati tre categorie principali di modelli termici:

- **Cool-spot:** *clustering* statisticamente significativo di valori LST bassi;
- **Hot-spot:** *clustering* statisticamente significativo di valori LST elevati;
- **Aree neutre:** senza correlazione spaziale significativa.

Il livello di confidenza determina la significatività statistica degli *hot-spot* e dei *cool-spot* a soglie del 90%, 95% e 99%. Pertanto, gli *hot-spot* e i *cool-spot* sono stati classificati in base ai livelli di confidenza: “Cool-spot99”, “Cool-spot95”, “Cool-spot90”, “Hot-spot90”, “Hot-spot95” e “Hot-spot99”.

Il dataset di punti è stato poi convertito in un *raster* di anomalie termiche con risoluzione spaziale coerente con la griglia Landsat.

L'analisi *Hot-Spot* ha avuto l'obiettivo di introdurre un indicatore utile a individuare anomalie termiche positive o negative all'interno del comune di Roma. Viene fornita una prima informazione aggregata a livello di area urbana e disaggregata rispetto ai 15 municipi, sull'incidenza delle anomalie termiche e sui valori temperatura raggiunti in questi cluster. Inoltre, l'informazione è stata utilizzata per individuare spazialmente le aree prioritarie di interventi di forestazione, come spiegato nel paragrafo successivo.

2.4.3.1 Indicatori a supporto della pianificazione degli interventi di forestazione

I risultati dell'analisi *Hot-spot* permettono di individuare i residui di naturalità che si configurano come anomalie termiche, pertanto ragionevolmente candidabili in via prioritaria come aree di forestazione. Viene fornito, innanzitutto, uno sguardo di insieme sulla distribuzione per municipio delle diverse tipologie di spazi aperti all'interno dell'area urbana che successivamente vengono caratterizzati in funzione dell'incidenza delle anomalie termiche. L'obiettivo del lavoro è di individuare gli ambiti più carenti di aree verdi configurate e selezionare quelli che sviluppano comportamenti termici estremi (tali per cui le temperature sono più elevate rispetto alla media dell'area urbana) e che, quindi, sono candidabili come aree prioritarie di interventi per migliorare le prestazioni termiche che possono influire, inoltre, sulla fruibilità da parte dei cittadini.

Per individuare gli spazi aperti pubblici disponibili è stato introdotto il Piano Regolatore Generale del comune di Roma. In particolare, questo studio è stato condotto con riferimento agli spazi aperti destinati dal PRG a verde pubblico o servizi pubblici e distinguendo le aree agricole, il verde urbano configurato, sia pubblico che privato (parchi e riserve, ville storiche, giardini configurati, verde di arredo, verde privato e spazi per attività sportive all'aperto) e i poligoni descritti come “verde pubblico o servizi pubblici di livello locale”²² a “pianificazione definita o da definire”. Tra questi, sono stati considerati solamente quelli con una percentuale di suolo consumato inferiore al 50%, assumendo che, in questi ultimi, la destinazione prevalente sia per servizi pubblici diversi dal verde pubblico. I restanti poligoni vengono considerati ragionevolmente idonei alla realizzazione di nuove superfici da destinare a verde pubblico.

²² Secondo la Normativa Tecnica di Attuazione (NTA), tali aree sono da destinare ai seguenti servizi o attrezzature: istruzione di base, attrezzature di interesse comune, attrezzature religiose, verde pubblico, verde sportivo, parcheggi pubblici, attrezzature per la raccolta dei rifiuti solidi urbani, parcheggi privati.

Considerando una soglia di incidenza delle anomalie termiche pari ad almeno il 20%, queste aree sono state classificate in spazi aperti CS, HS e neutri. Dal punto di vista termico, si ritiene che le aree prioritarie per la realizzazione di interventi di forestazione in grado di migliorare il microclima intra-urbano siano, nell'ordine:

- 1- gli spazi aperti configurati che sviluppano anomalie termiche hot-spot;
- 2- gli spazi aperti a pianificazione definita o da definire caratterizzati prevalentemente da comportamenti neutri e hot-spot;
- 3- le aree agricole nelle quali le temperature sono estremamente più elevate rispetto alla media.

Su queste ultime, eventuali interventi devono conservare, in primo luogo, la natura produttiva delle aree. Le azioni possibili sono da rintracciare all'interno dell'obiettivo di potenziare gli ambiti ad alta biodiversità all'interno delle aree agricole, previsto dalla strategia europea sulla biodiversità, che nel caso specifico assume un ruolo significativo anche in termini di miglioramento dell'offerta di beni e servizi di prossimità. Inoltre, interventi di forestazione sulle aree agricole ai margini del tessuto insediativo possono rafforzare la capacità di raffreddamento delle infrastrutture verdi lungo i margini della città.

2.5 Foreste Urbane e diritto al verde: strumenti e tecniche GIS per un'analisi spaziale dell'accessibilità

Tra gli impatti più significativi legati alla diffusione degli insediamenti e alla densificazione delle aree urbane, la riduzione della disponibilità di spazi verdi pubblici gioca un ruolo centrale nella definizione di città vivibili, in termini ambientali ma anche di coesione, interazione e uguaglianza sociale. Nell'ambito del target 11.7 degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG) 11, le Nazioni Unite hanno stabilito l'obiettivo di garantire l'accesso universale, sicuro e inclusivo agli spazi pubblici entro il 2030, per donne, bambini, anziani e persone con disabilità. Lo studio propone la valutazione di questo indicatore per l'area urbana delle 14 città metropolitane italiane. Oltre alla soglia dei 400 m indicata nei metadati dell'SDG, è stata considerata anche la soglia dei 300m suggerita dalla regola IUCN 3-30-300, la quale stabilisce che ogni abitante deve poter accedere ad un'area verde pubblica entro 300m, il 30% di ogni quartiere deve essere coperto da vegetazione arborea e da ogni finestra devono essere visibili almeno tre alberi. Queste distanze sono ritenute cruciali, in quanto influenzano la frequenza di utilizzo degli spazi verdi e, di conseguenza, la qualità della vita.

Delle 14 città metropolitane, sono state considerate le porzioni di territorio classificate come “centri urbani” (popolazione > 50.000 abitanti e densità di popolazione ≥ 1.500 abitanti per km²) e “nuclei urbani densi” (popolazione ≥ 5.000 abitanti e densità di popolazione ≥ 1.500 abitanti per km²). Il riferimento alla definizione di area urbana secondo la metodologia DEGURBA è richiesto dai metadati dell'indicatore SDG 11.7.1 (e da altri indicatori relativi all'SDG 11, come l'11.3.1), ma è anche il riferimento ufficiale per l'identificazione dei comuni soggetti agli obblighi della NRR e per la definizione delle aree interessate dai piani di ripristino. La scelta delle città metropolitane è legata agli importanti finanziamenti stanziati nell'ambito del piano NextGenerationEU, in particolare dalla missione 2, componente 4, investimento 3.1 “tutela e valorizzazione del verde urbano ed extraurbano” del PNR. Tali investimenti hanno l'obiettivo di contrastare

gli impatti dei cambiamenti climatici e la perdita di biodiversità tramite interventi di riforestazione, migliorando, contestualmente, la qualità della vita e il benessere dei cittadini. Inoltre, come mostrato in Tabella 11, le città metropolitane rappresentano il 15% del territorio nazionale e includono più di un terzo di tutti i grandi centri urbani e nuclei urbani densi.

Città metropolitana	Superficie totale	Area urbana	
	[ha]	[ha]	[%]
Torino	682.973	25.319	3,7
Genova	183.517	10.855	5,9
Milano	157.674	49.513	31,4
Venezia	247.039	8.770	3,6
Bologna	370.199	9.288	2,5
Firenze	351.351	11.937	3,4
Roma	535.581	61.856	11,5
Napoli	117.398	50.126	42,7
Bari	382.540	14.670	3,8
Reggio Calabria	318.303	5.789	1,8
Palermo	499.302	14.282	2,9
Messina	324.678	6.294	1,9
Catania	355.303	15.800	4,4
Cagliari	124.964	6.216	5,0
Totale	4.650.821	290.716	6,3

Tabella 11. Superficie complessiva delle 14 città metropolitane e porzione di territorio classificata come “centro urbano” e “nucleo urbano denso” secondo la metodologia DEGURBA

Viene sperimentata una metodologia basata su dati *Open-Source* e strumenti di analisi di rete (*network analysis*) utilizzata per individuare i percorsi reali più brevi tra una griglia di origini, distribuite uniformemente sulle aree di analisi, e destinazioni, rappresentate dagli accessi alle aree verdi pubbliche (**Green Urban Public Space** – GUPS). Il lavoro intende restituire una mappatura inedita sulla disponibilità e l'accessibilità alle GUPS entro una distanza a piedi di 300 metri (in linea con la regola 3-30-300) o, al massimo, 400 metri (soglia adottata dall'SDG 11.7.1).

Per valutare l'accessibilità alle GUPS, è importante rappresentare in modo appropriato le aree urbane (l'area all'interno della quale si valuta l'accessibilità alle GUPS), le GUPS (da raggiungere) e i relativi punti di accesso, le distanze (da percorrere per accedere alle GUPS) e la

popolazione (che può accedere alle GUPS). Nei paragrafi che seguiranno verranno approfondite le attività per:

- Definire i punti di partenza;
- Selezionare le aree verdi pubbliche a partire dai due principali database disponibili in ambito europeo e internazionale: *Urban Atlas* 2018 (UA) e *OpenStreetMap* (OSM);
- Acquisire i punti di accesso alle aree verdi pubbliche;
- Costruire una rete di instradamento percorribile a piedi (o rete di routing) tramite tecniche di *Network Analysis*;
- Valutare l'accessibilità alle GUPS in conformità con le indicazioni fornite dalle Nazioni Unite per il calcolo dell'indicatore SDG 11.7.1 e con le indicazioni della regola 3-30-300.

Il primo obiettivo della ricerca è quello di definire un flusso di lavoro che, partendo dai dati disponibili per il territorio nazionale, sia replicabile e permetta di ottenere prodotti in linea con le definizioni di aree urbane e di accessibilità previste a livello normativo. Viene inoltre condotta un'analisi critica sulla definizione geometrica e semantica dei GUPS adottata dai principali dati europei e internazionali che possono essere utilizzati per condurre tali elaborazioni, individuandone le potenzialità e i limiti per la loro implementazione nella valutazione dell'accessibilità. Infine, vengono formulate considerazioni territoriali sulla disponibilità e sull'accessibilità alle GUPS, introducendo anche ulteriori indicatori a supporto dell'interpretazione dei risultati di accessibilità.

Questa parte del lavoro si inserisce nelle attività svolte in collaborazione con ISPRA sulla valutazione degli impatti del consumo di suolo nelle aree urbane e nella partecipazione a progetti nazionali come il VeBS (il buon uso degli spazi Verdi e blu per la promozione della Salute e del Benessere), sostenuto dal Ministero della Salute e coordinato dall'Istituto Superiore di Sanità con la partecipazione di ISPRA, che promuove l'uso e i benefici delle infrastrutture verdi e blu nelle aree urbane e nelle aree protette. I risultati del lavoro sono stati pubblicati nei seguenti report e pubblicazioni scientifiche:

- Munafò, M. (a cura di), 2023. Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici. Edizione 2023. Re-port SNPA 37/23;
- SNPA, Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici. Edizione 2024, Report ambientali SNPA, 43/2024;
- Cimini A., De Fioravante P., Marinosci I., Congedo L., Cipriano P., Dazzi L., Marchetti M., Scarascia Mugnozza G., Munafò M. *Green Urban Public Spaces Accessibility: A Spatial Analysis for the Urban Area of the 14 Italian Metropolitan Cities Based on SDG Methodology*. Land. 2024; 13(12):2174. <https://doi.org/10.3390/land13122174>

Sono stati presentati in occasione dei seguenti convegni:

- Angela Cimini e Beatrice Olivari, *Are Italian cities already 15-minute? Presenting a glocal proximity index, based on open data*. Convegno State of the Map Europe 2023 (SotM Europe 2023), Antwerp (Belgio), 10-12 novembre 2023
- Angela Cimini e Ines Marinosci, *Le infrastrutture verdi: monitoraggio attraverso i dati Copernicus e accessibilità alle aree verdi pubbliche*. Conferenza di presentazione del Progetto VeBS “il buon uso degli spazi verdi e blu per la promozione della salute e del benessere”. L'Aquila - Sala “San Basilio” presso il Centro Congressi “Luigi Zordan”, 10 maggio 2024
- Angela Cimini, Piergiorgio Cipriano, Leonardo Dazzi, *Indice di prossimità agli spazi verdi pubblici urbani (con dati aperti)*. Foss4G, Palazzo Bo – Aula Nievo, Padova, 12 dicembre 2024

Le mappe prodotte nell’ambito dell’attività di ricerca di questo dottorato sono state pubblicate sulla piattaforma WebGis dell’azienda Deda Next raggiungibile all’indirizzo web <https://www.dedanext.it/aree-verdi-pubbliche-urbane>

2.5.1 Struttura e progettazione della griglia di analisi

La metodologia proposta in questo studio si basa sull'analisi di diverse esperienze di valutazione dell'accessibilità tramite tecniche *GIS-based* (Cfr. §1.4.2.1). La restituzione di una mappa facilmente aggiornabile, replicabile e consultabile da parte di utenti più o meno esperti, ha orientato la scelta verso la costruzione di un grigliato regolare a maglie esagonali utilizzato in combinazione con l'analisi della rete di instradamento. La griglia esagonale permette una migliore distribuzione dei punti di campionamento e garantisce una distanza tra il centro e i bordi dell'esagono più equa rispetto a quella di una maglia regolare quadrata (Burdziej, 2019). In tal senso, il centro di ogni esagono viene utilizzato come rappresentativo di un areale di origini o partenze per la valutazione dei percorsi più brevi verso tutti i punti di destinazione, definiti **Point Of Interest** (POI). Nel caso specifico è stata realizzata una griglia regolare esagonale (il cui apotema misura 50 metri) a copertura nazionale, ed estratti i centroidi di ogni esagono. Questi ultimi sono stati caratterizzati in ambiti insediativi facendo riferimento alla mappatura del continuum urbano rurale 2021 ed estraendo per ogni centroide l'informazione sulla classe urbana di riferimento. Ad ogni esagono è stata associata l'informazione sulla quota di popolazione residente al 2021, tramite statistiche zonali tra il *raster* del grigliato esagonale e il dato di popolazione spazializzato 2021 (Figura 40).

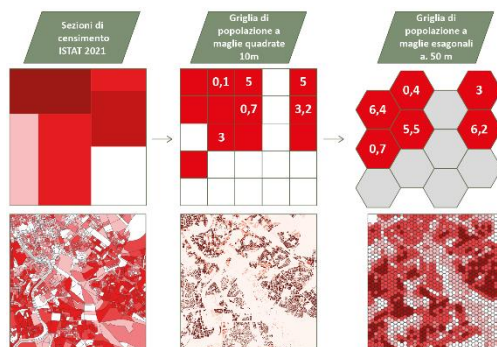


Figura 40. Spazializzazione del dato di popolazione ISTAT per sezioni di censimento e conversione della griglia a maglie quadrate nella griglia a maglie esagonali.

2.5.2 Individuazione delle aree verdi pubbliche urbane

Le aree verdi pubbliche urbane (GUPS) sono il punto di arrivo rispetto al quale viene valutata l'accessibilità. L'attività è stata svolta rispetto a due diversi dati di input, entrambi disponibili in formato Open Source:

- Da OSM sono stati estratti gli spazi verdi descritti dalla chiave “Leisure” e dai tag “Park” e “Garden”. Rispetto alla classificazione di ITO Map (Yu et al., 2020), questi due tag sono stati identificati come i più adatti per la selezione degli spazi verdi aperti pubblici nel contesto italiano;
- UA 2018, sono stati considerati i poligoni della classe “1.4 - Aree artificiali vegetate non agricole”, che comprende le sottoclassi “1.4.1 - Aree verdi urbane” e “1.4.2 - Impianti sportivi e ricreativi”. In dettaglio, sono stati selezionati solo i poligoni coperti per meno del 20% da superfici artificiali (valutate rispetto alla carta del consumo di suolo di ISPRA).

Per entrambi i dati, sono stati considerati solo i poligoni di dimensioni superiori a 5.000m^2 , in linea con le indicazioni fornite dalla regola IUCN 3-30-300.

La soglia relativa alla percentuale di suolo consumato sui poligoni UA è stata introdotta per escludere dalla valutazione le aree con presenza di superfici artificiali, come campi sportivi, stadi, piazze, teatri e auditorium, cimiteri, maneggi, centri sportivi (Figura 41).



Figura 41. Esempi di alcune tipologie di aree mappate da UA come “1.4 - Aree vegetate artificiali non agricole” escluse dalla valutazione dell’accessibilità utilizzando il filtro sulla percentuale massima di suolo consumato, come cimiteri (A), campi sportivi (B), piazze altamente artificializzate (C) e aree interessate dal consumo di suolo (D).

Per quanto riguarda la soglia sulla dimensione minima dei poligoni, la regola IUCN 3-30-300 suggerisce di considerare aree verdi di almeno un ettaro; in questa ricerca è stata definita una soglia di 0,5 ettari per l'intera area di studio, in modo da preservare aree comunque in grado di garantire la fornitura di servizi ecosistemici, ad esempio in termini di capacità di raffreddamento (M. Chen et al., 2022; B. Li et al., 2023).

Tra tutti i poligoni con queste caratteristiche, quelli che ricadevano (interamente o parzialmente) all'interno dell'area urbana della città metropolitana analizzata sono stati considerati spazi verdi urbani pubblici (GUPS) (Figura 42).

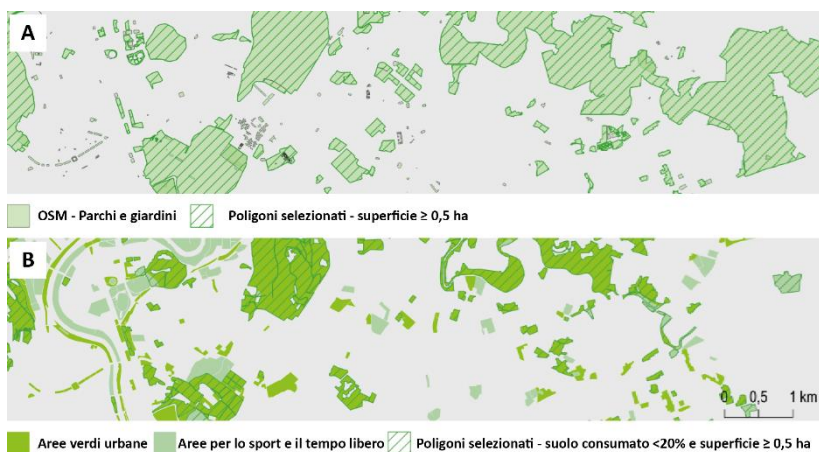


Figura 42. Esempio di selezione delle GUPS, rispetto ai dati OSM (a) e UA (b) sul comune di Roma

2.5.2.1 Individuazione dei punti di accesso ai GUPS

L'identificazione dei punti di accesso ai GUPS è un'operazione complessa che presuppone la disponibilità di informazioni dettagliate sulle caratteristiche dei margini delle aree verdi urbane, sulla localizzazione e limitazione degli ingressi al pubblico.

OSM mappa informazioni di tipo puntuale, chiamate nodi, che si riferiscono agli accessi a edifici, infrastrutture e GUPS. Pertanto, i punti

di accesso alle GUPS sono stati estratti, in prima istanza, con riferimento al database OSM e, in particolare, a:

- nodi OSM caratterizzati dalla chiave “*Barrier*” e dai tag “*gate*” e “*entrance*”. Il primo tag indica la presenza di barriere fisiche come porte o cancelli, il secondo viene utilizzato per descrivere il punto in cui è possibile entrare in un edificio o in un’area chiusa, in assenza di una barriera fisica. Di questi ultimi, sono stati selezionati quelli posti all’interno o in corrispondenza dei perimetri delle aree verdi selezionate;
- punti derivabili dall’intersezione tra le strade interne ai parchi mappate da OSM e i poligoni delle GUPS.

Laddove la carenza di informazioni non consentiva il soddisfacimento di nessuna delle due condizioni, sono stati introdotti punti di accesso fittizi a intervalli costanti di 100 metri lungo il perimetro delle GUPS, così come suggerito anche nei metadati dell’indicatore 11.7.1e mostrato in Figura 43.

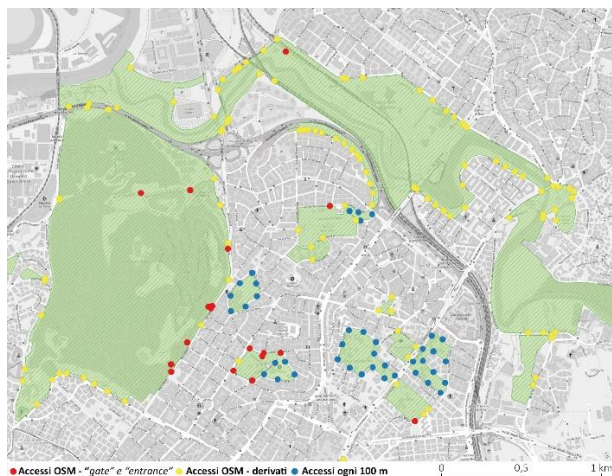


Figura 43. Punti di accesso alle GUPS. In rosso i punti di accesso mappati da OSM, in giallo quelli ottenuti dall’intersezione tra GUPS e la rete stradale, in blu i punti introdotti a intervalli regolari di 100 metri lungo il perimetro. Questi ultimi sono stati considerati in assenza dei primi due per OSM e per tutte le GUPS del dato Urban Atlas.

2.5.3 Creazione della rete di instradamento

Un'analisi di rete in grado di individuare automaticamente il miglior percorso a piedi da un punto di partenza a una o più GUPS nell'area urbana di interesse, necessita di informazioni dettagliate sulla rete infrastrutturale. Nel caso specifico è stato utilizzato il database OSM in quanto le primitive di un file di dati OSM sono rappresentate dagli elementi base di una rete di instradamento (o *routing*), ossia nodi, linee (*way*) e relazioni.

I dati OSM grezzi in formato OSM sono stati acquisiti dal server di download "Geofabrik" e trasformati in un dataset di rete utilizzando l'*add-on Open Source OSM Editor* sviluppato per gli utenti ESRI, e preparando un file xml di configurazione della rete. Le regole stabilite nel file di configurazione si riferiscono esclusivamente all'uso di infrastrutture stradali percorribili a piedi, considerando la chiave "highway" e i seguenti tag: "primary", "primary_link", "secondary", "secondary_link", "tertiary", "tertiary_link", "unclassified", "residential", "service", "cycleway", "cyclestreet", "bicycle_road", "footway", "pedestrian", "path", "sidewalk", "steps", "track", "construction", "escape", "bridleway", "living_street". Non sono state considerate barriere al movimento lungo le strade, e nel caso in cui i punti di origine e/o destinazione non erano situati lungo la rete infrastrutturale, è stata valutata anche la distanza di ciascun punto dall'elemento di rete più vicino.

Per valutare i percorsi è stato utilizzato lo strumento ArcGis OD-Cost Matrix, progettato per risolvere rapidamente il calcolo di dati molto grandi, specificando il numero di destinazioni da trovare e la distanza massima entro la quale condurre l'analisi. Nello specifico, si è scelto di trovare per ogni punto di partenza, identificato con il codice univoco della griglia, un solo punto di interesse più vicino, considerando una distanza massima di 10 km lungo la rete infrastrutturale definita nel file di configurazione. Questo algoritmo fornisce un output vettoriale di tipo lineare nel quale ogni vettore collega un punto di partenza verso il punto di arrivo più vicino, e contiene un campo relativo all'attributo di costo in termini di distanza in metri.

2.5.4 Indicatori di disponibilità e accessibilità ai GUPS

In linea con le indicazioni dell'obiettivo 11.7 e con la regola 3-30-300, lo studio ha permesso di valutare per ogni esagono della griglia la popolazione che ha accesso a un'area verde pubblica urbana (GUPS) entro una distanza a piedi di 300 metri (regola IUCN 3-30-300) o 400 metri (SDG) come segue:

$$\text{Accessibilità ai GUPS} = \frac{Pop_a}{Pop_{tot}}$$

Dove Pop_a indica la popolazione totale che ha accesso ad una GUPS entro 300 metri o 400 metri a piedi, mentre Pop_{tot} è la popolazione totale all'interno dell'area urbana.

Per confrontare la disponibilità di aree verdi pubbliche rispetto alla superficie vegetata totale, è stato calcolato un indicatore ausiliario relativo alla superficie pro-capite di aree verdi urbane (**Urban Green Spaces – UGS**) (1), confrontato successivamente con la superficie pro-capite di aree verdi pubbliche urbane (GUPS) (2) con riferimento sia ad OSM che a UA. La superficie di UGS è stata valutata a partire dal dato CLC *Plus Backbone* riferito al 2021.

$$UGS \text{ procapite} = \frac{UGS_{tot}}{Pop_{tot}} \quad (1)$$

Dove UGS_{tot} rappresenta la superficie totale delle aree verdi pubbliche in ambito urbano e Pop_{tot} la popolazione totale all'interno dell'area urbana.

$$GUPS \text{ procapite} = \frac{GUPS_{tot}}{Pop_{tot}} \quad (2)$$

Dove $GUPS_{tot}$ indica la superficie totale delle aree verdi pubbliche urbane e Pop_{tot} la popolazione totale all'interno dell'area urbana.

2.5.4.1 Isole verdi: accessibilità ad aree verdi *cool-spot* nel comune di Roma

Garantire la presenza di aree verdi pubbliche fruibili e accessibili e in grado di mitigare gli effetti dell'isola di calore urbana, soprattutto durante i mesi estivi, è uno degli obiettivi alla base della promozione degli interventi di forestazione urbana. Molte ricerche si sono concentrate sulla quantificazione dell'effetto di raffreddamento delle aree verdi urbane utilizzando diversi indicatori statistici ma sono molto più limitate le esperienze che hanno valutato l'accessibilità spaziale rispetto ad aree verdi pubbliche in grado di offrire servizi di raffrescamento (*M. Chen et al., 2022; B. Li et al., 2023*).

Una valutazione che combina informazioni sulla distribuzione della popolazione e delle anomalie termiche può fornire indicazioni utili per guidare l'implementazione di misure di raffrescamento in ambito urbano. In questo senso, è stata condotta un'attività di sintesi, che ha interessato l'area studio del comune di Roma, nella quale sono state messe in relazione la disponibilità e l'accessibilità alle aree verdi pubbliche con le informazioni derivanti dallo strato relativo alle anomalie termiche registrate sul territorio comunale (cfr. § 3.3.3). Ciò ha permesso di valutare la quota di popolazione che ha accesso ad un GUPS in grado di fornire servizi di raffrescamento ma anche di individuare le aree prioritarie di intervento che, pur avendo un buon potenziale dal punto di vista dell'accessibilità, presentano caratteristiche termiche tali da necessitare di interventi di forestazione che ne aumentino il comfort climatico e, quindi, la fruibilità.

Le GUPS sono state classificate in funzione della presenza di anomalie termiche in GUPS *hot-spot* (HS), *cool-spot* (CS) e neutrali (N), considerando una soglia minima di superficie caratterizzata da anomalie termiche *hot-spot* e *cool-spot* pari al 20% o, la classe più ampia. Ai punti di accesso alle GUPS è stato aggiunto un attributo relativo alla classe di anomalia termica e la metodologia è stata applicata sia al dataset di UA che di OSM.

3. RISULTATI E DISCUSSIONI

3.1 Il Paesaggio urbano in Italia

La prima attività condotta nell'ambito di questa ricerca, che ha posto le basi per il raggiungimento degli obiettivi secondari del lavoro, ha riguardato l'individuazione e la caratterizzazione dei paesaggi urbani nel territorio nazionale, seguendo l'approccio di clusterizzazione suggerito dell'Eurostat e riconosciuto in ambito internazionale ed europeo per monitorare le politiche e le strategie di forestazione urbana e di sostenibilità ambientale. Questa rappresentazione è stata declinata secondo tre modalità che differiscono tra loro in termini di risoluzione spaziale e dati di input utilizzati. L'obiettivo è proporre soluzioni che tengano conto della disponibilità di informazioni spaziali e della necessità di monitorare gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile e di adempiere agli obblighi della NRR. Il lavoro presentato fornisce un'interpretazione geografica del continuum urbano-rurale dell'intero territorio nazionale, consentendo l'analisi delle dinamiche insediative all'interno delle aree urbane e nel paesaggio circostante, per effettuare confronti tra diversi contesti e fungere da base di supporto per ulteriori analisi multi-scalari. In questo senso, vengono mostrati anche gli strati intermedi sviluppati per individuare le aree edificate ad uso residenziale e per costruire griglie di popolazione di elevatissimo dettaglio, che hanno supportato anche altre attività di monitoraggio dei servizi ecosistemici proposte in questa ricerca.

3.1.1 Continuum urbano-rurale e DEGURBA: confronti e applicazioni

L'applicazione della metodologia DEGURBA ha permesso di ottenere prodotti in formato *raster* che, a partire dalla classificazione delle griglie di popolazione a 10 metri, consentono di rappresentare il territorio nazionale rispetto alle classi del grado di urbanizzazione di Eurostat. A queste rappresentazioni si associano, per gli stessi anni di riferimento, mappe degli ambiti amministrativi comunali descritti in termini di grado di urbanizzazione.

Nel seguito, vengono presentati i risultati relativi alla realizzazione di due famiglie di prodotti: il "Continuum urbano-rurale" è una rappresentazione a 10 metri di risoluzione, concepita allo scopo di

valorizzare il dettaglio tematico e spaziale dei dati di input, mentre il “DEGURBA” fornisce una mappatura perfettamente in linea con le indicazioni geometriche e tematiche della NRR per l’individuazione dei comuni da sottoporre agli obblighi di legge.

Nel seguito, viene definita “Continuum urbano-rurale 2018” la rappresentazione del grado di urbanizzazione derivata da dati di popolazione ISTAT di livello comunale relativi al 2018, mentre lo strato “Continuum urbano-rurale 2021” si basa sui più dettagliati dati demografici disaggregati rispetto alle sezioni di censimento (tale rappresentazione è stata realizzata anche rispetto ai dati relativi al 2011, e costituisce la *baseline* per il calcolo dell’indicatore SDG 11.3.1). Viene, infine, descritto il “DEGURBA 2021”, ottenuto ricampionando e allineando la griglia di popolazione a 10 metri, basata su sezioni di censimento, con quella a 1 km di Eurostat.

Continuum urbano-rurale 2018

Il Continuum urbano-rurale 2018 è un prodotto a 10 metri di risoluzione ottenuto da dati di popolazione comunali relativi al 2018 (Figura 44).



Figura 44 Mappa del Continuum urbano rurale 2018

La rappresentazione del territorio italiano in classi del grado di urbanizzazione al 2018 mostra una prevalenza delle classi rurali a bassa e bassissima densità di popolazione. Le aree a più alta densità di popolazione (“centri urbani” e “nuclei urbani densi”) occupano poco più del 2% del territorio nazionale e sono localizzate lungo la costa, nelle aree di pianura (in particolare nella pianura padana) e nei fondivalle, mentre le aree suburbane circostanti occupano meno del 5% del territorio nazionale. Rispetto al GHS-SMOD di Eurostat, si riscontra una distribuzione analoga delle classi urbane, suburbane/periurbane e rurali, con le principali differenze rilevate nella classificazione dei “nuclei urbani densi” e “nuclei urbani semi-densi”, più estesi nel GHS-SMOD rispetto ai dati proposti in questa ricerca (Tabella 12 e Figura 45).

Classi	Continuum urbano-rurale		DEGURBA GHS-SMOD	
	[ha]	[%]	[ha]	[%]
Centri urbani	478.965	1,6	421.293	1,4
Nuclei urbani densi	161.683	0,5	412.635	1,4
Nuclei urbani semi-densi	44.219	0,2	253.155	0,8
Suburbano o periurbano	1.400.857	4,7	1.315.428	4,3
Nuclei rurali	660.323	2,2	800.973	2,6
Rurale a bassa densità	5.921.639	19,7	4.555.108	15
Rurale a densità molto bassa	20.855.863	69,2	22.381.960	73,7
Aree industriali, commerciali e per servizi	441.594	1,5	-	-
Corpi idrici	173.558	0,6	227.783	0,8
Totale	30.138.702	100	30.368.335	100

Tabella 12. Estensione delle classi del continuum urbano-rurale sul territorio nazionale, espressa in ettari e percentuale e confrontata con i dati del GHS-SMOD.

Sono complessivamente 2.825 i cluster urbani identificati sul territorio nazionale, di cui 719 classificati come “centri urbani”, 2.046 come nuclei urbani densi e i restanti 60 come nuclei urbani semi-densi (Tabella 13). I “centri urbani” occupano circa tre volte la superficie dei “cluster urbani densi” e oltre dieci volte quella dei “cluster urbani semi-densi”. Circa la metà dei “centri urbani” si trova in Lombardia, Campania e Lazio. La Lombardia è anche la regione in cui la classe “nuclei urbani densi” è più estesa, mentre circa un terzo dei “nuclei urbani semi-densi” ricade in Veneto, Lazio e Sicilia.

Regione	Centri urbani		Nuclei urbani densi		Nuclei urbani semi-densi		LUC	LUPI
	Patch [n°]	[ha]	Patch [n°]	[ha]	Patch [n°]	[ha]	[ha]	[%]
Piemonte	32	29.926	138	10.646	3	2.515	14.809	34,4
Valle d'Aosta	1	730	3	290	0	0	730	71,6
Lombardia	66	108.648	452	34.143	4	2.817	48.016	33
Trentino AA	6	5291	48	3.273	0	0	1.509	17,6
Veneto	23	27.278	197	17.286	12	6.780	5.299	10,3
Friuli VG	28	8.674	33	2.265	6	4.162	2.903	19,2
Liguria	119	14.626	44	3.524	1	601	7.623	40,7
Emilia-Romagna	27	27.843	154	9.975	2	1.263	6.737	17,2
Toscana	33	29.906	109	7.720	5	3.472	8.833	21,5
Umbria	4	3.007	26	1.628	4	3.124	1.289	16,6
Marche	18	8.193	50	4.258	2	1.333	1.438	10,4
Lazio	37	52.989	142	13.173	5	5.140	39.061	54,8
Abruzzo	14	8.277	33	2.735	0	0	4.226	38,4
Molise	2	1.393	9	685	0	0	836	40,2
Campania	125	74.469	103	7.859	3	2.176	49.065	58,1
Puglia	80	24.305	157	13.710	6	4.530	4.280	10,1
Basilicata	2	1.381	21	2.115	0	0	770	22
Calabria	15	7.553	79	6.260	1	812	2.253	15,4
Sicilia	74	36.482	177	14.231	5	4.898	11.089	19,9
Sardegna	13	8.289	71	5.987	1	598	4.181	28,1
Italia	719	476.837	2046	161.762	60	44.219	-	-

Tabella 13. Superficie e numero di patch presenti sul territorio italiano per le classi Centri Urbani, Nuclei urbani densi e Nuclei urbani semi-densi. L'indicatore Largest Urban Centre (LUC) indica la dimensione in ettari della patch più grande, mentre l'indicatore Largest Urban Patch Index (LUPI) esprime in termini percentuali la porzione di superficie occupata dalla patch più grande rispetto all'estensione totale delle tre classi all'interno della regione.

Per quanto riguarda l'estensione dei centri urbani più grandi, in Lombardia e Campania i centri di Milano e Napoli occupano ciascuno quasi 50.000 ettari, mentre nel Lazio l'area urbana di Roma raggiunge poco meno di 40.000 ettari. Nelle altre regioni i centri principali non raggiungono i 10.000 ettari, fatta eccezione per il Piemonte e la Sicilia che si fermano appena sopra questa soglia. L'indicatore “*Largest Urban Patch Index*” (LUPI) esprime l'estensione della patch più grande in percentuale sull'estensione regionale totale delle tre classi urbane. In

Campania e Lazio i due cluster principali sono tra i più grandi d'Italia e occupano tra il 50 e il 60% della classe urbana regionale, mentre il nucleo urbano di Milano, pur essendo il più grande d'Italia, comprende meno di un terzo delle aree urbane regionali, a testimonianza dell'elevato livello di urbanizzazione di questa regione. Il valore LUPI più elevato si registra in Valle d'Aosta, dove il nucleo urbano di Aosta (pur essendo il più piccolo tra i maggiori centri urbani regionali) comprende oltre il 70% della superficie urbanizzata della regione, a conferma del basso livello di artificializzazione di quel territorio.

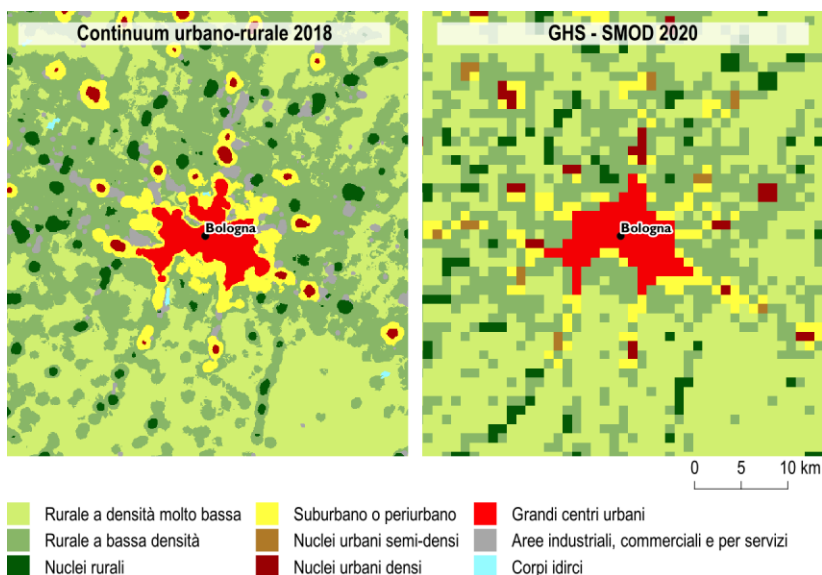


Figura 45. Area urbana di Bologna: confronto tra la classificazione del continuum urbano-rurale dai dati proposti (2018) e il GHS-SMOD (2020). I due dati sono coerenti per quanto riguarda la discriminazione delle diverse classi; tuttavia, i dati proposti rappresentano con maggiore dettaglio geometrico i bordi dei centri urbani densi e la configurazione spaziale dei cluster di piccole e medie dimensioni attorno al nucleo urbano principale.

Continuum urbano-rurale 2021

In Figura 46 è rappresentato il Continuum urbano-rurale 2021, basata su dati di popolazione 2021 (disponibili per sezioni di censimento).



Figura 46. Mappa del Continuum urbano-rurale 2021

Al 2021 quasi il 90% del territorio nazionale è classificato come rurale a densità molto bassa (72,3%) e a bassa densità (15,9%) e meno del 3% è occupato da grandi centri urbani e nuclei urbani densi (entrambi occupano l'1,4% della superficie nazionale), dove però si concentra oltre il 60% della popolazione totale (oltre un terzo risiede nei grandi centri urbani). Significativa anche la concentrazione di popolazione in aree periurbane o suburbane che, a fronte di un'estensione di poco meno del 4% della superficie nazionale, ospitano l'11% della popolazione nazionale (Tabella 14).

Classi del Continuum urbano-rurale 2021										Totale
	11	12	13	21	22	23	30	50	60	
Sup. (ha)	21.799.369	4.805.896	1.052.611	1.101.660	237.315	426.270	412.788	134.630	173.559	30.144.099
Sup. (%)	72,3	15,9	3,5	3,7	0,8	1,4	1,4	0,4	0,6	100
Pop. (n° ab)	1.134.907	4.861.262	7.934.177	6.503.118	2.220.232	14.719.143	21.267.838	380.927	4.494.	59.026.098
Pop. (%)	1,9	8,2	13,4	11,0	3,8	24,9	36,0	0,6	0,0	100

Tabella 14. Superficie delle classi di continuum urbano-rurale al 2021 (in ettari e in termini di percentuale sul totale) e popolazione presente nelle classi (in abitanti e in termini di ripartizione percentuale tra le classi). 11= rurale a densità molto bassa, 12= rurale a bassa densità, 13= nuclei rurali, 21= suburbano o periurbano, 22= nuclei urbani semi-densi, 23= nuclei urbani densi, 30= grandi centri urbani, 50= aree industriali, commerciali e per servizi, 60= corpi idrici

La classificazione dei limiti amministrativi comunali (Figura 47) ottenuta a partire dalla mappa del continuum urbano-rurale 2021 mostra che 2.262 comuni pari a poco meno di un terzo del totale sono classificati come ambiti urbani (“grandi centri urbani”, “nuclei urbani-densi” e “nuclei urbani semi-densi”) e 916 pari al 12% del totale rientrano nella classe “suburbani o periurbani”, mentre il 23% (1.7936 comuni) sono classificati come ambiti prevalentemente rurali. Oltre due terzi dei comuni classificati come “grandi centri urbani” si concentrano in Lombardia (214 comuni pari al 41,5% del totale della classe) e in Campania (123 comuni pari al 24% del totale della classe). Nelle stesse regioni è presente oltre un terzo dei comuni classificati come “nuclei urbani densi” ai quali si aggiunge la Puglia con 137 comuni pari all' 11% della classe (Tabella 15).

Regioni	Continuum urbano-rurale 2021 comunale							Totale
	11	12	13	21	22	23	30	
Piemonte	73	454	390	113	57	79	15	1.181
Valle d'Aosta	3	38	14	9	9	1		74
Lombardia	12	183	435	274	115	273	214	1.506
Trentino Alto-Adige		55	158	33	14	20	2	282
Veneto	1	72	169	146	70	89	16	563
Friuli-Venezia Giulia	4	58	81	13	36	14	9	215
Liguria	4	90	44	40	17	29	10	234
Emilia-Romagna	11	49	113	24	31	81	21	330
Toscana	3	50	81	33	32	53	21	273
Umbria	1	22	42	3	12	10	2	92
Marche	5	58	94	16	13	37	2	225
Lazio	1	103	139	37	27	58	13	378
Abruzzo	2	134	113	15	14	21	6	305
Molise		65	60	5	2	4		136
Campania		76	206	63	24	58	123	550
Puglia		3	61	11	30	137	15	257
Basilicata		18	94	1	4	13	1	131
Calabria		65	221	37	37	37	7	404
Sicilia		18	166	39	10	125	33	391
Sardegna		62	252	4	8	45	6	377
Totale	120	1.673	2.933	916	562	1.184	516	7.904

Tabella 15. Numero di comuni per classi del grado di urbanizzazione a livello regionale.

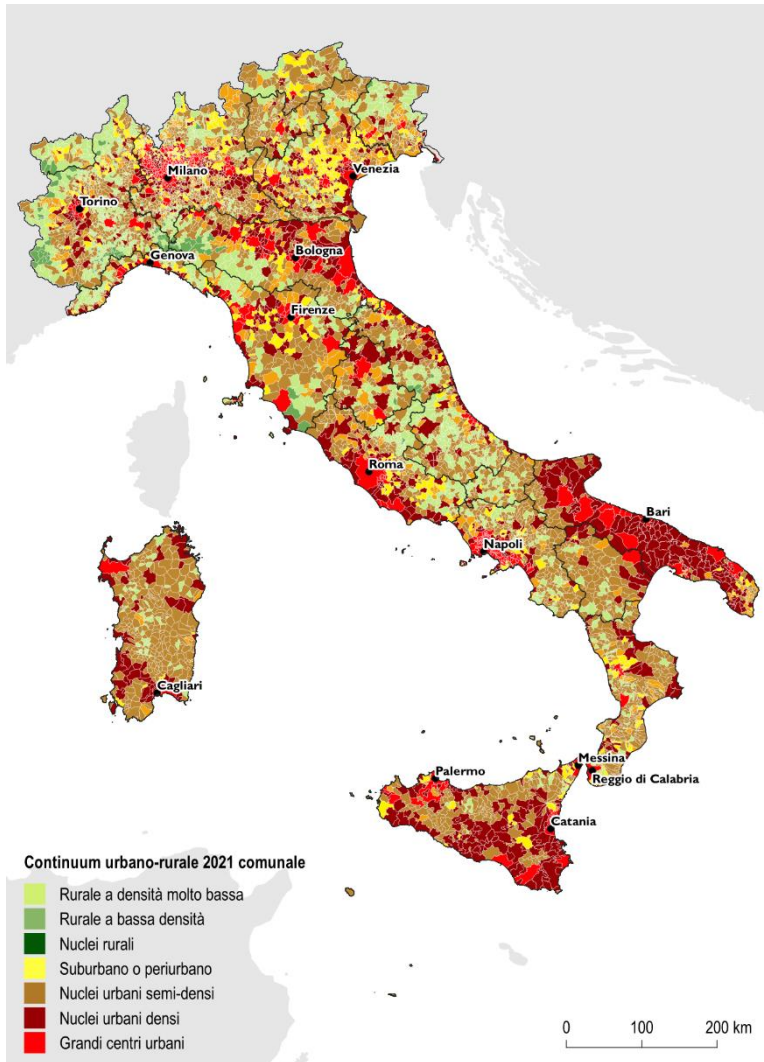


Figura 47 Classificazione dei limiti amministrativi comunali 2021 in classi del grado di urbanizzazione a partire dalla griglia del Continuum urbano-rurale a 10m 2021

DEGURBA 2021

Il DEGURBA 2021 è basata sulla griglia di popolazione a 10m relativa al 2021, convertita e allineata alla griglia Eurostat a 1km (Figura 48).

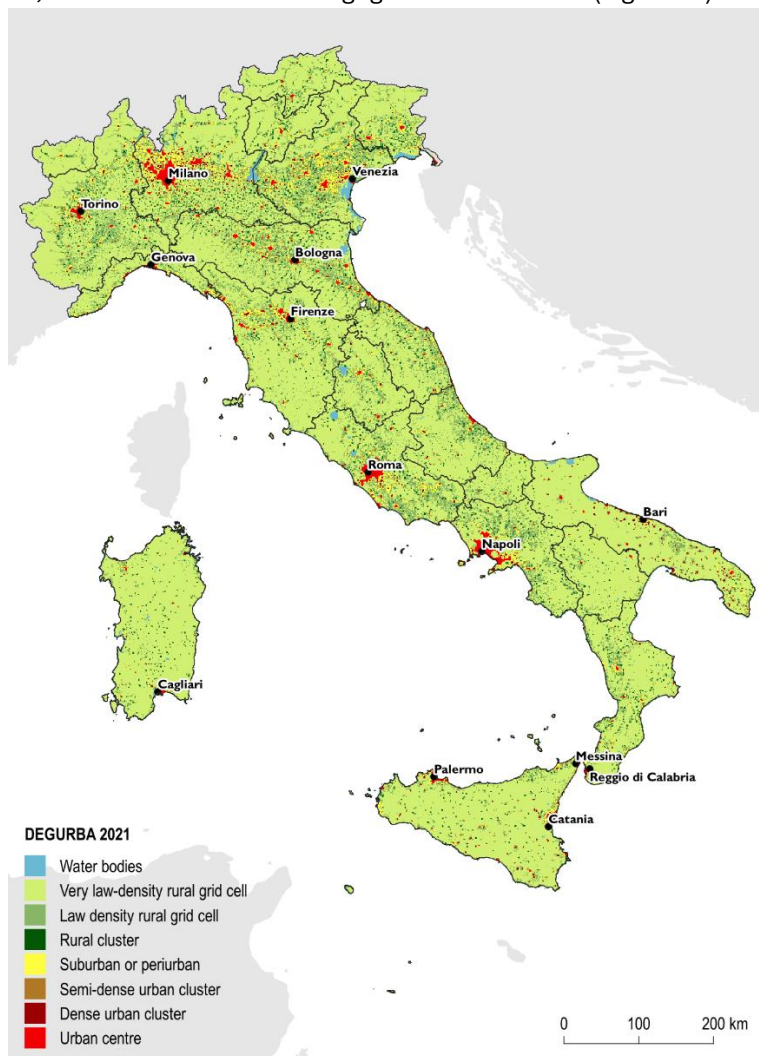


Figura 48 Mappa del DEGURBA 2021 coerente con la griglia Eurostat a 1km

Osservando i risultati ottenuti con la classificazione della griglia di popolazione a 1km (Tabella 16), oltre il 90% del territorio nazionale è classificato come rurale (92%) e il 4,5% in suburbano o periurbano; mentre le classi relative ai centri urbani (Urban centre) e agli agglomerati urbani (Dense urban cluster e Semi-dense urban cluster) rappresentano il 3,1% della superficie nazionale.

Classi del Continuum urbano-rurale 2021										
	11	12	13	21	22	23	30	50	60	Tot.
Sup. (ha)	216.7	22.097.9	4.639.1	790.63	1.361.7	158.79	368.48	417.13	30.050.6	216.74
(%)	43	59	83	5	67	0	9	3	99	3
	0,7	73,5	15,4	2,6	4,5	0,5	1,2	1,4		0,7

Tabella 16. Superficie delle classi del DEGURBA al 2021 in ettari e in termini di percentuale sul totale. 10 = Water bodies, 11 = Very low-density grid cell, 12 = Low density grid cell, 13 = Rural cluster, 21 = Suburban or periurban grid cell, 22 = Semi-dense urban cluster, 23 = Dense urban cluster, 30 = Urban centre

Confrontando il DEGURBA con il Continuum urbano-rurale 2021 a 10 metri appena descritto (Tabella 17), le differenze si concentrano soprattutto nelle classi “suburbano o periurbano” e “nuclei urbani semi-densi” (semi-dense urban cluster nel DEGURBA). I nuclei urbani semi-densi si collocano a metà tra la definizione dei nuclei urbani-densi e delle celle suburbane o periurbane per cui la differenza è da ricondurre sia alla risoluzione spaziale della griglia di popolazione che all’interpretazione della classe suburbano o periurbano. Nel Continuum urbano-rurale l’esistenza di questa classe è connessa con la presenza di un centro urbano o di un nucleo urbano denso, considerando che le aree urbane possono agire come poli attrattori favorendo, lungo i margini e, in particolare, lungo le direttrici infrastrutturali principali, la proliferazione di insediamenti a bassa densità di popolazione e di superfici costruite. Dalla Figura 50 è possibile apprezzare, sull’area di Milano, la coerenza tematica tra gli strati relativi al 2021 e la diversa attribuzione delle classi per alcuni cluster nella mappa 2018. Tale variazione è riconducibile alla costruzione della griglia di popolazione 2018 basata su dati ISTAT comunali, e non ad una sostanziale variazione di popolazione in quelle aree. Sebbene il dato 2018 presenti una buona coerenza tematica con il GHS-SMOD (cfr. § *Continuum urbano rurale 2018*) i dati di popolazione

di livello sub-comunale permettono di migliorare ulteriormente i risultati.

		Continuum urbano-rurale 2021								
		10	11	12	13	21	22	23	30	50
DEGURBA 2021	10	40,5	58,1	0,6	0,1	0,1	-	-	-	0,4
	11	0,2	93,1	5,8	0,4	0,2	-	-	-	0,2
	12	0,4	19,6	66,3	6,6	4,9	1,1	0,3	0,1	0,7
	13	0,6	5,4	22,4	68,7	0,5	1,7	-	-	0,7
	21	0,9	3,0	17,6	8,1	48,9	8,1	7,7	3,1	2,6
	22	0,9	0,9	4,4	5,3	32,5	32,9	21,3	0,2	1,7
	23	0,5	0,4	1,7	-	16,7	0,4	72,2	6,8	1,3
	30	0,1	1,3	2,5	0,1	10,5	-	1,0	81,4	3,2
Totale		0,6	72,2	16,0	3,5	3,7	0,8	1,4	1,4	0,4

Tabella 17. Variazioni tra le classi del Continuum urbano rurale 2021 e il dato DEGURBA 2021 espresse in percentuale rispetto alla dimensione totale della classe mappata dal DEGURBA.

I due dati risultano allineati anche a livello comunale (

Figura 49) a meno di alcune differenze legate al diverso livello di dettaglio della griglia di popolazione e di aggregazione delle classi “suburbano o periurbano” e “nuclei urbani semi-densi”. Tra queste, con riferimento al DEGURBA, spicca l’attribuzione di classi diverse da quelle urbane ai comuni capoluogo di provincia (L’Aquila, Fermo, Belluno, Perugia, Pistoia e Agrigento) sebbene rivestano un’importanza centrale nelle politiche di forestazione e, più in generale, nelle dinamiche territoriali e urbane.

I comuni classificati come “Centri urbani” o “Agglomerati ad alta densità” e “Agglomerati urbani” o “Agglomerati urbani a modesta densità” secondo la definizione stabilita nel regolamento (CE) n.1059/2003 sono 3.011 pari al 38% del totale. Escludendo gli “Agglomerati urbani a modesta densità” (corrispondenti alla classe Suburbano o periurbano) la percentuale scende al 21% (1.621 comuni). Come mostrato in Tabella 18, il 56% dei comuni classificati come “centri urbani” (Urban centre) si trovano in Lombardia e in Campania, mentre il 53% degli “Agglomerati ad alta densità” (Dense urban cluster) si concentra in Lombardia, Puglia e Sicilia. Poco meno della metà (48%)

degli “Agglomerati urbani” (semi-dense urban cluster) si trovano in Lombardia, Piemonte e Veneto. Nelle stesse regioni si concentra anche il 56% dei comuni classificati come “Agglomerati a modesta densità”.

Regioni	DEGURBA 2021 comunale							Totale
	11	12	13	21	22	23	30	
Piemonte	104	532	283	147	43	59	13	1.181
Valle d'Aosta	7	39	12	14	1	1	-	74
Lombardia	19	242	344	417	112	241	131	1.506
Trentino Alto-Adige	-	97	120	43	8	12	2	282
Veneto	2	127	141	210	42	32	9	563
Friuli-Venezia Giulia	9	80	64	42	8	7	5	215
Liguria	9	109	30	56	5	20	5	234
Emilia-Romagna	12	87	100	55	22	41	13	330
Toscana	1	88	70	59	15	29	11	273
Umbria	4	37	32	13	2	3	1	92
Marche	9	85	69	26	12	22	2	225
Lazio	5	135	123	49	23	36	7	378
Abruzzo	5	177	74	26	8	12	3	305
Molise	1	81	46	2	2	4	-	136
Campania	1	138	152	87	21	52	99	550
Puglia	-	5	61	38	25	118	10	257
Basilicata	-	36	76	4	6	8	1	131
Calabria	-	103	206	46	15	30	4	404
Sicilia	-	35	160	40	29	100	27	391
Sardegna	1	93	215	16	16	30	6	377
Totale	189	2.326	2.378	1.390	415	857	349	7.904

Tabella 18. Numero di comuni per classi del grado di urbanizzazione a livello regionale

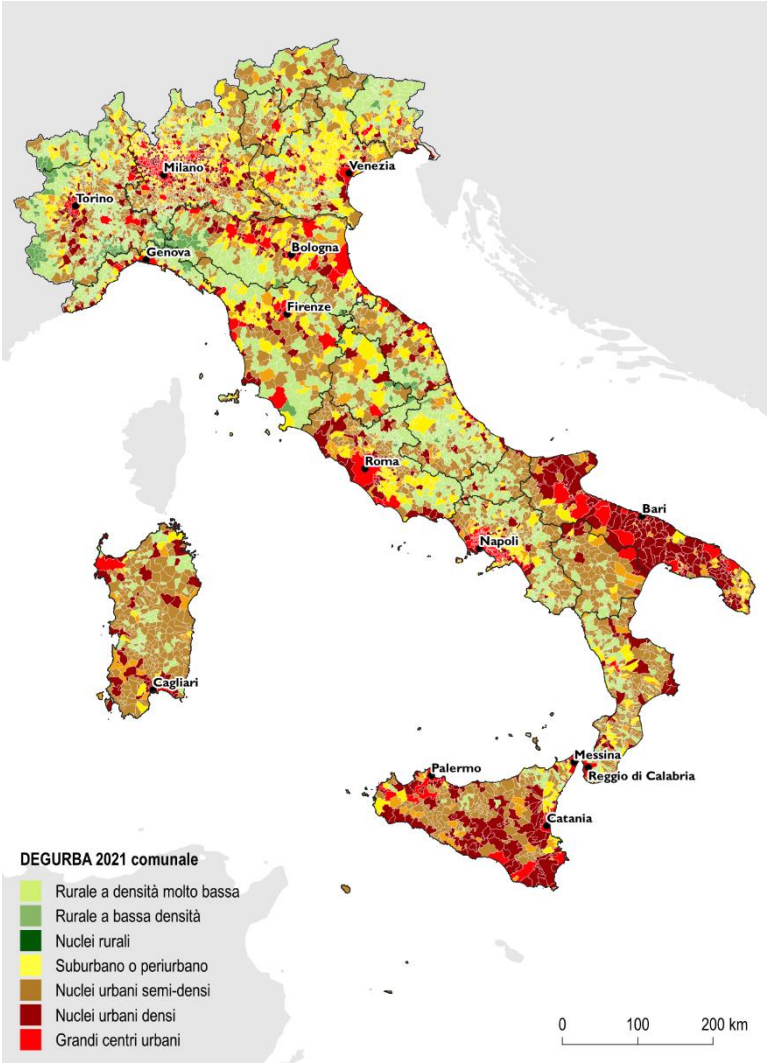


Figura 49 Classificazione dei limiti amministrativi comunali 2021 in classi del grado di urbanizzazione a partire dalla griglia DEGURBA a 1km 2021

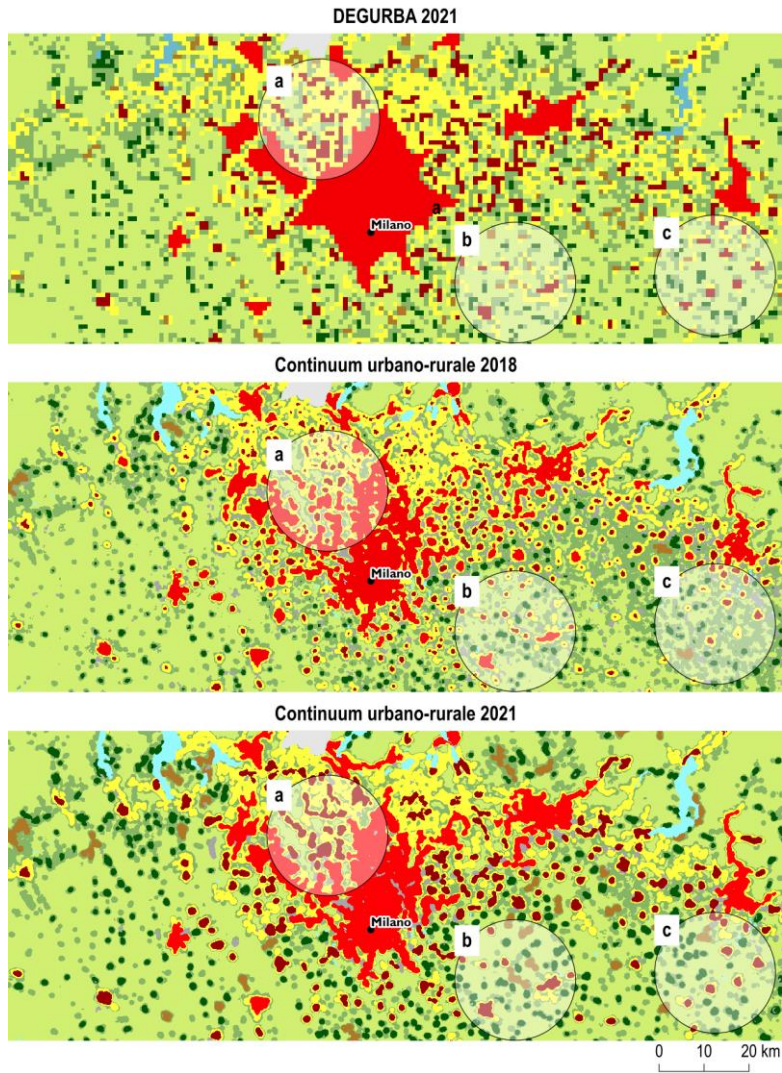


Figura 50 Area urbana di Milano: confronto tra la mappa del DEGURBA 2021 e le mappe del Continuum urbano-rurale relative al 2018 e al 2021. Le aree contrassegnate dalle lettere “a”, “b” e “c” mostrano la coerenza tematica tra gli strati 2021 e le possibili variazioni nell’attribuzione delle classi nel dato 2018.

Strati informativi intermedi

Le maschere messe a punto per discriminare gli usi residenziali e non residenziali mostrano che al 2012 il 78% delle superfici costruite è attribuibile ad usi residenziali, mentre al 2021 la percentuale scende al 77% (Tabella 19). Questa variazione è da attribuire al maggior dettaglio tematico disponibile (classificazione al terzo livello) per la mappa del suolo consumato 2021.

Maschera	Residenziale		Non residenziale		Suolo consumato
	ha	%	ha	%	ha
2012	994.327	77,95	281.334	22,05	2.091.995
2021	983.708	76,55	301.320	23,45	2.144.097

Tabella 19. Percentuale ed ettari di edifici (classe 111), suolo consumato (classe 1) e suolo consumato permanente (classe 11) classificati in residenziale e non residenziale al 2012, 2018 e 2021. (*) Indica la percentuale di suolo consumato residenziale e non residenziale considerato per la produzione delle maschere rispetto al suolo consumato totale nel territorio nazionale.

Le aree ad uso residenziale individuate dalla maschera residenziale-non residenziale sono state utilizzate come dato di partenza per la disaggregazione del dato di popolazione ISTAT di livello sub-comunale. Tra il dato di popolazione ISTAT 2011 e quello disaggregato sulla maglia quadrata a risoluzione di 10 metri si ottiene uno scarto di poco meno di 400 abitanti, pari allo 0,0007% del totale nazionale, e di 326 abitanti nel 2021, pari allo 0,0006% della popolazione totale nazionale (Tabella 20).

Regioni	Popolazione 2011			Popolazione 2021		
	ISTAT	Griglia	Scarto	ISTAT	Griglia	Scarto
Piemonte	4.363.916	4.363.877	39	4.256.350	4.256.334	16
Valle d'Aosta	126.806	126.806	0	123.360	123.360	0
Lombardia	9.704.151	9.704.108	43	9.943.004	9.942.985	19
Trentino-Alto Adige	1.029.475	1.029.471	4	1.073.574	1.073.569	5
Veneto	4.857.210	4.857.197	13	4.847.745	4.847.727	18
Friuli-Venezia Giulia	1.218.985	1.218.982	3	1.193.339	1.193.337	2
Liguria	1.570.694	1.570.686	8	1.509.227	1.509.226	1
Emilia-Romagna	4.342.135	4.342.090	45	4.422.965	4.422.940	25
Toscana	3.672.202	3.672.193	9	3.663.191	3.663.178	13
Umbria	884.268	884.268	0	858.812	858.811	1

Marche	1.541.319	1.541.315	4	1.487.150	1.487.142	8
Lazio	5.502.886	5.502.872	14	5.714.882	5.714.871	11
Abruzzo	1.307.309	1.307.297	12	1.275.950	1.275.946	4
Molise	313.660	313.658	2	292.150	292.149	1
Campania	5.766.810	5.766.755	55	5.624.420	5.624.360	60
Puglia	4.052.566	4.052.535	31	3.922.941	3.922.905	36
Basilicata	578.036	578.029	7	541.168	541.160	8
Calabria	1.959.050	1.959.039	11	1.855.454	1.855.439	15
Sicilia	5.002.904	5.002.848	56	4.833.329	4.833.289	40
Sardegna	1.639.362	1.639.358	4	1.587.413	1.587.402	11
Totale	59.433.744	59.433.354	390	59.026.424	59.026.098	326

Tabella 20. Popolazione ISTAT a livello regionale per gli anni 2011, 2018 e 2021 e risultati della disaggregazione sulla griglia regolare di 10m.

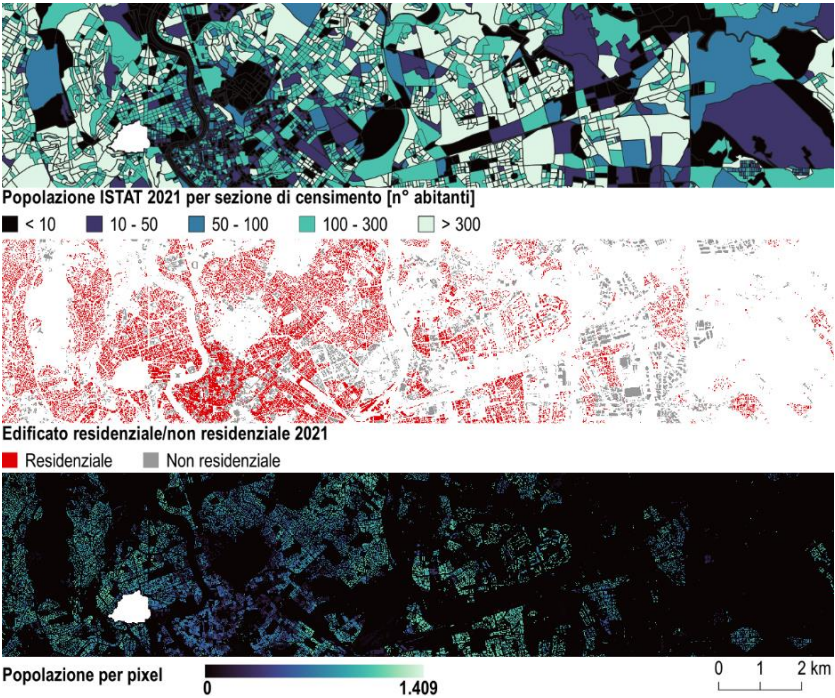


Figura 51. Passaggio dal dato di popolazione per sezioni di censimento ISTAT alla griglia regolare a maglia quadrata di lato 10m ottenuta spazializzando il dato ISTAT sui pixel di edificato residenziale della carta nazionale del consumo di suolo

3.1.1.1 L'uso del suolo e la web app a supporto delle attività di monitoraggio

Web app dei dati preliminari del consumo di suolo

L'applicazione web sviluppata per supportare, consolidare e rendere le attività di monitoraggio del consumo di suolo ancora più partecipata ha mostrato risultati incoraggianti nel primo anno di sperimentazione soprattutto in termini di iscrizione alla piattaforma. Sono state accolte 46 richieste di accesso, 36 delle quali provenienti da amministrazioni comunali, 8 da membri delle Agenzie Regionali per la Protezione Ambientale (ARPA) e solo 2 da amministrazioni Regionali (Figura 52).

I comuni che hanno mostrato maggiore interesse sono quelli della regione Lombardia (7), del Piemonte (7), del Lazio (5) e del Veneto (5).

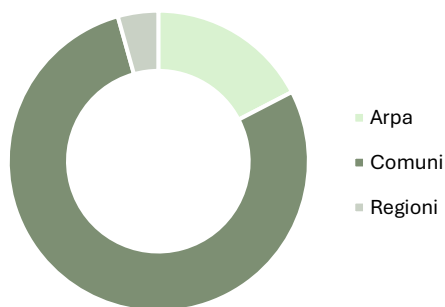


Figura 52. Utenti iscritti alla piattaforma web per la condivisione dei dati preliminari del consumo di suolo, per tipologia

Introduzione dell'uso del suolo alla carta del suolo consumato

Nell'ambito dell'attività di monitoraggio del consumo di suolo per il periodo 2022-2023 è stata introdotta, in via sperimentale, una codifica di uso del suolo per la caratterizzazione dei nuovi poligoni di consumo di suolo, la cui conduzione è subordinata alla disponibilità di informazioni che rendano possibile la determinazione della destinazione d'uso dell'area di cambiamento. In tal senso, è stato possibile attribuire la classe di uso all'88% dei nuovi poligoni di cambiamento.

Le analisi sono state condotte al primo livello di classificazione. Agli usi residenziali sono stati attribuiti circa un terzo dei nuovi edifici (classe 111 del consumo di suolo), il 10% dei nuovi piazzali pavimentati (classe 116) e alcuni cantieri (classe 122), mentre l'80% delle aree totali di cambiamento sono legate a usi di tipo non residenziale riconducibili, per lo più, ad attività produttive e per la logistica. Agli usi non residenziali si associano anche le classi di suolo consumato reversibile (ad esclusione della classe 122 – Strade non pavimentate), le discariche (classe 118), le serre permanenti pavimentate (classe 117). Prevale l'uso non residenziale anche per le nuove aree di cantiere, i piazzali in terra battuta (classe 122) e pavimentati (classe 116). I risultati ottenuti sulla classe devono tener conto dell'appartenenza della classe "2.8 Altri usi (Aree di transizione e cantieri)" alla macro-classe "usi non residenziali". A quest'ultima è stata ricondotta buona parte della classe cantieri (122), che rappresenta il 66% del nuovo consumo di suolo registrato tra il 2022 e il 2023 (Figura 53). In questo senso, per le future attività di monitoraggio si è ritenuto opportuno introdurre una classe dedicata alle aree di transizione per le quali non è possibile definire uno specifico uso.

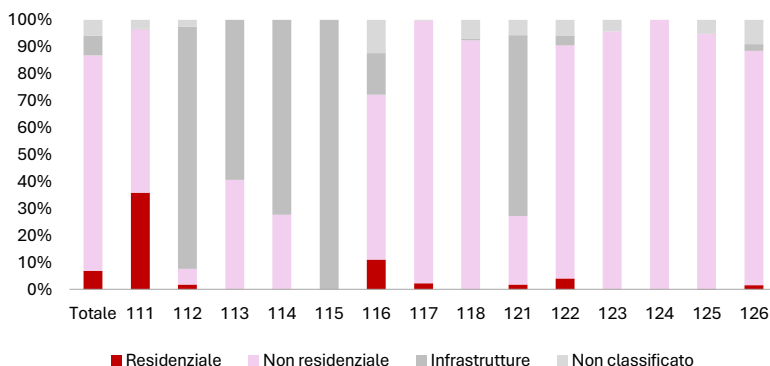


Figura 53. Uso del suolo dei nuovi poligoni di consumo di suolo mappati tra il 2022 e il 2023 a livello nazionale, espresso in termini di ripartizione percentuale per ciascuna classe di consumo di suolo rispetto a uso residenziale, non residenziale e infrastrutture.

3.1.2 Valutazione dell'SDG 11.3.1 e degli obiettivi della *Nature Restoration Regulation*

Land use efficiency secondo l'indicatore 11.3.1 degli SDG delle Nazioni Unite

La prima valutazione dell'indicatore *Ratio of Land Consumption Rate to Population Growth Rate* (RLCRPGR) è stata effettuata per il periodo di monitoraggio 2012 – 2018, con riferimento ai 1.131 comuni (il 14% del totale) classificati come “centro urbano”, “nuclei urbani densi” e “nuclei urbani semi-densi” dalla mappatura di livello comunale derivata dal continuum urbano-rurale 2018. In particolare, dei comuni considerati, 605 risultano classificati come Centro Urbano, 470 come nuclei urbani densi e 56 come nuclei urbani semi-densi. Il calcolo dell'indicatore ha fornito i valori riportati nella Figura 54, relativi ai comuni che hanno fatto registrare un incremento del consumo di suolo e, quindi, valori *Land Consumption Rate* (LCR) positivi. Nel dettaglio, 1.112 dei 1.131 comuni presentano un incremento del consumo di suolo, 6 risultano stazionari e solo 13 mostrano valori LCR negativi. L'analisi che segue si è quindi concentrata solo sui comuni con consumo di suolo in aumento ($LCR > 0$), che hanno mostrato i seguenti risultati:

In 571 comuni (il 51,3% di quelli con $LCR > 0$), l'indicatore presenta valori inferiori a 0. In queste aree, all'aumento del consumo di suolo corrisponde una diminuzione della popolazione. Nel dettaglio, nei 397 comuni con valori SDG compresi tra 0 e -1, il tasso di diminuzione della popolazione è significativamente più elevato del tasso di aumento del consumo di suolo, mentre nei 174 comuni con $SDG < -1$, l'aumento del consumo di suolo è superiore rispetto alla diminuzione della popolazione.

L'SDG presenta valori positivi in 541 comuni (il 48,6% dei comuni urbani con consumo di suolo in aumento). Circa due terzi di essi presentano valori compresi tra 0 e 1, ovvero un tasso di incremento della popolazione superiore al tasso di incremento del consumo di suolo, mentre nei restanti 164 comuni la popolazione aumenta meno dell'incremento del consumo di suolo.

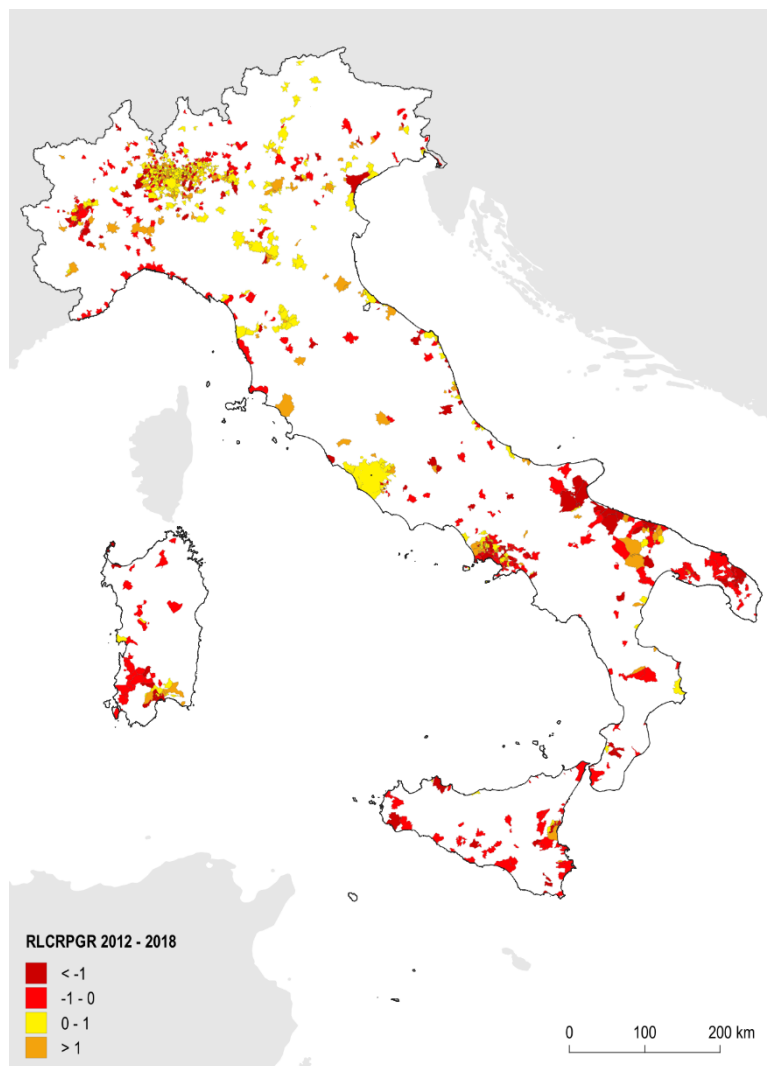


Figura 54 Valori RLCRPGR nei comuni classificati come “Centro Urbano”, “Cluster Urbano Dense” e “Cluster Urbano Semi-denso” con un aumento del consumo di suolo (LCR > 0) tra il 2012 e il 2018.

L'indicatore SDG è stato correlato con la distribuzione territoriale del consumo di suolo tra aree urbane, periurbane/suburbane e rurali,

mostrando come oltre un terzo del consumo di suolo rilevato tra il 2012 e il 2018 interessa le aree rurali (in particolare, le classi di “nuclei rurali”, “rurale a bassa densità” e “rurale a densità molto bassa”). Le classi urbane e le aree periurbane/suburbane ospitano ciascuna circa un quarto dei cambiamenti totali, mentre circa il 17% del consumo di suolo interessa le aree non residenziali per usi produttivi e commerciali.

La tendenza al consumo di suolo al di fuori delle classi urbane più dense è osservabile anche dall'analisi dei tre indicatori ancillari inediti costruiti a supporto dell'interpretazione dei risultati dell'SDG: *Normalized Difference of Consumed Land* (NDCL). I tre indicatori NDCL_u, NDCL_s, e NDCL_r, assumono valori compresi tra -1 e 1 e, per ciascun comune, hanno una somma pari a -1. L'indicatore della terna che assume il valore più alto suggerisce la tendenza prevalente del consumo di suolo a concentrarsi nelle aree urbane (prevalenza di NDCL_u, cui si associa un fenomeno di densificazione del tessuto urbano), nelle aree periurbane/suburbane (prevalenza di NDCL_s, associato a una densificazione del tessuto suburbano) o nelle aree rurali (prevalenza di NDCL_r, riconducibile ad una tendenza alla dispersione insediativa).

Il calcolo dei tre indicatori per i 1.131 comuni urbani mostra i risultati della Figura 55 e Figura 56, con una tendenza alla densificazione nei principali comuni capoluogo di provincia e alla dispersione nelle aree a bassa densità insediativa negli altri comuni.

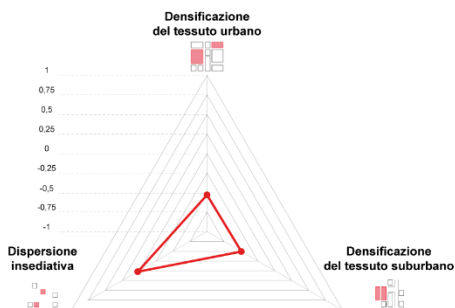


Figura 55. Tendenze insediative a scala nazionale, secondo gli indicatori NDCL

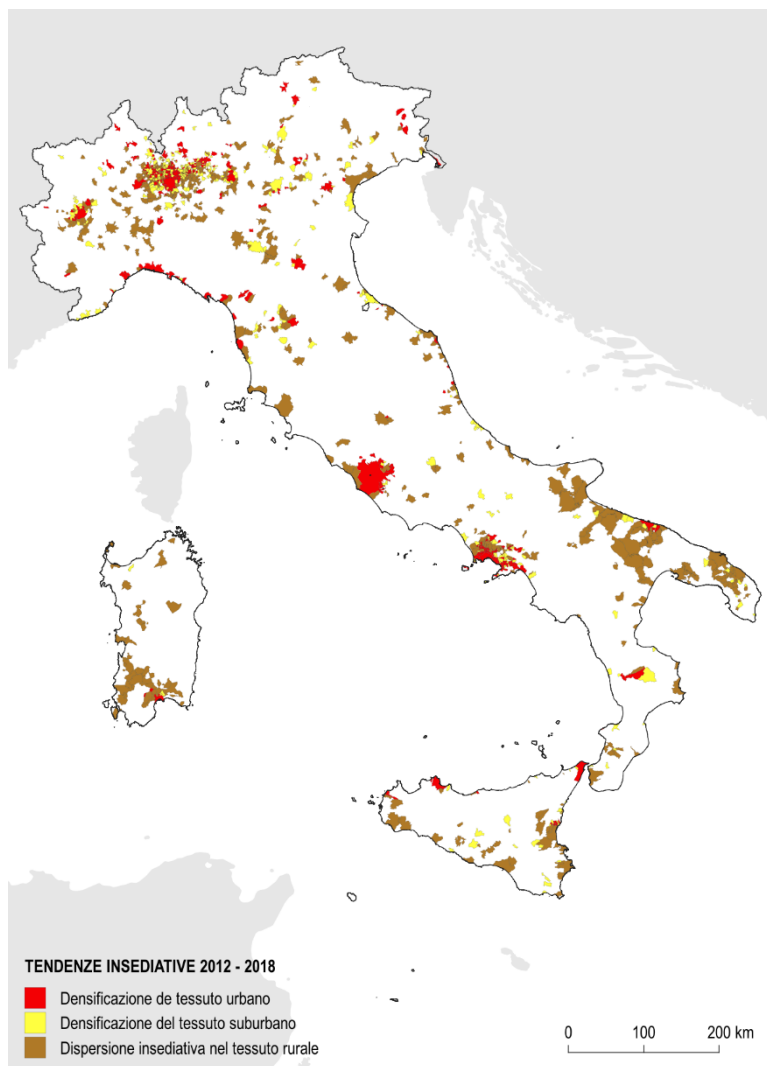


Figura 56 Valori di $NDCL_u$, $NDCL_s$ e $NDCL_r$ nei comuni classificati come “Centro urbano”, “Cluster urbano denso” e “Cluster urbano semidenso”. Ad eccezione dei capoluoghi principali, nella maggior parte dei comuni urbani il consumo di suolo avviene in aree rurali, assumendo caratteristiche di dispersione insediativa.

L'aggiornamento al 2021 dei dati di popolazione relativi alle sezioni di censimento ISTAT, e la conseguente spazializzazione rispetto alle aree edificate, hanno permesso per la prima volta di sviluppare il calcolo dell'indicatore a scala nazionale con un dettaglio superiore a quello comunale e mantenendo la coerenza temporale con le indicazioni del metadato dell'SDG, che suggerisce una valutazione su intervalli di monitoraggio di 5 o 10 anni.

In dettaglio, il calcolo dell'indicatore ha riguardato le aree classificate come "grandi centri urbani" e "nuclei urbani densi" dalla mappa del continuum urbano-rurale, elaborata su dati di popolazione 2011. All'interno di tale ambito, sono state osservate e correlate le variazioni di popolazione e di consumo di suolo registrate tra il 2011 e il 2021.

Se si escludono i 18 comuni con variazioni negative di consumo di suolo, il 56% dei comuni presenta una riduzione della popolazione, a fronte di un aumento del consumo di suolo; tale tendenza è particolarmente accentuata in 823 comuni, dove la contrazione della popolazione è molto maggiore dell'aumento del consumo di suolo (Tabella 21 e Figura 57). In quasi un quarto dei 747 comuni nei quali si ha un aumento sia di consumo di suolo che di popolazione, quest'ultima aumenta meno delle nuove coperture artificiali, mentre solo in un terzo dei casi si assiste a una crescita della popolazione paragonabile a quella del nuovo consumo di suolo.

LCRPGR	Incremento del consumo di suolo	Variazione della popolazione	n° comuni	% comuni
0 - 1	↑	↑↑	574	33,5
> 1	↑↑	↑	173	10,1
< -1	↑↑	↓	145	8,5
-1 - 0	↑	↓↓	823	48,0

Tabella 21. ripartizione dei comuni italiani (con consumo di suolo in aumento) per i diversi intervalli di valori dell'indicatore *SDG Ratio of Land Consumption Rate to Population Growth Rate* (LCRPGR). Assumendo il consumo di suolo in crescita, per valori di LCRPGR tra 0 e 1 la popolazione aumenta più (↑↑) del consumo di suolo (↑), per valori >1 il consumo di suolo aumenta più (↑↑) della popolazione (↑), per valori tra 0 e -1 la popolazione diminuisce più (↓↓) di quanto aumenta il consumo di suolo (↑) e per valori inferiori a -1 il consumo di suolo aumenta più (↑↑) di quanto diminuisce la popolazione (↓).

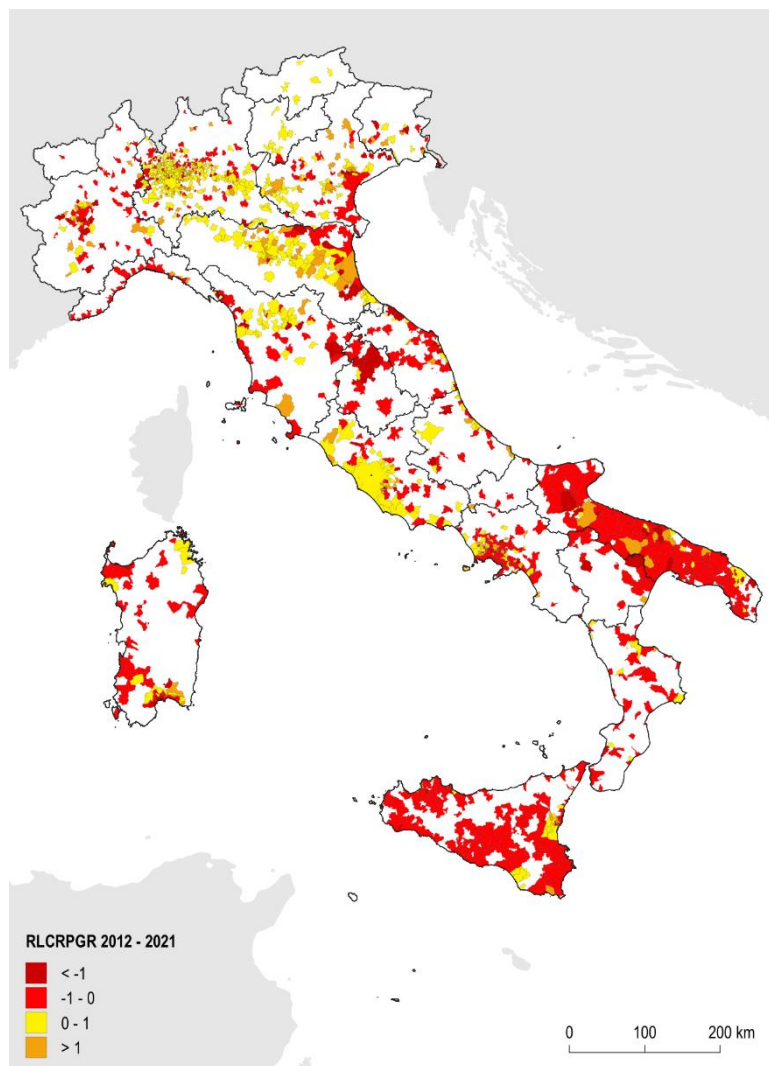


Figura 57 Valori dell'indicatore SDG 11.3.1 per il periodo 2012-2021 nei comuni classificati come "grandi centri urbani" e "nuclei urbani densi" dalla mappa del continuum urbano-rurale 2012.

Consumo di suolo e copertura del suolo negli ecosistemi urbani italiani

Ai sensi dell’articolo 3, potrebbero essere interessati dagli obblighi della *Nature Restoration Regulation* 3.178 comuni classificati come “grandi centri urbani” (classe 30), “nuclei urbani densi” (classe 23), “nuclei urbani semi-densi” (classe 22) e “suburbano o periurbano” (classe 21). I dati rilevati tra il 2022 e il 2023 mostrano una riduzione di superfici naturali dovute al consumo di suolo in più dell’80% dei “grandi centri urbani” e in più di tre quarti dei “nuclei urbani densi”, il valore sale al 94% e 89,2% se si considera il periodo 2021-2023 (Tabella 22).

	2022 - 2023					2021 - 2023			
	Totale	stabile o riduzione		Aumento		stabile o riduzione		Aumento	
	(n°)	(n°)	(%)	(n°)	(%)	(n°)	(%)	(n°)	(%)
30	516	84	16,3	432	83,7	31	6,0	485	94,0
23	1.184	289	24,4	895	75,6	128	10,8	1.056	89,2
22	562	267	47,5	295	52,5	184	32,7	378	67,3
21	916	492	53,7	424	46,3	317	34,6	599	65,4

Tabella 22. La tabella mostra il numero di comuni, divisi per classi, oggetto di monitoraggio ai sensi della *Nature Restoration Regulation*, distinti tra quelli che non hanno fatto registrare aumenti di consumo di suolo netto (stabile o riduzione) e quelli in cui è stato registrato una riduzione di superfici naturali a causa del consumo di suolo (aumento), con riferimento all’ultimo anno (2022-2023) e al periodo 2021-2023

Il 70% degli oltre 6.000 ettari di consumo di suolo rilevato tra il 2022 e il 2023 ha interessato il territorio dei comuni appartenenti alle classi urbane considerate dalla NRR (valore che sfiora l’80% del totale se si considerano anche i comuni classificati come “suburbani o periurbani”. Analizzando la distribuzione spaziale del consumo di suolo all’intero del territorio dei comuni classificati come “grandi centri urbani”, “Nuclei urbani densi” e “Nuclei urbani semi-densi”, il 20% dei cambiamenti rilevati tra il 2022 e il 2023 si concentra nei loro ecosistemi urbani (Tabella 23).

		Consumo di suolo 2022 -2023		Consumo di suolo 2022 -2023	
		[ha]	[%]	[ha]	[%]
Comuni	Urbani	4.493	69,8	9.254	67,7
	Urbani e suburbani	4.974	77,2	10.331	75,6
Ecosistemi	Urbani	877	19,5(*)	1.928	20,8(*)
	Urbani e suburbani	1.628	32,7(**)	3.533	34,2(**)

Tabella 23. Consumo di suolo registrato nell’ultimo anno (2022-2023) e tra il 2021 e il 2023 all’interno dei comuni classificati come urbani e suburbani, nel continuum urbano-rurale, e rispetto ai relativi ecosistemi urbani e suburbani. (*) indica che la percentuale è calcolata rispetto al consumo di suolo nei comuni urbani. (**) indica che la percentuale è calcolata rispetto al consumo di suolo complessivo registrato nei comuni urbani e suburbani

Come mostrato in Tabella 24 il consumo di suolo registrato all’interno degli ecosistemi urbani degli oltre 2.200 comuni classificati come “grandi centri urbani”, “nuclei urbani densi” e “nuclei urbani semi-densi” è attribuibile principalmente alla realizzazione di nuovi cantieri (+663 ettari), edifici (+146 ettari) e piazzali asfaltati (+97 ettari). Degli oltre 6.000 ettari di cantieri (classe 122) che insistono in queste aree, solo l’1% è stato ripristinato, mentre oltre 250 ettari sono stati convertiti, nell’ultimo anno, in suoli impermeabilizzati. Di questi ultimi, quasi la metà sono stati destinati a nuovi piazzali asfaltati e sul 37% sono stati realizzati nuovi edifici.

		2023																		2022	Tot
		1	11	111	112	113	114	115	116	117	118	12	121	122	123	124	125	126			
1	182.780																			0	
11		15.372												1						0	
111			194.578						1				0	12						0	
112				0	100.971				0				0	0						0	
113						6.454														0	
114							95													0	
115								1.335												0	
116				4	1				0	22.060	0			5						1	
117											29									0	
118												76								0	
12																				0	
121															1.421					0	
122															0	6.105	0			80	
123				94		34	6				119	0				593				0	
124																	105			0	
125																		92		0	
126																			141	0	
2			0	147	14	0	0	0	9	3	0	0	0	20	664	6	0	5	6	524.348	
Tot	182.780	15.372	194.823	101.023	6.460	95	1.335	22.277	32	76	197	1.441	6.787	599	105	100	151			524.431	

Tabella 24. Matrice dei cambiamenti registrati tra il 2022 e il 2023 all’interno degli ecosistemi urbani dei comuni classificati come “grandi centri urbani” “nuclei urbani densi” e “nuclei urbani semi-densi” (in ettari)

Al 2021 le aree urbane dei 2.262 comuni classificati come grandi centri urbani, nuclei urbani densi e semi-densi occupano il 3,5% della superficie totale comunale. Un sesto della loro superficie è occupata da coperture arboree e poco più di due terzi, da superfici erbacee. A livello regionale gli ecosistemi urbani della Liguria, del Trentino – Alto Adige, della Calabria, della Basilicata e della Valle d'Aosta mostrano percentuali di copertura arborea superiore al 20%, mentre in quelli dell'Emilia-Romagna, della Sardegna e del Veneto i valori sono inferiori al 10%. Quelli coperti per oltre il 50% da superfici naturali riguardano Friuli Venezia-Giulia, Trentino-Alto Adige, Valle d'Aosta, Toscana, Umbria e Veneto a nord, mentre a sud, Abruzzo, Molise, Lazio, Basilicata e Calabria (Figura 58).

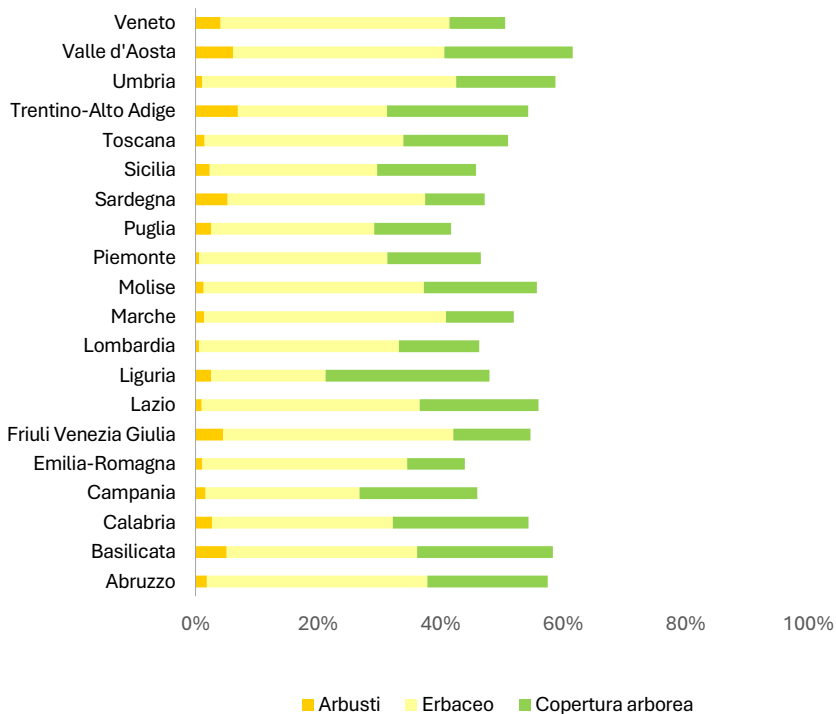


Figura 58. Superfici naturali all'interno degli ecosistemi urbani dei comuni soggetti agli obblighi della NRR, espresse in percentuale per tutte le regioni.

Discussioni

L'applicazione al contesto italiano della metodologia Eurostat/*Joint Research Centre* (JRC) per la classificazione del tessuto insediativo ha mostrato risultati incoraggianti, portando la descrizione del paesaggio urbano italiano ad un livello superiore rispetto alle mappe prodotte in precedenza dall'ISPRA, migliorando la rappresentazione rispetto ad altri dati internazionali attualmente disponibili e adattandosi alle specificità del paesaggio italiano. Le diverse rappresentazioni del tessuto insediativo sviluppate in questa ricerca costituiscono degli strumenti operativi pronti all'uso, in grado di supportare le attività di pianificazione e monitoraggio necessarie per adempiere agli obblighi introdotti dalla NRR; in particolare, il dato DEGURBA a 1 km presenta una perfetta coerenza geometrica e tematica con il modello Eurostat e con l'omologo dato a copertura globale GHS-SMOD del JRC, migliorandone la rappresentazione grazie all'utilizzo di una griglia di popolazione più aggiornata e con più elevato dettaglio spaziale e garantendo, così, informazioni spaziali più aderenti alla realtà, essenziali nell'individuazione dei comuni soggetti agli obblighi della legge. Allo stesso modo, la rappresentazione a 10 metri di risoluzione del Continuum urbano-rurale, offre una classificazione del paesaggio con alta risoluzione spaziale, di grande utilità nella perimetrazione di dettaglio degli ecosistemi urbani da includere nei piani di ripristino. Rispetto al GHS-SMOD del JRC, i dati permettono aggiornamenti annuali e l'utilizzo della Carta nazionale del Consumo di suolo offre una migliore e più accurata descrizione dello *sprinkling*, nei paesaggi rurali e periurbani italiani. Inoltre, l'introduzione della classe "aree industriali, commerciali e di servizi", che occupa l'1,47% della superficie totale nazionale, consente di comprenderne la posizione e il ruolo rispetto al contesto insediativo, costituendo un utile strumento di supporto per orientare politiche di governance finalizzate alla gestione sostenibile delle aree produttive.

La principale limitazione delle rappresentazioni è legata alla disponibilità e all'omogeneità dei dati demografici. I dati ISTAT costituiscono il riferimento nazionale per l'analisi demografica in Italia e

vengono aggiornati annualmente su scala nazionale e a livello NUTS 2, NUTS 3 e comunale. Nella prima sperimentazione, basata su dati aggregati a scala municipale, e che ha portato alla realizzazione del dato “Continuum urbano-rurale 2018”, le informazioni ad alta risoluzione sulla distribuzione delle aree edificate hanno permesso di superare i limiti connessi con la disponibilità di dati demografici più dettagliati, permettendo di ottenere un risultato comunque coerente con la mappa del JRC. In questo senso, l’attività intrapresa con ISPRA per l’introduzione degli attributi di uso alla carta nazionale del consumo di suolo gioca un ruolo fondamentale per il miglioramento dell’accuratezza. Il sistema di monitoraggio, basato su una rete di referenti del Sistema Nazionale per la Protezione Ambientale (SNPA) attivi su tutto il territorio, ha consentito di sostenere tale attività che non può prescindere e che, anzi, trae grande beneficio dalla valorizzazione dalla conoscenza approfondita delle trasformazioni in atto. Una versione dei dati di popolazione con maggiore dettaglio spaziale si riferisce alle sezioni di censimento, soggette, però, ad aggiornamenti decennali a partire dal 1991. Il dato 2021 è stato pubblicato da ISTAT in forma preliminare a luglio 2024 e ha permesso di produrre una griglia di popolazione aggiornata in grado di migliorare la mappatura del Continuum urbano-rurale 2018, soprattutto con riferimento alla distinzione tra cluster urbani a bassa densità di popolazione e ambiti periurbani, ma anche di condurre analisi di maggiore dettaglio sulle dinamiche demografiche e di trasformazione delle aree urbane, nonché di consentire il calcolo dell’indicatore SDG 11.3.1.

I dati prodotti in questa fase della ricerca hanno consentito di tracciare la morfologia del tessuto insediativo italiano secondo un sistema di classificazione condiviso a livello normativo e istituzionale, ma anche di coglierne le dinamiche di trasformazione, evidenziando una chiara tendenza alla densificazione del tessuto urbano e periurbano a cui solo raramente corrisponde una reale crescita demografica o un aumento della richiesta abitativa, ma che causa la perdita di superfici naturali e copertura arborea, compromettendone la capacità di fornire servizi ecosistemici.

In questo senso, i risultati ottenuti relativamente al monitoraggio dell'SDG a scala sub-comunale e degli obblighi previsti dalla NRR sostengono la necessità di una revisione degli attuali strumenti urbanistici, nell'ottica di azzerare la perdita netta di superfici naturali e di copertura arborea, in particolare negli ecosistemi urbani, più sensibili agli effetti dei cambiamenti climatici.

3.2 Il Paesaggio forestale nella Città Metropolitana di Roma Capitale

Questa parte del lavoro si colloca nell'ambito delle attività di aggiornamento della carta forestale su base tipologica della regione Lazio. La metodologia è stata applicata, in via sperimentale, sull'area della Città Metropolitana di Roma e ha portato alla produzione di tre strati informativi, due dei quali inediti, realizzati in formato *raster* a 10 metri di risoluzione:

- La mappa delle tipologie e categorie forestali (precedentemente disponibile rispetto al 2011, è stata aggiornata dal punto di vista delle geometrie, distinguendo, inoltre, le categorie relative ad alberi e arbusti in area agricola e in area urbana);
- La mappa dei boschi e degli Alberi Fuori Foresta;
- La mappa della densità media della copertura arborea.

Di seguito vengono mostrati i risultati ottenuti sia in termini quantitativi che qualitativi, confrontando lo strato relativo al 2011 con l'aggiornamento basato sulla mappa CLC *Plus Backbone* al 2018.

3.2.1 Categorie e tipologie forestali

L'aggiornamento della carta forestale su base tipologia per l'area della Città Metropolitana di Roma Capitale (CMRC) è mostrato in Figura 59.

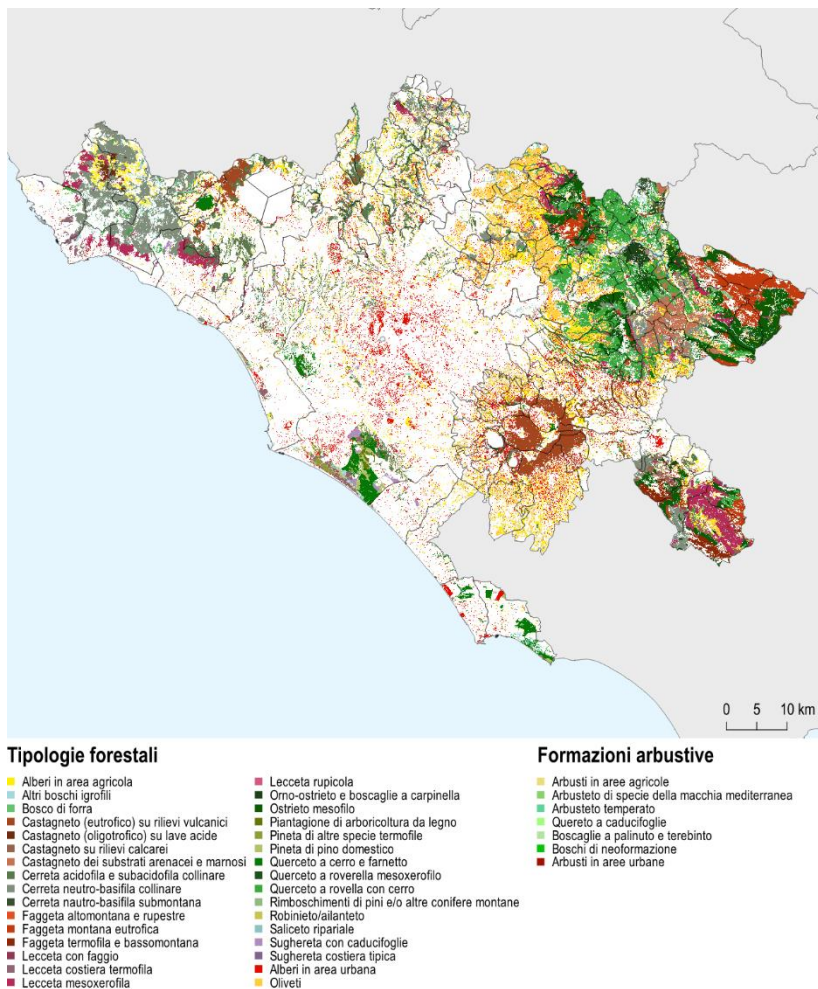


Figura 59. Mappa delle tipologie forestali e delle formazioni arboree nella Città Metropolitana di Roma Capitale al 2018.

La copertura arborea occupa poco meno di due quinti della CMRC (Tabella 25); il 47% si trova in pianura, quasi un terzo in collina e un quarto sui rilievi montani.

Poco meno di un quarto della copertura arborea è costituito da alberi in area urbana e in area agricola (rispettivamente, il 10,7 e il 13,3% del totale della copertura arborea). Le Cerrete rappresentano quasi un quinto di tutta la copertura forestale metropolitana, mentre gli oliveti poco meno dell'8%, concentrandosi soprattutto nei comuni di Palombara Sabina (9,4%), Montelibretti (8,1%), Tivoli (6,3%), Moricone (6%), Velletri (5,2%) e Nerola (5%) (Figura 60).

Le altre categorie forestali presenti nelle aree naturali in misura superiore al 5% sono, nell'ordine, i Castagneti (9,3%), gli Ostrieti (9%), le Leccete (7%) e le Faggete (6%). Le Leccete e gli Ostrieti si trovano soprattutto nelle aree montane, in particolare, nei comuni di Carpineto Romano (il 20% delle Leccete) e Vallepietra (il 14% degli Ostrieti), mentre i Castagneti nelle aree collinari (63%) dei comuni di Rocca di Papa (11%), Bracciano e Velletri (8%).

ID	Tipologia	Categoria	Superficie		
			[ha]	[%]	[%]*
0	Altre aree non classificate come copertura arborea	Copertura non arborea	323.461	60,3	-
2	Alberi in area agricola	Alberi in area agricola	28.352	5,3	13,3
10	Altri boschi igrofili	Altri boschi igrofili	4.858	0,9	2,3
15	Bosco di forra	Bosco di forra	794	0,1	0,4
16	Castagneto (eutrofico) su rilievi vulcanici	Castagneto	12.638	2,4	5,9
17	Castagneto (oligotrofico) su lave acide		383	0,1	0,2
18	Castagneto su rilievi calcarei		1.788	0,3	0,8
19	Castagneto dei substrati arenacei e marnosi		4.898	0,9	2,3
20	Cerreta acidofila e subacidofila collinare	Cerreta	16.489	3,1	7,8
22	Cerreta neutro-basifila collinare		22.607	4,2	10,6
23	Cerreta neutro-basifila submontana		1.593	0,3	0,7
24	Faggeta altomontana e rupestre	Faggeta	65	0,0	0,0

25	Faggeta montana eutrofica		10.239	1,9	4,8
26	Faggeta termofila e bassomontana		2.236	0,4	1,1
27	Lecceta con faggio		5	0,0	0,0
28	Lecceta costiera termofila	Lecceta	1.785	0,3	0,8
29	Lecceta mesoxerofila		12.439	2,3	5,9
30	Lecceta rupicola		74	0,0	0,0
31	Orno-ostrieto e boscaglie a carpinala	Ostrieto	1.696	0,3	0,8
32	Ostrieto mesofilo		17.099	3,2	8,0
33	Piantagione di arboricoltura da legno	Piantagione di arboricoltura da legno	553	0,1	0,3
34	Pineta di altre specie termofile	Pineta termofila	519	0,1	0,2
35	Pineta di pino domestico		1.961	0,4	0,9
37	Querceto a cerro e farnetto	Cerreta	5.337	1,0	2,5
39	Querceto a roverella mesoxerofilo	Querceto a roverella	504	0,1	0,2
40	Querceto a roverella con cerro		22.169	4,1	10,4
41	Rimboschimenti di pini e/o altre conifere montane	Rimboschimenti di pini e/o altre conifere montane	1.038	0,2	0,5
42	Robinieta/ailanteto	Robinieta/ailanteto	367	0,1	0,2
43	Saliceto ripariale	Saliceto ripariale	33	0,0	0,0
44	Sughereta con caducifoglie	Sughereta	1.004	0,2	0,5
45	Sughereta costiera tipica		85	0,0	0,0
99	Alberi in area urbana	Alberi in area urbana	22.693	4,2	10,7
299	Oliveto	Oliveto	16.250	3,0	7,6
Totale			536.012		
Totale copertura arborea			212.550	39,7	

Tabella 25. Composizione della copertura arborea in tipologie e categorie forestali nella Città Metropolitana di Roma Capitale al 2018. La colonna contrassegnata da asterisco (*) fa riferimento alla percentuale di ciascuna classe rispetto al totale della copertura arborea.

Le formazioni arbustive occupano poco meno del 2% della superficie metropolitana e per due terzi ricadono in area agricola, soprattutto nei comuni di Velletri (17%), Lanuvio (12%) e Roma (11%). Poco più di un quarto sono Arbusteti temperati rintracciabili, prevalentemente nei comuni di Tolfa (12%), Nettuno (7%), Bracciano e Allumiere (6%). Poco meno del 10% sono arbusti in area urbana (Tabella 26).

ID	Formazioni arbustive	Superficie		
		[ha]	[%]	[%]*
0	Altre aree non classificate come formazioni arbustive	527.396	98,4	-
2	Arbusti in aree agricole	5.243	1,0	60,9
11	Arbusteto di specie della macchia mediterranea	181	0,0	2,1
12	Arbusteto temperato	2.284	0,4	26,5
13	Querceto a caducifoglie	16	0,0	0,2
14	Boscaglie a palinuro e terebinto	93	0,0	1,1
36	Boschi di neoformazione	5	0,0	0,1
99	Arbusti in aree urbane	794	0,1	9,2
Totale		536.012		
Totale formazioni arbustive		8.615		1,6

Tabella 26. Composizione della copertura arbustiva in tipologie forestali nella Città Metropolitana di Roma Capitale

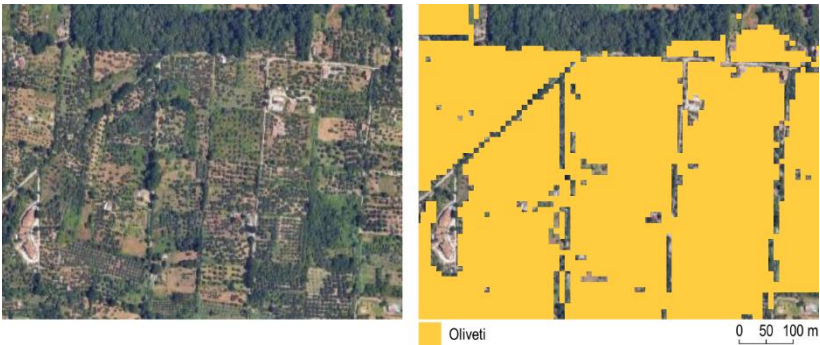


Figura 60. Esempio di mappatura degli oliveti nel comune di Guidonia Montecelio.

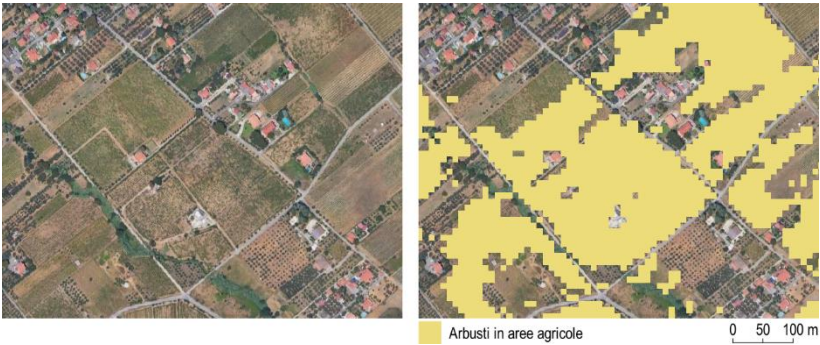


Figura 61. Esempio di mappatura dei vigneti nel comune di Frascati.

Nel confronto tra i due dati occorre tenere presente le diverse caratteristiche geometriche: la carta forestale al 2011 deriva da dati vettoriali CLC, con MMU di 25 ettari, mentre il CLC *Plus Backbone* ha una risoluzione orizzontale di 10m. Tale differenza incide soprattutto nella lettura dei flussi da e verso la classe “Altre superfici non classificate come copertura arborea ed arbustiva” (codice 0) della mappa aggiornata. La maggiore risoluzione spaziale del CLC *Plus Backbone*, unitamente all’introduzione della carta di uso del suolo di ISPRA, consente di migliorare la perimetrazione delle classi rispetto al CLC, evitando la sovrastima e la confusione tra tipologie forestali diverse. In questo senso, la nuova mappa introduce oltre 72.000 ettari di nuovi alberi e arbusti non mappati dalla carta precedente, riconducibili per la gran parte all’introduzione delle classi relative agli “Alberi o arbusti in area agricola” (codice 2, quasi 25.000 ettari), oliveti (codice 299, 15.000 ettari), e “Alberi in area urbana” (20.000 ettari, codice 99) (Figura 62).

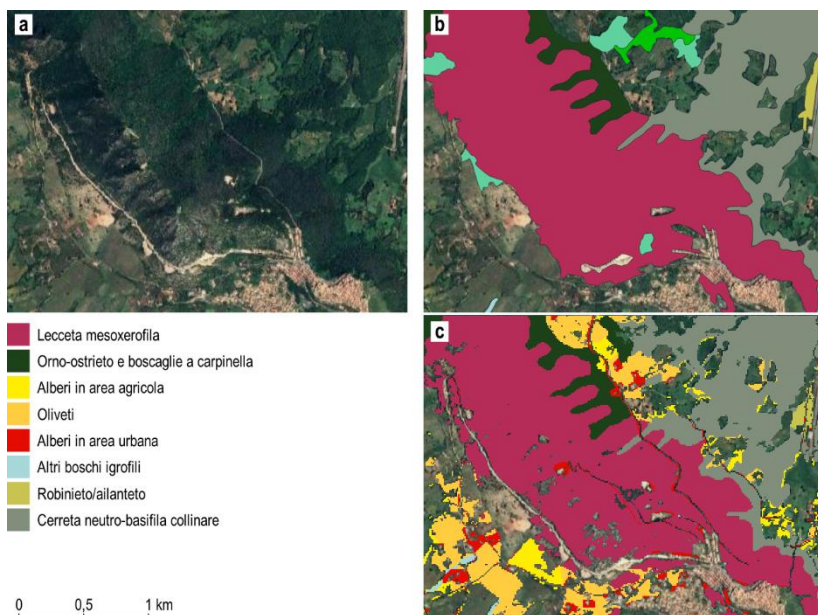


Figura 62. Confronto tra la mappa delle tipologie forestali 2011 (b) e l’aggiornamento basato sul dato CLC Plus Backbone (c).

I flussi maggiori si osservano tra le classi delle formazioni arbustive (codici 12,13,14 e 36) verso le formazioni arboree. La classe “Arbusteto temperato” (codice 12) è quella che mostra le variazioni maggiori con oltre la metà della superficie classificata come albero dal CLC *Plus Backbone*. Anche in questo caso, le variazioni sono da ricondurre, prevalentemente, all’aumento di risoluzione spaziale; gli esempi riportati (Figura 63) mostrano la capacità del CLC *Plus Backbone* di individuare alberi all’interno dei poligoni classificati come formazioni arbustive” dalla carta forestale del 2011. Il 33% della classe “Arbusteto temperato” è stata attribuita per prossimità alla tipologia forestale “Querceto a roverella con cerro”, e un ulteriore 28% alla categoria “Cerreto”.

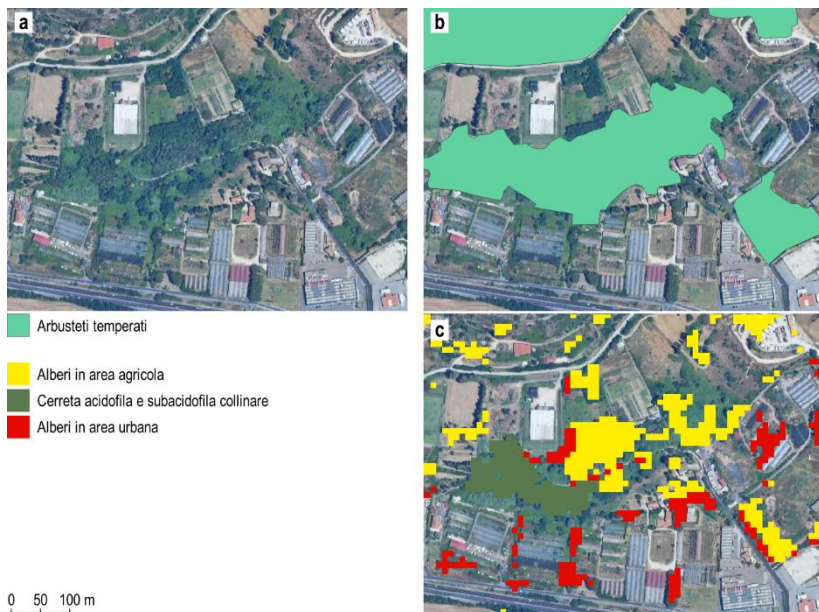


Figura 63. Confronto tra la mappa delle tipologie forestali su base CORINE Land Cover 2011 (b) e l’aggiornamento al 2018 basato sul dato CLC *Plus Backbone* (c) – individuazione delle formazioni arboree all’interno della classe arbusti della mappa precedente e attribuzione della tipologia forestale.

3.2.2 Boschi e Alberi Fuori Foresta

Il primo strato inedito messo a punto nell'ambito dell'aggiornamento della carta forestale su base tipologia per l'area della Città Metropolitana di Roma Capitale (CMRC), è la mappa dei boschi e degli Alberi Fuori Foresta (AFF) mostrata in Figura 64.

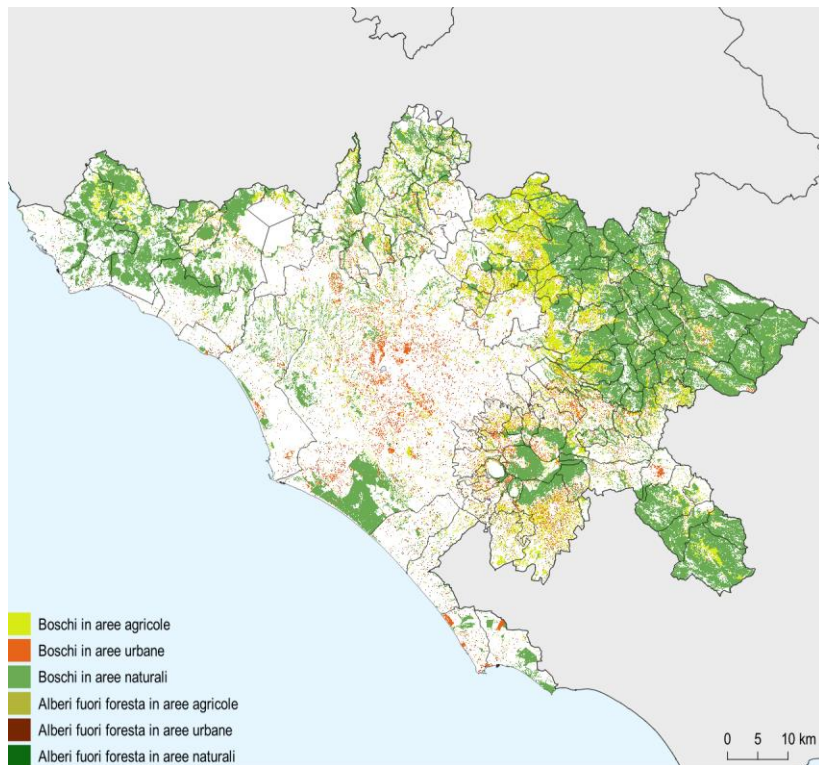


Figura 64 Mappa dei boschi e degli alberi fuori foresta nella Città Metropolitana di Roma Capitale al 2018

Dall'analisi della carta, i boschi occupano una superficie di oltre 200.000 ettari, pari a poco meno del 40% della superficie metropolitana e al 96% di tutta la copertura arborea (Tabella 28). Il 74% di essi appartengono a contesti per lo più naturali, mentre poco più di un quinto si riferisce agli ambiti ad elevata naturalità all'interno degli ecosistemi

agricoli. Il 4%, pari a poco più di 7.500 ettari, sono boschi inseriti all'interno del tessuto urbano (Figura 65).



Figura 65. Esempi di mappatura dei boschi: (a) Bosco urbano di Villa Albani Torlonia nel comune di Roma; (b) formazioni boschive a ridosso dei fossi in contesti agricoli; (c) Oasi WWF di Macchiagrande.

La superficie caratterizzata da AFF copre oltre 9.000 ettari, pari al 4% della copertura arborea totale e al 2% della superficie metropolitana (Tabella 28). Oltre due quinti degli AFF (poco più di 4.000 ettari), è rintracciabile all'interno degli ecosistemi agricoli, mentre quasi la metà è localizzata nei contesti più artificializzati. Negli ambiti naturali, gli AFF sono meno diffusi (in tale ambito d'uso ricade poco meno del 10% della classe) (Figura 65).

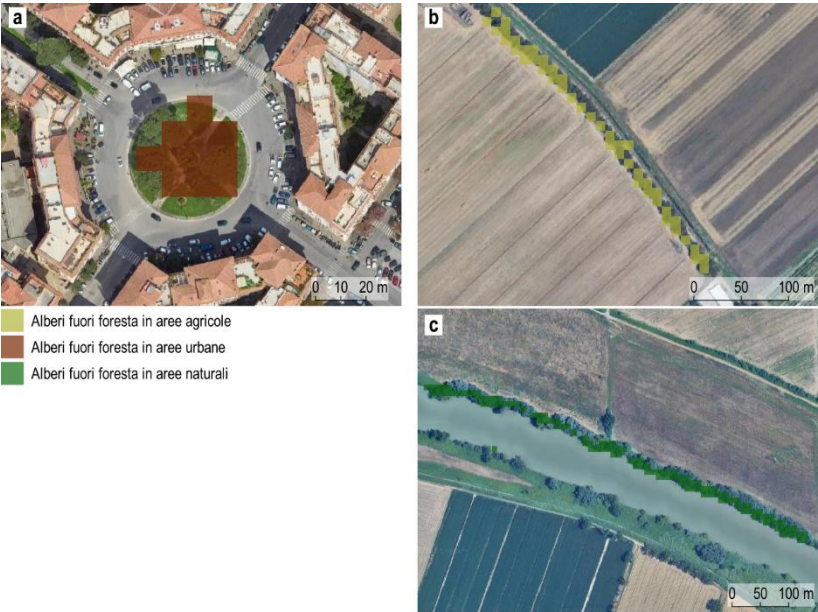


Figura 66. Esempi di mappatura degli Alberi Fuori Foresta: (a) Alberi all'interno di una rotonda viaria vegetata; (b) filari alberati lungo il perimetro di un campo agricolo; (c) filari alberati lungo le sponde del fiume Tevere.

Codice	Classe	Superficie			
		[ha]	[%]	[%]*	[%]**
0	Altre aree non classificate	323.462	60,3	-	-
12	Boschi in aree agricole	40.563	7,6	19,1	20,0
13	Boschi in aree naturali	144.353	26,9	67,9	71,0
19	Boschi in aree urbane	18.339	3,4	8,6	9,0
1	Boschi	203.255	37,9	95,6	
22	AFF in aree agricole	4.038	0,8	1,9	43,4
23	AFF in aree naturali	903	0,2	0,4	9,7
29	AFF in aree urbane	4.354	0,8	2,0	46,8
2	AFF	9.295	1,7	4,4	
Totale		536.012			
Totale copertura arborea		212.550		39,7	

Tabella 28. Boschi Alberi Fuori Foresta all'interno della Città Metropolitana di Roma Capitale in ettari e in percentuale. (*) percentuale rispetto alla copertura arborea totale. (**) percentuale rispetto alla macro-classe Bosco e Alberi Fuori Foresta.

3.2.3 Densità della copertura arborea

Il secondo strato ausiliario messo a punto nell'ambito dell'aggiornamento della carta forestale su base tipologia per l'area della Città Metropolitana di Roma Capitale (CMRC) è la mappa della densità media della copertura arborea, mostrata in Figura 67.

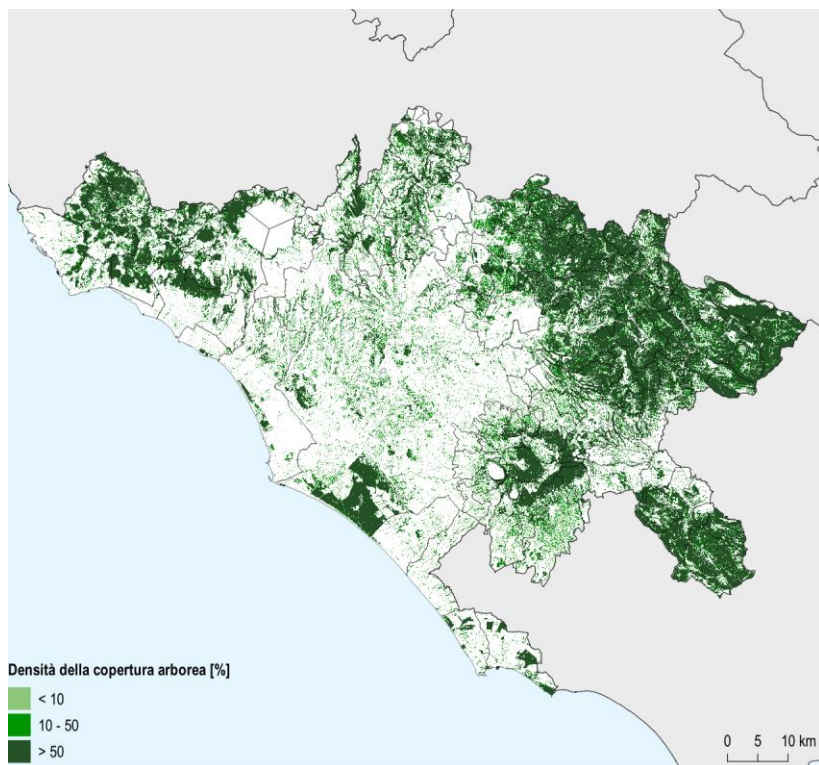


Figura 67 Mappa della densità della copertura arborea al 2018 nella Città Metropolitana di Roma Capitale

Confrontando lo strato con la mappa dei boschi e degli AFF, a livello metropolitano, quasi tre quarti dei boschi e degli AFF presentano, entro un raggio di 300m, una elevata densità di copertura arborea (> 50%) e per poco meno di un quarto la densità è compresa tra il 10% e il 50% (media densità). Per definizione, i boschi sono caratterizzati da valori di

densità della copertura arborea elevati o medi, mentre per gli AFF si registrano generalmente valori di densità inferiori al 10% (Figura 68 e Tabella 29) Valori medi si osservano soprattutto in corrispondenza di alberi distribuiti lungo i fossi minori in contesti prevalentemente agricoli.

	Bassa densità		Media densità		Alta densità		Totale
Boschi e AFF	[ha]	[%]	[ha]	[%]	[ha]	[%]	[ha]
Boschi in ambito agricolo	1.477	3,6	17.815	43,9	21.271	52,4	40.563
Boschi in ambito urbano	1.401	7,6	12.153	66,3	4.786	26,1	18.339
Boschi in ambito naturale	274	0,2	16.537	11,5	127.542	88,4	144.353
Alberi Fuori Foresta in ambito agricolo	2.448	60,6	1.549	38,4	41	1,0	4.038
Alberi Fuori Foresta in ambito urbano	3.014	69,2	1.334	30,6	6	0,1	4.354
Alberi Fuori Foresta in ambito naturale	300	33,2	577	63,9	26	2,9	903
Totale	8.913	4,2	49.965	23,5	153.672	72,3	212.550

Tabella 29. Boschi e Alberi Fuori Foresta per fasce di densità della copertura arborea in ettari e percentuale.



Figura 68 Esempio di caratterizzazione della copertura arborea in termini di densità, nell'area urbana del comune di Roma, tra Villa Ada e il lungo fiume Aniene.

Discussioni

Il Testo unico in materia di foreste e filiere forestali (TUFF, d.lgs. n. 34/2018) prevede la promozione della conoscenza e il monitoraggio del patrimonio forestale nazionale e dei suoi ecosistemi (art. 2), che può essere perseguita sia realizzando una carta forestale digitale, sia attraverso l'implementazione dell'inventario forestale nazionale (art. 15). I dati di copertura e uso del suolo offerti dal Programma Copernicus costituiscono un importante strumento a supporto dello sviluppo di metodologie per migliorare e aggiornare il contenuto informativo degli strati CORINE di prima generazione (e, di conseguenza, dei prodotti che derivano e approfondiscono tematismi specifici del CLC, come la carta forestale su base tipologica della regione Lazio del 2011), costituendo un elemento cruciale e strategico per rispondere in modo efficace ed efficiente alle esigenze di monitoraggio previste a livello europeo, in termini di frequenza di aggiornamento, livello di dettaglio spaziale e tematico. In questo lavoro, lo strato CLC *Plus Backbone* al 2018 ha permesso di aggiornare l'informazione sulla distribuzione della copertura arborea e arbustiva nella CMRC tramite la definizione di una metodologia agile ed economica, facilmente replicabile e scalabile, attraverso la quale è stato possibile migliorare la perimetrazione degli ambiti forestali e di rappresentare la copertura arborea anche in aree precedentemente omesse dalla carta forestale regionale per via dei limiti geometrici del CORINE Land Cover, tra le quali le "foreste urbane" e le superfici arborate in area agricola. Il miglioramento della rappresentazione geometrica della copertura arborea è stato svolto preservando il massimo dettaglio tematico offerto dalla mappa regionale del 2011 e permettendo di ottenere un primo strato in grado di descrivere la copertura arborea e arbustiva al 2018 con una risoluzione di 10m e massimo dettaglio tematico a 39 classi. La risoluzione spaziale più elevata ha permesso, inoltre, di introdurre uno strato informativo inedito che, a partire dalla definizione di bosco stabilita nel Testo Unico in materia di Foreste e filiere Forestali (TUFF), permette di distinguere i boschi dagli AFF e di caratterizzarli in funzione del contesto paesaggistico di riferimento. Questa sperimentazione ha il potenziale per assumere particolare importanza anche nell'ambito della

contabilità degli ecosistemi (*Ecosystem Accounting*) prevista per tutti gli Stati Membri dell'Unione Europea secondo l'approccio spaziale adottato dal *System of Environmental Economic Accounting* (SEEA). Il primo dei cinque "Conti" previsti dal SEEA riguarda proprio la valutazione dell'estensione degli ecosistemi (*Ecosystem Extent*) tra i quali, quelli forestali. Questi ultimi devono essere classificati per tipo all'interno di una specifica area e monitorati per il periodo di contabilità in modo da individuare eventuali cambiamenti di estensione o flussi da un tipo di ecosistema ad un altro. In questo senso, il dato CLC *Plus Backbone* si presta anche alla possibilità di individuare eventuali variazioni, grazie all'elevata frequenza di aggiornamento.

3.3 Strategie di forestazione urbana: indicatori per la mitigazione efficace dell'isola di calore

La letteratura disponibile sui benefici delle aree verdi e, in particolare, della copertura arborea in ambito urbano e periurbano per la mitigazione del clima, si riferisce per lo più a singoli comuni o province, mentre sono disponibili meno esperienze che analizzano il fenomeno SUHI a scala vasta. Studi precedenti condotti a scala nazionale dall'ISPRA hanno utilizzato le immagini satellitari a 1 km provenienti dalla missione MODIS che, comunque, non permettono di ottenere informazioni di dettaglio. Al fine di produrre una base dati condivisa e omogenea per supportare la Pubblica Amministrazione nell'individuazione degli interventi di forestazione, è necessario sviluppare mappe ad elevata risoluzione spaziale e indicatori rilevanti per l'intero territorio nazionale. In tal senso, in questa parte della ricerca è stata prodotta una mappa della temperatura media diurna estiva al suolo per il territorio italiano che aumenta il dettaglio di oltre 30 volte rispetto al dato messo a punto in precedenza dall'ISPRA. Questo lavoro si inserisce, in primo luogo, nell'ambito delle attività di ricerca condotte in collaborazione con l'Istituto sugli impatti del consumo di suolo, che hanno, poi, trovato spazio nel progetto MIRIFICUS, promosso dal Dipartimento IBE del CNR che ha l'obiettivo di mettere a punto strati informativi geografici di elevato dettaglio e di renderli disponibili in formato *Open-Source* per la Pubblica Amministrazione (PA) per valutare e programmare interventi di forestazione finalizzati a mitigare gli effetti connessi con i cambiamenti climatici soprattutto all'interno dei paesaggi urbani.

3.3.1 Carta nazionale della temperatura media diurna estiva al suolo

La mappa di temperatura media diurna estiva al suolo a 30 metri di risoluzione, messa a punto per l'intero territorio nazionale a partire dall'integrazione di dati Landsat 8, Landsat 9 e MODIS, è mostrata in Figura 69.

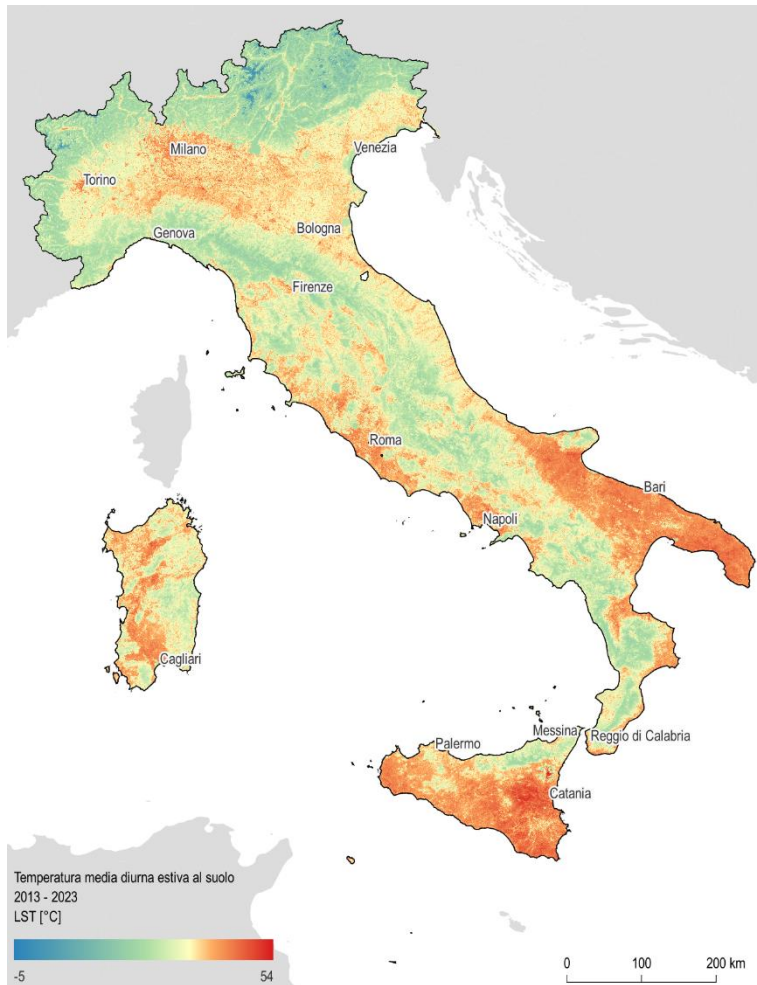


Figura 69. Temperatura (LST) media diurna estiva [°C] per gli anni dal 2013 al 2023.

Mese di acquisizione 2013 - 2023	Piattaforma satellitare	
	Landsat 8 [n]	Landsat 9 [n]
Giugno	914	165
Luglio	1.049	193
Agosto	1.025	187

Tabella 30. Numero di immagini con copertura nuvolosa inferiore al 60% acquisite dai due satelliti per ogni mese sull'intero territorio nazionale

Un primo confronto ha riguardato le aree prive di informazioni e la loro distribuzione sul territorio nazionale. Come mostrato in Tabella 31, mentre per il dato MODIS non si osservano lacune, lo strato LST ottenuto dalla raccolta di scene Landsat 8 e Landsat 9 estive relative al 2023, presenta buchi informativi che interessano l'1,42% del territorio nazionale e si riducono di 92 punti percentuali aumentando il periodo di acquisizione a dieci anni. Questi ultimi sono prevalentemente distribuiti sull'arco alpino e sui principali rilievi della catena appenninica. Le cause sono legate sia alla maggiore presenza di nuvole sulle scene che alle lacune dei dati ancillari utilizzati dall'USGS per derivare il dato di temperatura al suolo.

Periodo di acquisizione	Piattaforma satellitare	
	Landsat [n] [%]	MODIS [n] [%]
1 anno*	68.094 [1,42]	-
10 anni	5.298 [0,1]	-

Tabella 31 Vengono riportati il numero dei pixel con valori nulli per periodo di acquisizione e piattaforma satellitare e la percentuale rispetto al totale nazionale. *Si fa riferimento alle scene Landsat acquisite per la stagione estiva (da giugno ad agosto) del 2013.

Indipendentemente dal periodo di acquisizione, l'analisi di correlazione mostra una robusta relazione tra le variabili. Tuttavia, si osserva un rafforzamento significativo estendendo il periodo di acquisizione delle scene Landsat, come indicato dall'aumento del valore del coefficiente di determinazione R^2 , da 0,872 a 0,9104 (Figura 70 e Figura 71).

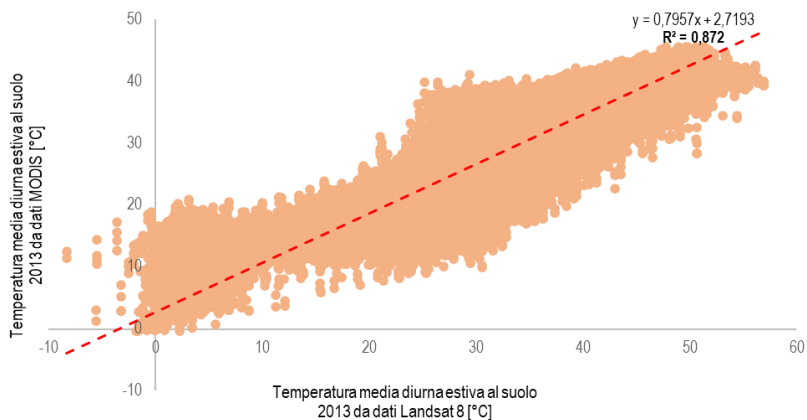


Figura 70 Correlazione tra le temperature medie diurne estive al suolo ottenute da dati Landsat e quelle ottenute da dati MODIS considerando le immagini acquisite durante la stagione estiva del 2013.

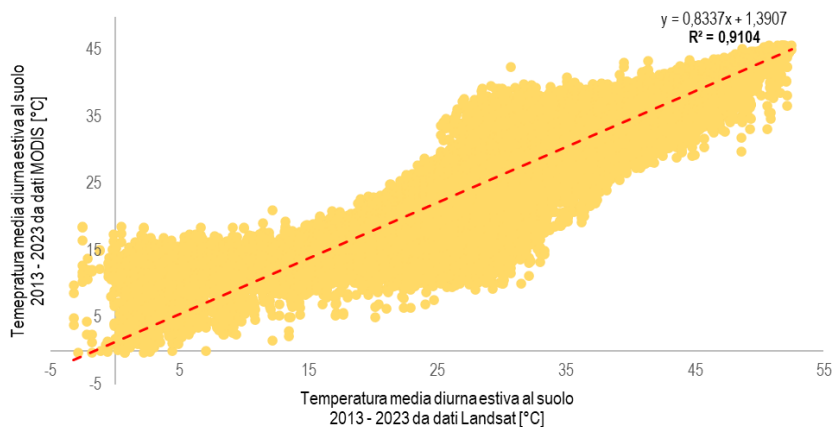


Figura 71. Correlazione tra le temperature medie diurne estive al suolo ottenute da dati Landsat e quelle ottenute da dati MODIS considerando le immagini acquisite durante le stagioni estive dal 2013 al 2023.

3.3.2 Il fenomeno isola di calore urbana in Italia

La mappa del “Grado di Artificializzazione e Densità della copertura Arborea” (GADA) messa a punto per studiare il fenomeno SUHI sul territorio italiano è mostrata in Figura 72.

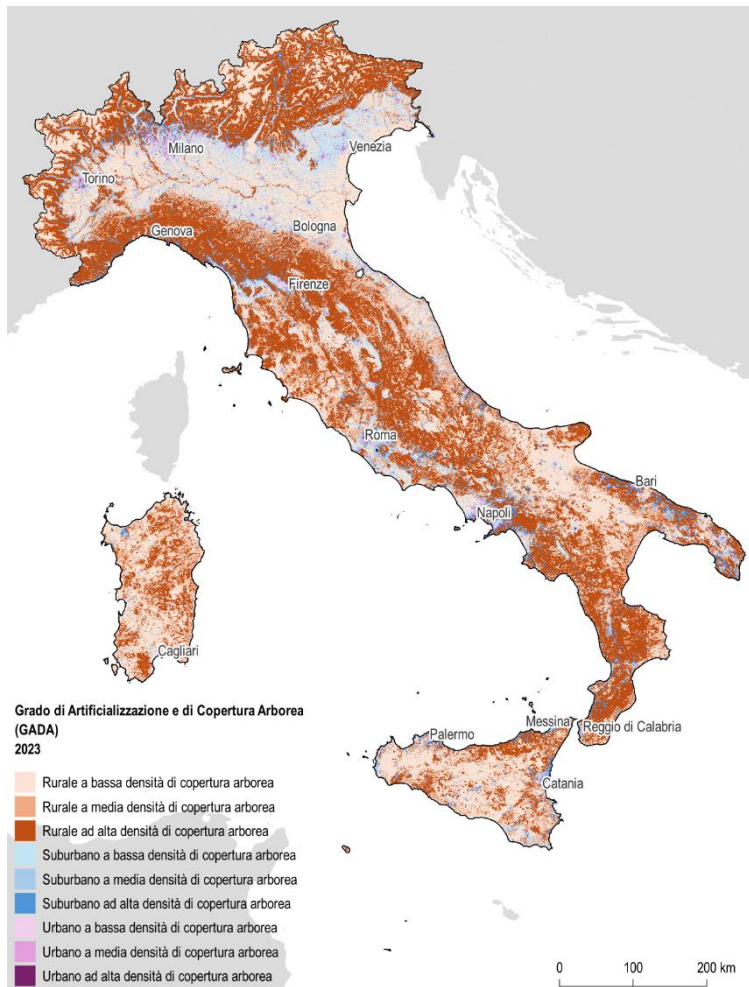


Figura 72. Grado di urbanizzazione e di copertura arborea (GADA) 2023.

Distribuzione delle classi del GADA

A livello nazionale solo l'11% delle aree urbane presentano una densità di copertura arborea superiore al 50%, mentre in più della metà, è compresa tra il 10% e il 50%. Oltre due quinti delle aree suburbane sono caratterizzate da bassa densità di copertura arborea e il 90% delle aree con elevata densità di superfici arboree si trova in contesti rurali; quasi la metà a quote superiori a 600 metri (Tabella 32).

Classi GADA	Pianura		Collina		Montagna		Totale	
	[ha]	[%]	[ha]	[%]	[ha]	[%]	[ha]	[%]
11 Bassa densità CA	5.175.473	59,4	1.447.411	16,6	2.092.575	24,0	8.715.460	35,4
12 Media densità CA	2.508.298	46,4	1.470.055	27,2	1.422.406	26,3	5.400.759	22,0
13 Alta densità CA	2.168.541	20,7	2.838.804	27,1	5.477.902	52,2	10.485.247	42,6
Rurale	9.852.312	40,0	5.756.271	23,4	8.992.883	36,6	24.601.466	
21 Bassa densità CA	1.777.199	87,8	169.317	8,4	77.985	3,9	2.024.501	43,5
22 Media densità CA	1.027.098	68,5	320.868	21,4	151.530	10,1	1.499.496	32,2
23 Alta densità CA	587.434	51,9	364.233	32,2	180.614	16,0	1.132.281	24,3
Suburbano	3.391.731	72,8	854.419	18,3	410.129	8,8	4.656.279	
31 Bassa densità CA	308.140	93,3	17.329	5,2	4.962	1,5	330.431	37,4
32 Media densità CA	403.485	88,1	43.722	9,5	10.680	2,3	457.886	51,8
33 Alta densità CA	76.783	79,9	15.151	15,8	4.117	4,3	96.051	10,9
Urbano	788.408	89,1	76.202	8,6	19.759	2,2	884.369	
Totale	14.032.451	46,6	6.686.892	22,2	9.422.771	31,3	30.142.113	

Tabella 32. Superfici in ettari e percentuale delle classi del Grado di Artificializzazione e Densità della copertura arborea per classe altimetrica

Nelle 14 città metropolitane le classi più estese sono quelle rurali con bassa e media densità di copertura arborea fatta eccezione per le città metropolitane di Genova, Firenze e Reggio Calabria, che per oltre il 50% sono descritte dalla classe rurale a densità di copertura arborea elevata. Le città che mostrano i valori più elevati di ambiti ad elevata densità di superfici artificiali sono Milano e Napoli (Figura 73). In queste ultime, le aree con alta densità di copertura arborea rappresentano, rispettivamente, il 7% e poco meno di un terzo delle aree urbane. Valori più elevati si rilevano solo nelle aree urbane di Genova e Palermo (Figura 74).

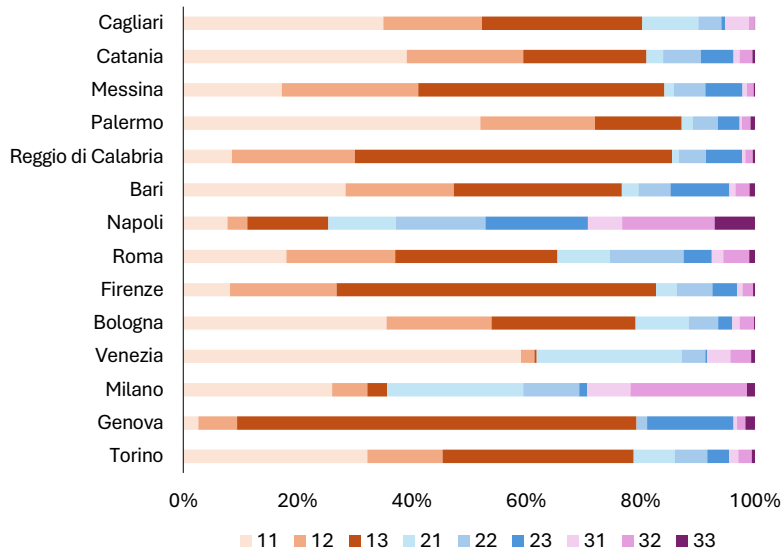


Figura 73. Composizione delle 14 Città Metropolitane in classi di grado di artificializzazione e densità della copertura arborea.

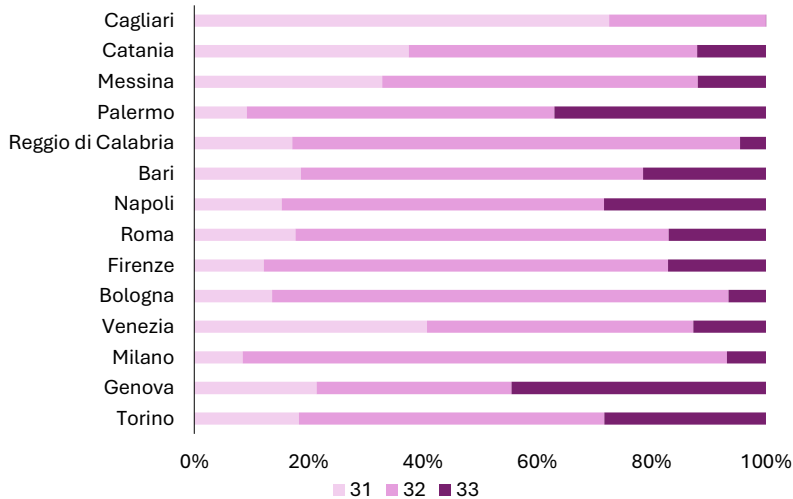


Figura 74. Superficie in percentuale delle tre classi di densità della copertura arborea nelle aree urbane delle 14 città metropolitane

Valutazione dell'isola di calore urbana in Italia

Confrontando le temperature medie diurne estive rilevate nelle diverse classi di densità di superfici artificiali, sebbene le singole province mostrino comportamenti anche molto condizionati dalle caratteristiche morfologiche e climatiche del territorio, nel complesso la temperatura nelle aree urbane risultano più alta di quella delle aree rurali in tutte le province del Nord e del Centro, mentre valori negativi (cioè temperature più basse nelle aree urbane rispetto alle aree rurali) si registrano in alcune province di Puglia e Sicilia, dove la LST nei mesi estivi è influenzata dalle particolari condizioni climatiche ma soprattutto dalla presenza di vaste aree agricole nell'intorno delle aree urbane, caratterizzate da una scarsa densità di copertura arborea e suoli nudi durante il periodo estivo.

La tendenza delle aree urbane a presentare temperature maggiori si riscontra anche analizzando i valori registrati nelle due fasce altimetriche. A quote più elevate la differenza media tra aree urbane e rurali è di 6,6°C, mentre in pianura è di 4,3°C e anche in questo caso valori negativi si registrano in alcune province della Puglia e della Sicilia. In pianura, le differenze maggiori si osservano nelle province del Nord e in particolare in quelle della Lombardia e del Trentino-Alto Adige con variazioni di oltre 10°C.

Le differenze di temperatura sono più contenute se si considera la variazione rilevata tra aree suburbane e rurali, e si registra circa 1°C di differenza al di sotto di 200 m e 1,6°C tra 200 e 600 m di altitudine.

Per valutare quanto la presenza delle aree arborate influisca sul microclima urbano, sono state calcolate le differenze di temperatura tra le aree con densità di copertura arborea elevata e quelle con densità di copertura arborea media o bassa, al variare delle fasce di altitudine e della densità di superfici artificiali (Tabella 33). A livello nazionale si rileva la tendenza delle aree arborate ad avere temperature inferiori rispetto alle aree con vegetazione scarsa o assente. La capacità delle superfici arborate di abbattere le temperature è particolarmente evidente nelle aree urbane (nelle quali si registra una variazione media

tra aree arborate e non arborate di 1,2 °C), e nelle aree rurali (dove la presenza di alberi contribuisce ad abbattere le temperature mediamente di 1,3°C).

A livello provinciale, nelle aree a quota inferiore a 200 metri, la differenza di temperatura tra aree con e senza copertura arborea è maggiore nel centro Italia, assumendo valori compresi tra 2 e 3°C, e nella provincia di Vibo Valentia, dove l'indicatore mostra la differenza più elevata pari a 5,3°C. Nelle province del sud e del nord la differenza rimane nel complesso tra 1 e 2°C; nelle aree a quota compresa tra 200 e 600 metri si riscontra una tendenza analoga, sebbene le differenze di temperatura risultino nel complesso più alte rispetto alle zone di pianura. Per comprendere i motivi di queste differenze è fondamentale considerare il ruolo della copertura del suolo, in particolare la dinamica secondo cui le temperature sono più elevate in aree coperte da suoli nudi (vale a dire suoli agricoli e superfici sabbiose senza copertura vegetale) o scarsamente vegetati rispetto alle aree vegetate. Questo effetto è dovuto alla bassa capacità termica e conduttività di tali suoli, che vengono riscaldati più rapidamente durante le ore diurne rispetto alle superfici artificiali all'interno delle aree urbane. Nelle province della Puglia l'ampia presenza di suolo nudo nelle aree a uso agricolo nel periodo estivo comporta una bassa differenza di temperatura o addirittura una tendenza opposta tra ambito urbano e ambiti suburbano e rurale; un andamento simile si riscontra nella provincia di Matera, in gran parte della Sicilia e della Sardegna, a Roma, Napoli e, in misura minore, in pianura padana e lungo la costa adriatica. Sebbene queste città non presentino un comportamento termico tipico dell'isola di calore urbana, il tessuto insediativo assume comunque valori di temperatura molto elevati e spesso paragonabili a quelle delle rispettive aree rurali scarsamente vegetate.

La distribuzione delle città metropolitane sul territorio nazionale permette di sintetizzare meglio come la combinazione delle caratteristiche climatiche e la composizione del paesaggio, in termini di copertura del suolo, può influire sulle variazioni di temperatura che si

registrano tra aree urbane e aree rurali e, negli stessi ambiti, tra diversi valori di densità della copertura arborea.

Nelle città metropolitane interne (Torino, Milano, Bologna, Firenze e Roma) la differenza di temperatura tra aree urbane e rurali è mediamente più elevata, con picchi di oltre 10°C a Torino e a Firenze. Tra le città interne del nord, Milano è quella in cui il fenomeno SUHI è meno marcato, anche osservando la variazione di temperatura tra aree urbane a bassa e alta densità di copertura arborea. In questo caso, sebbene la regione climatica sia la stessa di Torino, l'ampia e diffusa presenza di aree artificiali determina variazioni meno significative tra area urbana e le zone circostanti.

Nelle città metropolitane costiere (Venezia, Genova, Napoli, Bari, Reggio Calabria, Palermo, Messina, Catania e Cagliari) si osserva una variabilità nell'intensità del fenomeno SUHI connessa con le caratteristiche di copertura del suolo e con la morfologia del tessuto insediativo. Nelle città in cui gli ambiti rurali presentano una bassa densità di copertura arborea e le aree urbane sono compatte e distribuite lungo la linea di costa, il fenomeno SUHI è meno accentuato. Nella città metropolitana di Napoli si registra il valore più elevato di variazione termica tra aree urbane e rurali (9,4 °C) e tra aree urbane ad alta e bassa densità di copertura arborea (-2,5°C). In questo caso, l'ampiezza del fenomeno SUHI è influenzata dalla coesistenza di estese superfici artificiali e dall'ampia disponibilità di aree con densità di copertura arborea >50% intorno al nucleo insediativo.

I risultati ottenuti sulla città di Bari mostrano chiaramente la particolare condizione climatica della Puglia da cui dipende anche la composizione della copertura del suolo (per lo più caratterizzata da suoli nudi). Il clima arido e la quasi totale assenza di superfici vegetate fa sì che la variazione termica al suolo tra ambiti urbani e rurali sia pressoché assente, mantenendo temperature elevate in entrambi i contesti.

Tabella 33 Differenza di temperatura (LST) media diurna estiva per il periodo 2013 -2023 tra aree a copertura arborea e con copertura arborea scarsa o nulla nella fascia altimetrica entro i 200m s.l.m. e tra 200 e 600m s.l.m.

Provincia/ Regione	Differenza di temperatura °C tra aree con copertura arborea e aree con copertura arborea scarsa o nulla					
	Altitudine < 200 m			Altitudine 200 - 600 m		
	Rurale	Suburbano	Urbano	Rurale	Suburbano	Urbano
Torino	-2,3	-2,5	-1,5	-3,9	-3,3	0,0
Vercelli	-2,6	-1,6	0,1	-3,3	-2,3	-1,1
Novara	-3,0	-3,7	-1,2	-3,4	-3,6	-2,0
Cuneo	-1,8	-1,6	0,2	-2,9	-2,2	-2,0
Asti	-4,2	-3,3	-0,1	-4,7	-3,6	-2,0
Alessandria	-4,7	-3,9	-1,5	-5,1	-3,9	-1,3
Biella	-1,8	-4,1	-	-3,6	-3,3	-4,2
Verbano-Cusio- Ossola	2,1	1,6	3,5	-3,5	-2,8	-2,7
Piemonte	-3,2	-3,2	-0,9	-3,8	-3,1	-0,6
Aosta	-	-	-	-3,3	-2,3	1,5
Valle d'Aosta	-	-	-	-3,3	-2,3	1,5
Varese	6,9	0,2	-1,9	-2,2	-3,4	-1,6
Como	1,5	6,8	-1,2	-2,0	-3,2	-1,6
Sondrio	-0,8	-1,0	-	-3,8	-3,0	-0,9
Milano	-5,8	-2,7	-0,9	-4,9	-4,1	-0,5
Bergamo	-3,3	-3,5	-1,2	-4,6	-3,7	-2,3
Brescia	-1,3	-2,5	-1,5	-2,3	-3,3	-3,1
Pavia	-3,2	-2,3	-0,5	-4,6	-3,2	-0,8
Cremona	-2,6	-2,4	0,3	-	-	-
Mantova	-3,0	-2,6	-1,0	-2,8	-	-
Lecco	6,5	3,8	-0,4	-2,0	-3,0	-1,4
Lodi	-2,5	-2,4	-0,6	-	-	-
Monza e della Brianza	-3,5	-3,1	-1,7	-4,2	-2,3	-1,3
Lombardia	-2,6	-2,7	-0,8	-4,0	-3,5	-2,0
Bolzano	-	-	-	-1,8	-2,0	-1,1
Trento	3,7	-0,5	0,6	-1,8	-2,0	-1,2
Trentino-Alto Adige	3,7	-0,5	0,6	-1,7	-1,8	-0,9
Verona	-1,6	-4,1	-2,1	-3,2	-2,7	-1,9
Vicenza	-4,1	-3,8	-1,0	-3,7	-3,5	-1,8
Belluno	-0,2	-1,5	-	-2,3	-3,1	-1,4
Treviso	-4,8	-3,8	-1,1	-3,1	-3,6	-2,3
Venezia	-4,3	-3,2	-1,3	-	-	-
Padova	-4,2	-2,9	-1,5	-3,5	-2,5	-
Rovigo	-2,7	-1,9	-1,0	-	-	-
Veneto	-4,1	-3,4	-1,8	-2,6	-2,7	-1,5

Udine	-4,9	-4,1	-2,2	-5,1	-2,9	-0,3
Gorizia	-4,3	-3,5	-0,8	-2,8	-2,7	-
Trieste	-3,3	-3,5	-1,6	-3,9	-2,2	0,5
Pordenone	-3,9	-3,2	-1,7	-4,5	-3,2	-1,5
Friuli-Venezia Giulia	-4,5	-3,5	-1,8	-4,5	-2,3	-0,5
Imperia	-0,5	-1,3	-0,2	-1,7	-1,1	0,5
Savona	-2,7	-3,8	-1,7	-4,2	-2,5	-1,1
Genova	-3,0	-2,6	-1,9	-3,7	-2,9	-1,5
La Spezia	-3,7	-3,6	-1,9	-2,6	-2,9	-
Liguria	-2,8	-3,1	-1,3	-3,5	-2,5	-0,8
Piacenza	-5,2	-3,8	-1,8	-4,5	-4,1	-0,7
Parma	-4,5	-4,5	-1,8	-3,5	-3,0	-1,4
Reggio nell'Emilia	-3,7	-3,3	-1,1	-2,8	-2,5	-3,0
Modena	-4,1	-2,1	-0,8	-2,8	-2,0	-0,7
Bologna	-5,1	-3,4	-1,7	-3,6	-3,0	-0,5
Ferrara	-3,8	-2,4	-1,3	-	-	-
Ravenna	-3,3	-1,8	-1,6	-3,8	-0,9	-0,6
Forlì-Cesena	-4,6	-3,3	-1,0	-3,4	-2,3	-0,6
Rimini	-4,2	-2,1	-0,9	-3,5	-2,4	-1,7
Emilia-Romagna	-4,3	-3,1	-1,4	-3,8	-3,4	-2,2
Massa Carrara	-4,6	-3,1	-1,3	-3,8	-4,1	-3,8
Lucca	-4,1	-3,9	-1,6	-3,8	-4,2	-2,9
Pistoia	-4,0	-3,2	-1,0	-5,6	-3,6	-
Firenze	-3,4	-2,0	-1,1	-3,8	-2,4	-1,4
Livorno	-5,1	-3,0	-2,2	-3,7	-2,1	-0,1
Pisa	-4,3	-3,2	-2,1	-3,8	-2,0	-4,0
Arezzo	-2,9	-3,6	0,0	-4,6	-2,7	-1,2
Siena	-3,9	-2,2	-1,5	-5,4	-2,9	-1,7
Grosseto	-6,3	-4,6	-3,8	-6,0	-3,3	-1,1
Prato	-3,8	-3,6	-1,5	-4,5	-1,1	1,3
Toscana	-5,2	-3,4	-1,9	-5,5	-4,2	-2,7
Perugia	-4,7	-4,3	-3,0	-3,8	-3,1	-3,0
Terni	-3,4	-2,2	-1,0	-4,2	-1,5	0,3
Umbria	-3,9	-2,1	-0,6	-3,7	-2,6	-1,9
Pesaro e Urbino	-3,6	-3,5	-0,9	-3,3	-2,5	-1,1
Ancona	-4,7	-3,9	-2,0	-4,3	-3,5	-0,6
Macerata	-2,1	-1,5	0,5	-4,1	-2,9	-1,4
Ascoli Piceno	-2,4	-2,2	-1,0	-3,5	-2,8	-2,8
Fermo	-3,7	-3,3	-0,7	-3,5	-2,2	-0,7
Marche	-3,6	-3,1	-1,3	-3,7	-3,0	-1,1
Viterbo	-5,6	-3,2	-2,2	-3,1	-3,1	-1,6
Rieti	-1,5	-1,3	-1,3	-2,5	-1,1	0,1
Roma	-5,1	-3,5	-1,7	-5,5	-2,5	-1,9
Latina	-3,9	-2,5	-1,3	-2,1	-0,9	-0,5

Frosinone	-4,3	-2,9	-3,5	-4,0	-2,3	-3,2
Lazio	-4,8	-3,1	-1,5	-3,9	-2,4	-2,1
L'Aquila	-	-	-	-5,4	-4,7	-1,8
Teramo	-2,7	-1,6	-0,7	-3,3	-1,9	-0,3
Pescara	-1,1	-1,7	-1,3	-2,1	-1,3	-0,1
Chieti	-1,9	-1,5	-1,9	-3,3	-0,8	-1,2
Abruzzo	-1,4	-1,3	-1,2	-3,0	-1,0	-0,8
Campobasso	-3,7	-1,0	-0,3	-4,8	-0,7	-0,4
Isernia	-1,7	-1,3	0,0	-2,8	-1,8	-0,1
Molise	-3,8	-1,2	-0,2	-5,3	-1,9	0,0
Caserta	-3,4	-2,1	-1,8	-3,5	-1,7	0,8
Benevento	-2,7	-2,1	-0,5	-4,4	-2,8	1,8
Napoli	-4,1	-3,1	-2,5	-2,6	-2,3	-1,1
Avellino	-2,5	-1,1	0,8	-4,7	-3,5	-1,3
Salerno	-3,7	-3,2	-0,3	-2,4	-1,9	-0,5
Campania	-4,2	-3,0	-1,8	-4,1	-2,9	0,9
Foggia	-2,8	-3,1	-0,4	-6,6	-3,0	-0,5
Bari	2,0	0,8	0,1	0,1	0,0	-0,2
Taranto	0,1	-0,3	-0,2	-2,3	-0,7	-0,4
Brindisi	0,1	0,1	-0,1	-0,8	-0,2	0,1
Lecce	0,3	-0,2	-0,4	-	-	-
Barletta-Andria-Trani	3,2	1,1	-0,4	0,1	0,5	-1,3
Puglia	0,4	-0,3	-0,3	-1,0	-0,2	-0,2
Potenza	-8,7	-8,0	-	-5,8	-3,4	-0,7
Matera	-3,0	-1,9	-1,0	-3,7	-2,7	-0,4
Basilicata	-3,2	-2,9	-1,6	-4,6	-3,6	-1,1
Cosenza	-1,6	0,4	3,8	-2,6	-0,9	1,1
Catanzaro	-2,2	-0,5	0,1	-2,4	-0,8	0,0
Reggio di Calabria	-4,1	-2,1	-0,3	-4,2	-2,6	-0,9
Crotone	-1,6	-0,6	1,8	-1,1	-1,1	-1,4
Vibo Valentia	-1,4	-1,6	-5,3	-1,6	-1,5	-0,7
Calabria	-2,7	-1,0	0,6	-2,9	-1,6	-0,6
Trapani	0,0	0,0	0,7	-0,7	0,4	-0,2
Palermo	-2,1	-1,1	-0,6	-3,3	-1,7	-0,5
Messina	-1,6	-2,2	-0,6	-2,0	-2,2	-1,4
Agrigento	-0,6	-0,6	-1,0	-1,1	-0,7	-0,8
Caltanissetta	-2,3	1,2	0,9	-1,7	1,2	-0,5
Enna	-1,5	0,1	-0,2	-1,9	-1,1	-
Catania	-2,2	-3,0	-1,1	-3,9	-3,5	-1,8
Ragusa	-2,0	0,1	0,7	-1,6	-0,6	-0,5
Siracusa	-0,4	-0,9	-0,4	-1,8	-1,5	1,5
Sicilia	-1,6	-2,5	-1,0	-4,1	-2,7	-1,3
Sassari	-2,8	0,2	0,4	-4,7	-3,4	-0,8
Nuoro	-3,4	-2,3	-2,7	-4,2	-4,3	-2,7
Cagliari	-4,8	-5,3	-0,6	-2,8	-2,6	-

Oristano	-3,7	-2,0	-0,3	-3,8	-3,3	-0,8
Sud Sardegna	-3,5	-3,0	-2,0	-3,3	-3,1	-1,0
Sardegna	-3,6	-1,8	-1,4	-4,3	-3,5	-0,9

Nelle successive figure viene rappresentato l'andamento delle temperature per alcune delle 14 città metropolitane, sia a scala cittadina che rispetto a specifici transetti urbano-rurale, considerando anche la quota di popolazione esposta a temperature estreme durante il periodo estivo. Quest'ultima informazione è stata estratta dalla griglia di popolazione a 10 metri realizzata a partire dai dati di popolazione per sezioni di censimento (e presentata nei paragrafi precedenti) e risulta particolarmente utile negli studi sul fenomeno SUHI, per valutare i driver intra-urbani e i rischi associati alla presenza della popolazione. In tutte le città analizzate, la temperatura cresce all'aumentare della densità di coperture artificiali: per ogni aumento del 10% delle superfici artificiali le temperature aumentano significativamente in tutte le città, raggiungendo valori compresi tra 41 e 46 °C nelle aree più saturate e seguendo andamenti diversi a seconda delle caratteristiche del territorio circostante. Nel Caso di Bari, ad esempio, il grafico mostra chiaramente come la presenza di suolo nudo nelle aree agricole determina temperature elevate anche in assenza di superfici artificiali (Figura 96 e Figura 98); tale andamento si riscontra in modo meno accentuato anche su Roma.

Man mano che ci si sposta verso aree più densamente urbanizzate, non solo si osserva un aumento delle temperature, ma anche una crescente quota di popolazione esposta a condizioni climatiche estreme. Nelle città analizzate la popolazione esposta a temperature superiori a 40°C sfiora, in media, il 70% del totale con picchi di oltre il 90% a Milano, Napoli e Bari e valori minimi a Genova (14% della popolazione totale) (Figura 76, Figura 79, Figura 82, Figura 85, Figura 88, Figura 91, Figura 94, Figura 97).

I transetti urbano-rurale sintetizzano l'influenza della copertura del suolo sulla temperatura superficiale e mostrano un sostanziale abbassamento delle temperature in corrispondenza di aree arborate. In questo senso, è possibile osservare anche la correlazione tra la

dimensione dei parchi, la densità della copertura arborea e la temperatura al suolo rilevata: la capacità di mitigare le temperature da parte dei parchi urbani è più accentuata quando sono estesi ed è alta la densità di alberature. Inoltre, è più marcata nei punti centrali dell'area verde, lontani dal contesto urbano circostante, più artificializzato. Lungo il transetto urbano-rurale di Torino (Figura 75 e Figura 77) si nota la variazione termica in corrispondenza del Parco Boschetto e del Parco pubblico Pellerina, entrambi di dimensioni notevoli e con elevata densità di copertura arborea. I tre parchi urbani di Milano, Parco Guido Vergani, Parco Sempione e Giardini Indro Montanelli, garantiscono diversi livelli di riduzione delle temperature che, a seconda della dimensione e della densità di copertura arborea, vanno da un massimo di circa 10°C (Parco Sempione) a un minimo di 4°C (Parco Guido Vergani)(Figura 78 e Figura 80). Nel transetto tracciato sulla città di Genova (Figura 81 e Figura 83) è evidente il progressivo abbassamento delle temperature passando dalle aree più densamente artificializzate, nei pressi del porto, al tessuto urbano meno denso, sulla parte alta della città e l'effetto di mitigazione prodotto dall'area naturale Parco delle mura ai margini del tessuto urbano. Sulla città di Firenze l'effetto isola di calore è particolarmente accentuato, per via della coesistenza del tessuto urbano compatto, con ampie fasce arborate lungo i margini del tessuto insediativo, dove si rileva un abbassamento delle temperature fino a 10°C. Il valore più basso all'interno della città si registra in corrispondenza del Giardino della Gherardesca e si nota la differenza tra il centro storico e il tessuto insediativo a est, dove è maggiore la presenza di vegetazione (Figura 84 e Figura 86). Nella città di Bologna le temperature estive si attestano mediamente sui 40°C, scendendo di circa 7°C in corrispondenza della riserva Prati di Caprara (Figura 87 e Figura 89). L'andamento delle temperature lungo il transetto urbano-rurale tracciato sulla città di Roma (Figura 90 e Figura 92) è più complesso rispetto a quello delle altre città. Tale complessità è dovuta ad una più articolata composizione del paesaggio, in cui il tessuto urbano policentrico si alterna ad ampie porzioni di aree agricole scarsamente vegetate. È possibile osservare l'aumento delle temperature in corrispondenza di queste ultime e delle superfici

artificiali e i valori più bassi sulla foresta periurbana di Castelporziano (tra i 29 e i 32°C), sulle foreste urbane di Villa Borghese e Villa Ada e in prossimità del Tevere. A Napoli, il transetto attraversa la città da est a ovest passando per il Parco urbano dei Camaldoli, il parco Nazionale del Vesuvio e l'area naturale della Pineta Tribucchi. Anche in questo caso la sezione evidenzia chiaramente il fenomeno SUHI mostrando un progressivo aumento della temperatura dalle zone naturali al centro città. In corrispondenza dei parchi e delle riserve le temperature scendono fino a toccare i 25°C (Figura 93 e Figura 95).

La presenza di alberature con media e bassa densità in un contesto altamente artificializzato esercita solo una lieve azione di mitigazione mentre per quelle con elevata densità l'effetto è variabile in funzione dell'estensione. Nel pieno centro cittadino ad alta densità di edificato si raggiungono, invece, i valori di temperatura più alti. Il consumo di suolo, che spesso comporta anche la rimozione di vegetazione, favorisce l'aumento della temperatura al suolo delle aree urbane e l'intensità dell'isola di calore urbano, con molteplici conseguenze sul microclima e sugli ecosistemi, ed effetti che variano in relazione alla fascia altimetrica e alla vicinanza alla costa.

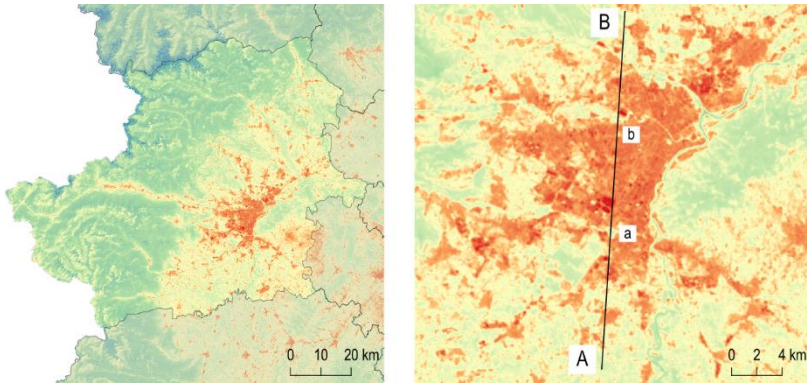


Figura 75. Temperatura media diurna estiva al suolo (LST) (°C) per gli anni dal 2013 al 2023 nella provincia di Torino.

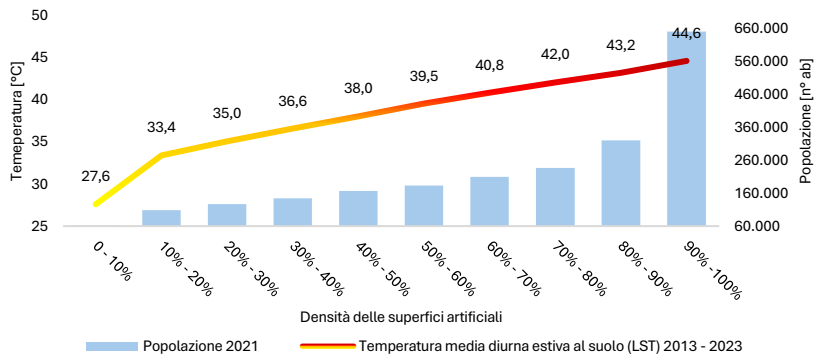


Figura 76. Andamento della temperatura media diurna estiva al suolo (LST) (°C) per gli anni dal 2013 al 2023 e numero di abitanti (2021) esposti per classi di densità delle superfici artificiali.

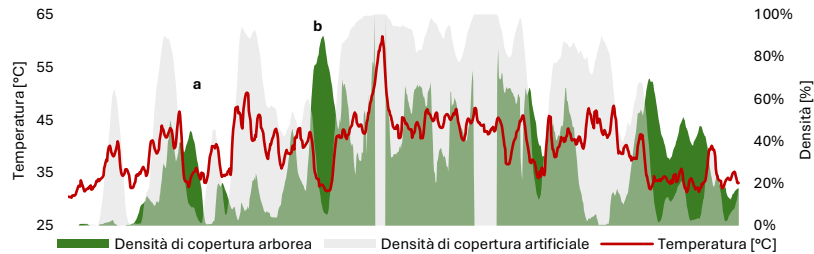


Figura 77. Torino (a)Parco Miraflores (Boschetto), (b) Parco Pellerina.

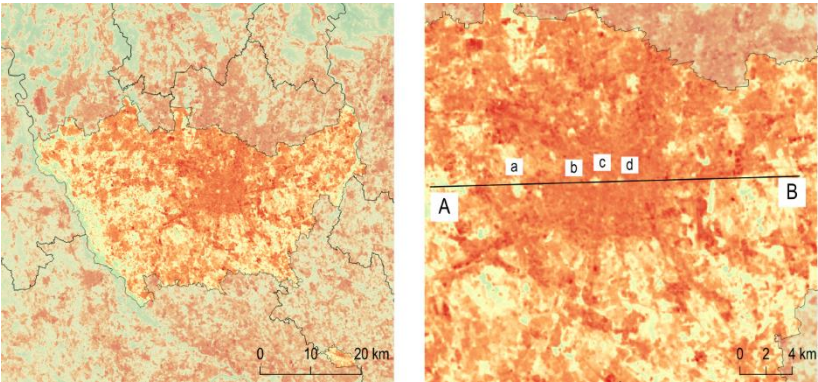


Figura 78. Temperatura media diurna estiva al suolo (LST) (°C) per gli anni dal 2013 al 2023 nella provincia di Milano.

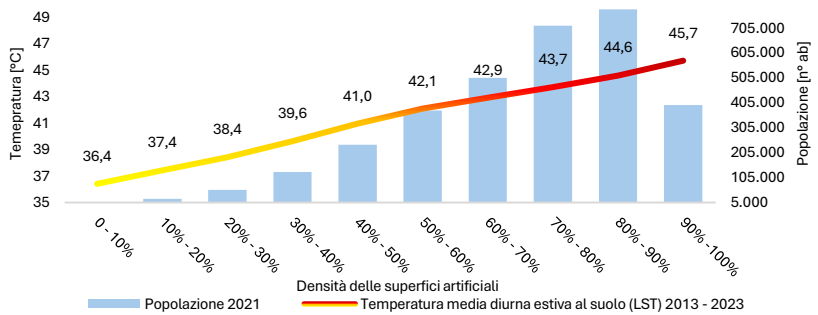


Figura 79. Andamento della temperatura media diurna estiva al suolo (LST) (°C) per gli anni dal 2013 al 2023 e numero di abitanti (2021) esposti per classi di densità delle superfici artificiali.

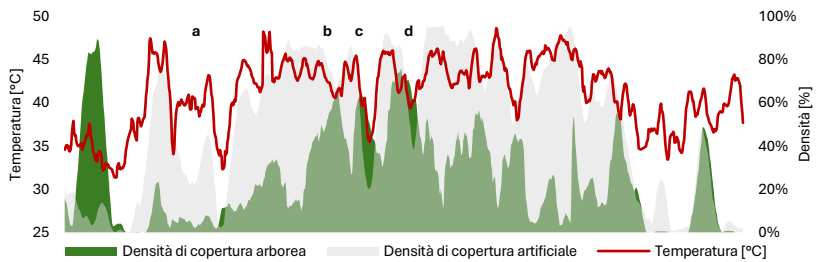


Figura 80. Milano (a) Parco delle Cave, (b) Parco Guido Vergani, (c) Parco Sempione, (d) Giardini Indro Montanelli.

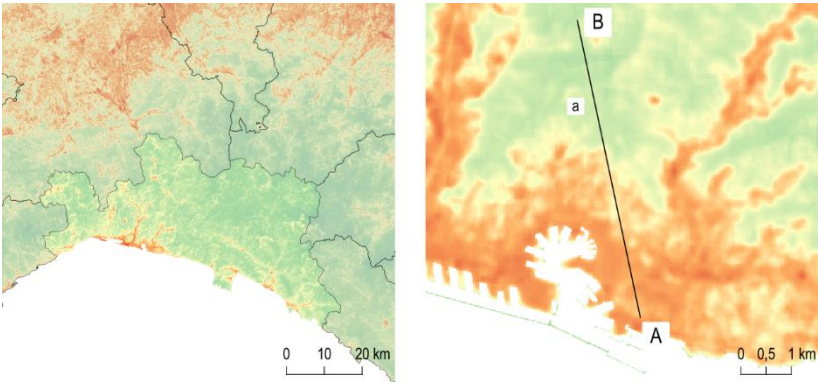


Figura 81. Temperatura media diurna estiva al suolo (LST) (°C) per gli anni dal 2013 al 2023 nella provincia di Genova.

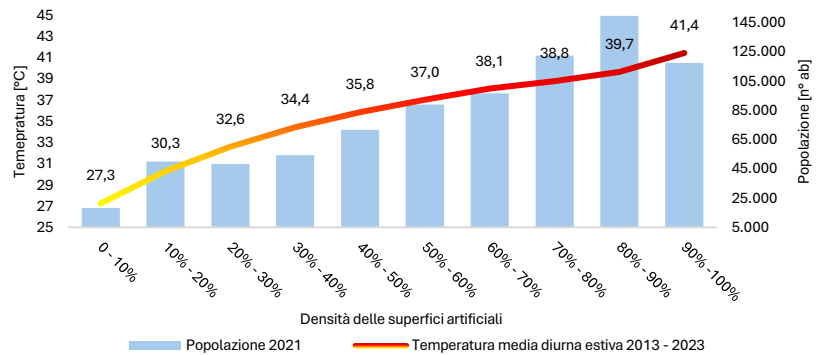
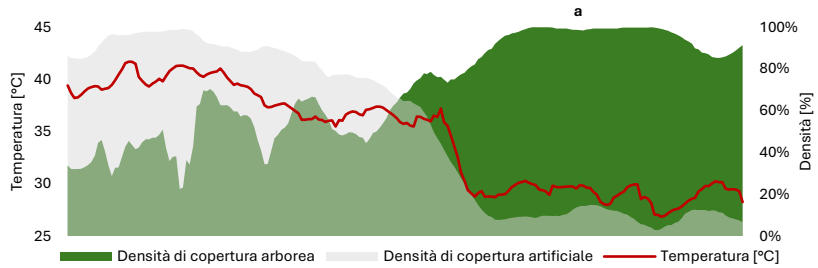


Figura 82. Andamento della temperatura media diurna estiva al suolo (LST) (°C) per gli anni dal 2013 al 2023 e numero di abitanti (2021) esposti per classi di densità delle superfici artificiali.



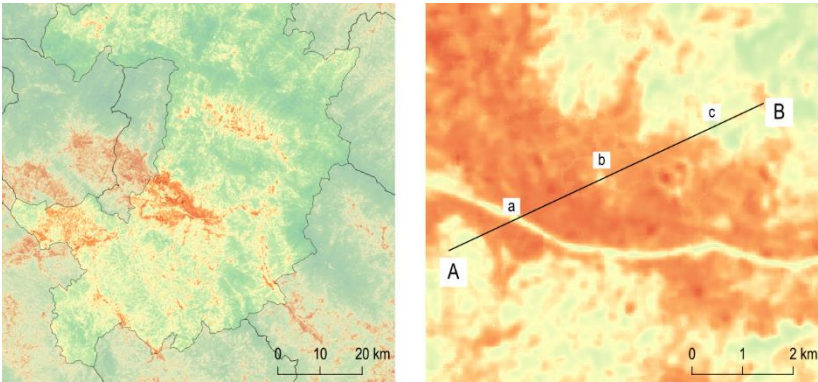


Figura 84. Temperatura media diurna estiva al suolo (LST) (°C) per gli anni dal 2013 al 2023 nella provincia di Firenze.

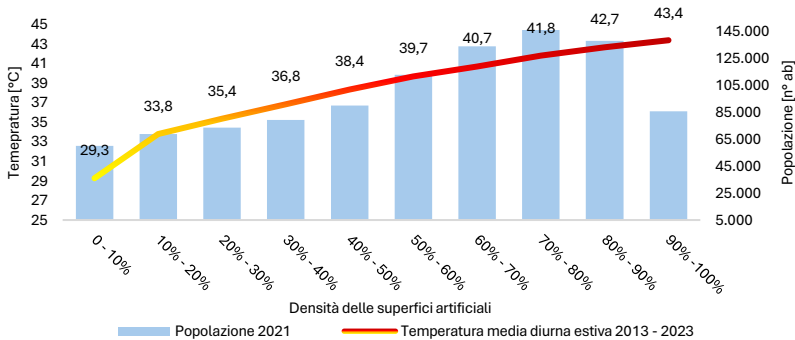


Figura 85. Andamento della temperatura media diurna estiva al suolo (LST) (°C) per gli anni dal 2013 al 2023 e numero di abitanti (2021) esposti per classi di densità delle superfici artificiali.

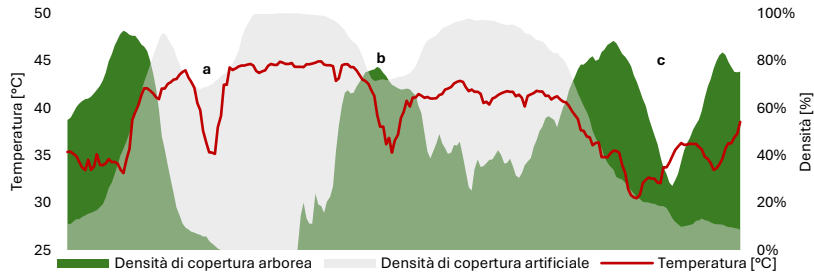


Figura 86. Firenze (a) Fiume Arno, (b) Giardino della Gherardesca, (c) area naturale.

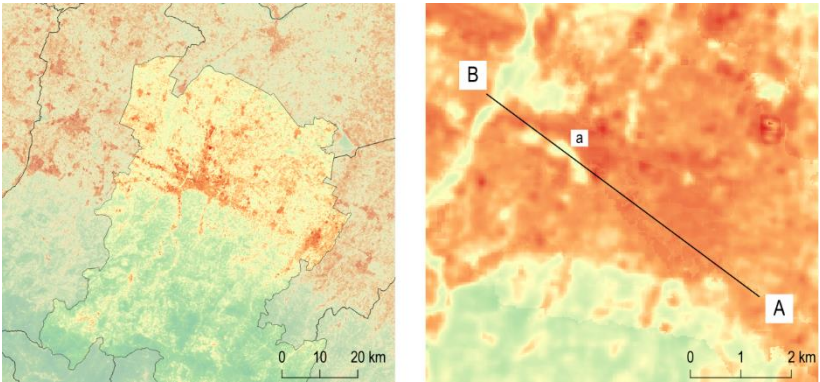


Figura 87. Temperatura media diurna estiva al suolo (LST) (°C) per gli anni dal 2013 al 2023 nella provincia di Bologna.

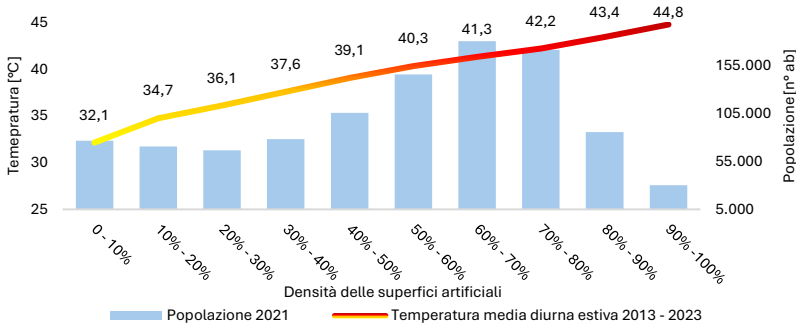


Figura 88. Andamento della temperatura media diurna estiva al suolo (LST) (°C) per gli anni dal 2013 al 2023 e numero di abitanti (2021) esposti per classi di densità delle superfici artificiali

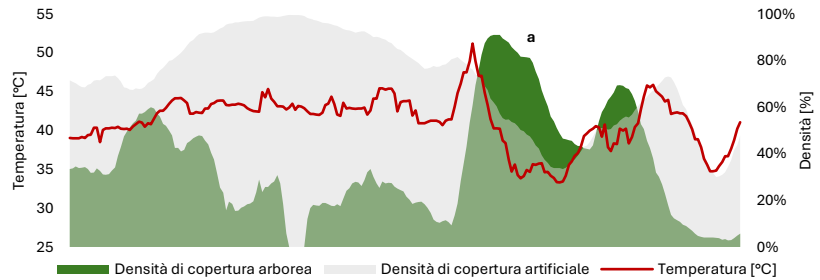


Figura 89. Bologna (a) Prati di Caprara.

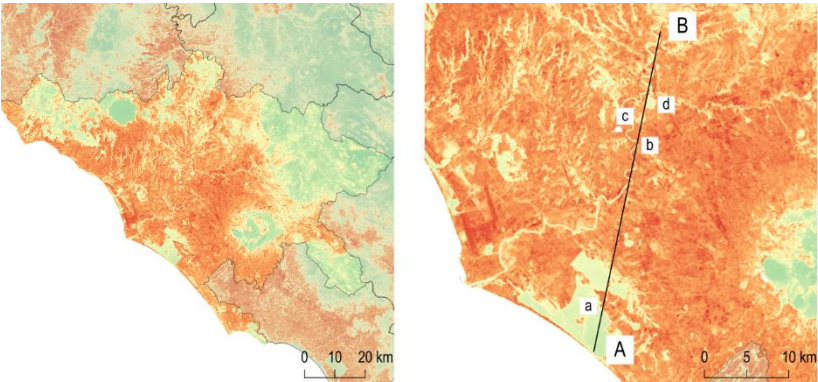


Figura 90. Temperatura media diurna estiva al suolo (LST) (°C) per gli anni dal 2013 al 2023 nella provincia di Roma.

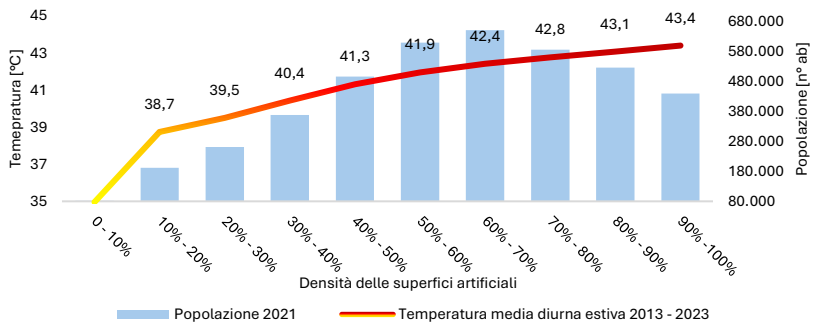


Figura 91. Andamento della temperatura media diurna estiva al suolo (LST) (°C) per gli anni dal 2013 al 2023 e numero di abitanti (2021) esposti per classi di densità delle superfici artificiali.

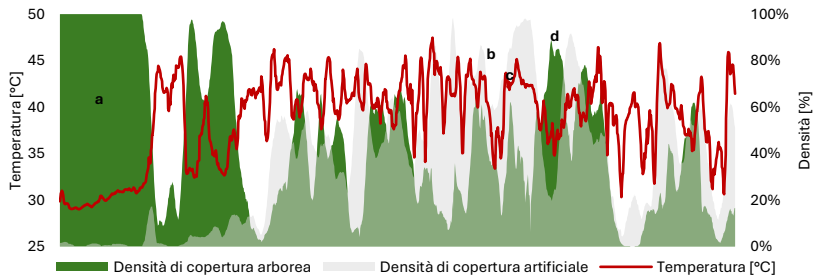


Figura 92. Roma (a) Tenuta di Castelporziano, (b) Tevere, (c) Villa Borghese, (d) Villa Ada.

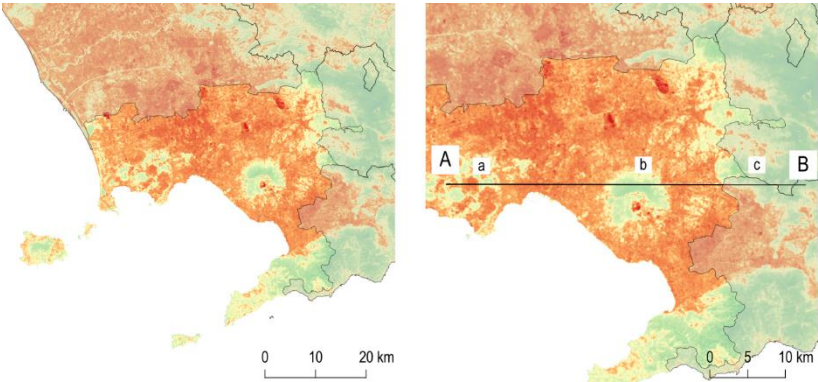


Figura 93. Temperatura media diurna estiva al suolo (LST) (°C) per gli anni dal 2013 al 2023 nella provincia di Napoli.

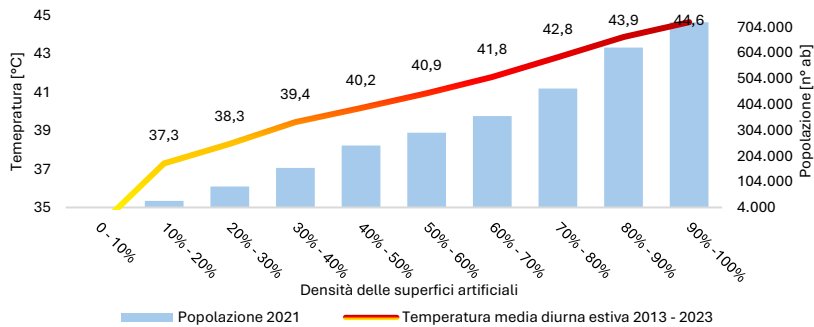


Figura 94. Andamento della temperatura media diurna estiva al suolo (LST) (°C) per gli anni dal 2013 al 2023 e numero di abitanti (2021) esposti per classi di densità delle superfici artificiali.

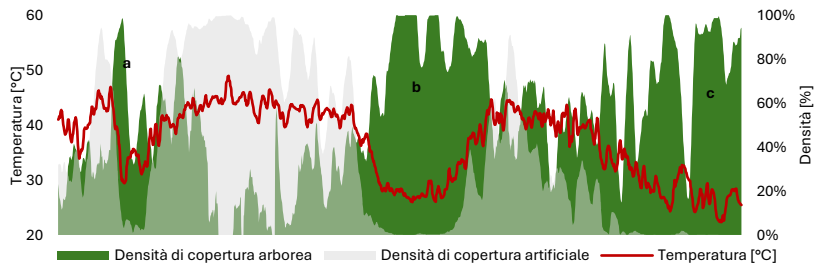


Figura 95. Napoli (a) Parco urbano dei Camaldoli, (b) Parco Nazionale del Vesuvio, (c) Area naturale della pineta Tribucchi.

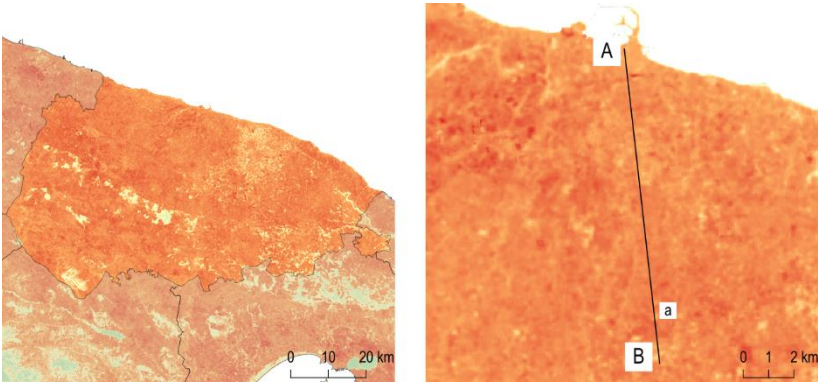


Figura 96. Temperatura media diurna estiva al suolo (LST) (°C) per gli anni dal 2013 al 2023 nella provincia di Bari.

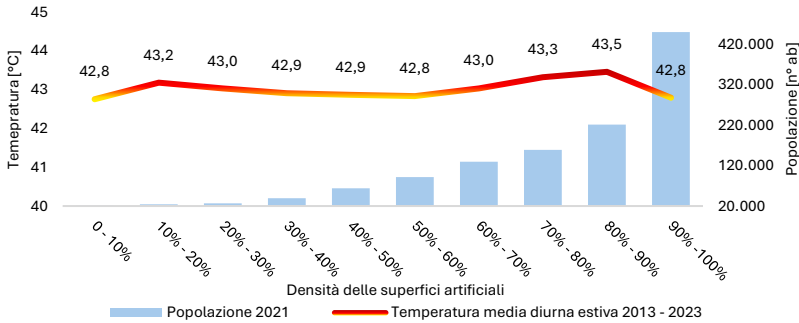


Figura 97. Andamento della temperatura media diurna estiva al suolo (LST) (°C) per gli anni dal 2013 al 2023 e numero di abitanti (2021) esposti per classi di densità delle superfici artificiali.

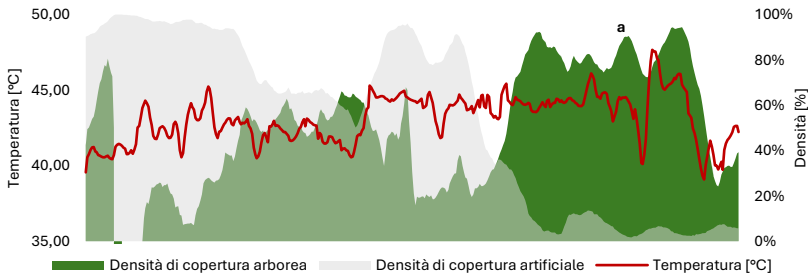


Figura 98. Bari (a) aree agricole con ampia e diffusa presenza di oliveti.

3.3.3 Aree prioritarie di interventi di forestazione nel comune di Roma

In questo paragrafo viene analizzata la distribuzione spaziale delle anomalie termiche *hot-spot* (HS - aree in cui la temperatura è estremamente più alta rispetto al valore medio del comune) e *cold-spot* (CS - aree in cui la temperatura è estremamente più bassa rispetto al valore medio del comune) individuate sul comune di Roma e riportate in Figura 99.

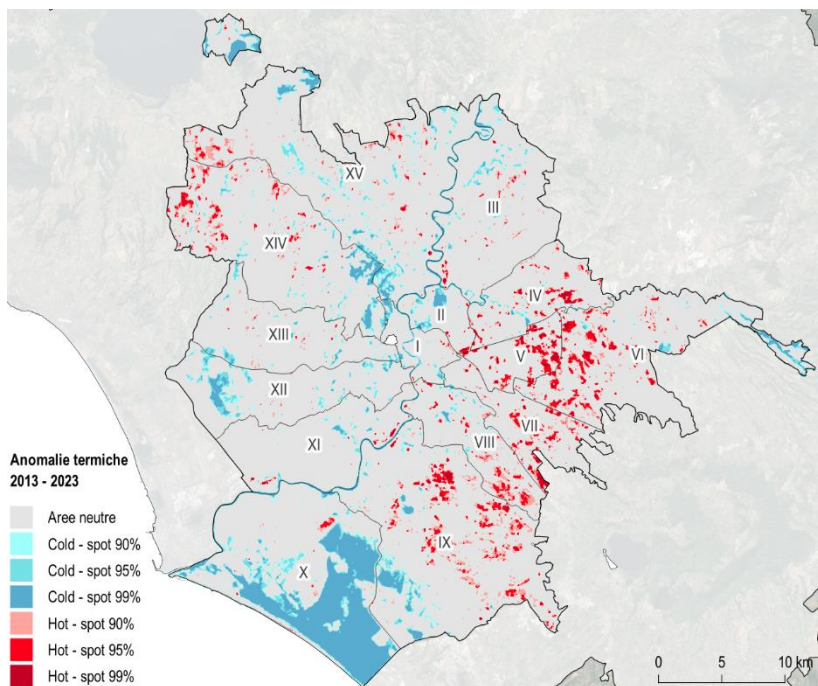


Figura 99. Anomalie termiche estive rilevate sul comune di Roma

Le anomalie termiche interessano complessivamente un sesto dell'area urbana del comune (16,27%). Circa il 9% sono anomalie CS localizzate prevalentemente nella porzione a nord-ovest dell'area di studio, in corrispondenza delle principali foreste urbane, e lungo le aste fluviali del Tevere e dell'Aniene, mentre quasi l'8% sono anomalie HS e interessano

per lo più l'area urbana centrale e quella a sud-est del comune. All'interno dei cluster CS, le temperature si attestano in media sui 37°C segnalando una variazione rispetto alla temperatura media dell'area di studio (42,9 °C) di quasi 6° e di oltre il doppio (13°C) se si considerano i valori minimi registrati (29,8°C) nelle stesse aree. Al contrario, i *cluster* HS mostrano valori medi di temperatura che sfiorano i 50°C superando di 5°C la temperatura media dell'area di studio (Tabella 34).

Gi* Hot-Spot	Superficie			LST [°C]		
	[ha]	[%*]	[%**]	Minima	Massima	Media
Cold-spot 90%	1.356	28,6	2,5	37,5	39,24	38,63
Cold-spot 95%	1.667	35,2	3,1	35,97	38,44	37,60
Cold-spot 99%	1.718	36,2	3,2	29,82	36,98	35,11
Cold-spot totali	4.742		8,9	29,82	36,98	36,99
Aree neutre	44.829		83,7	38,5	47,26	43,04
Hot-spot 90%	1.829	46,1	3,4	46,47	47,96	47,06
Hot-spot 95%	1.671	42,1	3,1	47,21	49,36	48,04
Hot-spot 99%	468	11,8	0,9	48,8	57,48	49,83
Hot-spot totali	3.968		7,41	46,47	57,48	47,8

Tabella 34. Area occupata dalle anomalie termiche e relativi valori di temperatura media diurna estiva al suolo.

Municipi	Cold-spot		Aree neutre		Hot-spot	
	[ha]	[%*]	[ha]	[%*]	[ha]	[%*]
I	256	5,4	1.711	3,8	32	0,8
II	372	7,8	1.521	3,4	58	1,5
III	202	4,3	3.033	6,8	96	2,4
IV	144	3	3.451	7,7	481	12,1
V	0	0	2.050	4,6	646	16,3
VI	73	1,6	6.522	14,6	1.248	31,4
VII	15	0,3	3.418	7,6	612	15,4
VIII	183	3,9	2.190	4,9	130	3,3
IX	311	6,6	3.933	8,8	427	10,8
X	1.141	24,1	5.658	12,6	71	1,8
XI	236	5	2.001	4,5	79	2
XII	180	3,8	1.601	3,6	5	0,1
XIII	174	3,7	2.347	5,2	25	0,6
XIV	728	15,4	3.349	7,5	41	1,0
XV	727	15,3	2.044	4,6	18	0,5
Totale	4.742	100	44.827	100	3.968	100

Tabella 35. Distribuzione delle anomalie termiche all'interno dei 15 municipi di Roma.

Osservando il dato rispetto alla suddivisione territoriale per municipi, e considerando tutti i CS i valori più elevati si osservano rispettivamente

nei municipi X (1.141 ha), XIV (728 ha) e XV (727 ha). In questi ultimi si concentrano più della metà dei cluster CS. Il 75% delle anomalie HS sono localizzate nei municipi IV (481 ha), V (646 ha), VI (1.248 ha) e VII (612 ha). Particolare rilevanza assume il municipio V, nel quale non si rileva la presenza di aree CS.

Dal punto di vista della copertura del suolo, metà della superficie di tutti i CS è coperta da alberi e solo un terzo presenta copertura erbacea. Nei CS individuati con un intervallo di confidenza del 99% la copertura arborea aumenta coprendo due terzi della superficie totale mentre la copertura erbacea interessa solo un quinto della classe. Al contrario, nei CS con un intervallo di confidenza del 90% la copertura arborea ed erbacea si equivalgono coprendo in entrambi i casi due quinti della classe e nel 20% della superficie totale sono presenti anche superfici artificiali. I cluster HS sono composti per metà da coperture artificiali e da coperture erbacee. È interessante osservare come negli HS con un intervallo di confidenza del 99% tre quarti della superficie è artificiale e poco meno di un quarto sono superfici erbacee, mentre in quelli con un intervallo di confidenza del 90% oltre la metà della superficie è caratterizzata da coperture erbacee (Tabella 36). Osservando più nel dettaglio le aree HS con intervalli di confidenza del 90% e 95%, queste si sviluppano in contesti agricoli caratterizzati, prevalentemente, da vegetazione erbacea secca durante i mesi estivi.

	Superfici artificiali		Abiotico naturale		Copertura arborea		Copertura erbacea		Corpi idrici		Totale	
Gi* classes	[ha]	[%*]	[ha]	[%*]	[ha]	[%*]	[ha]	[%*]	[ha]	[%*]	[ha]	[%*]
CS 90%	284	20,9	0	0	527	38,8	521	38,3	27	2	1.358	3
CS 95%	229	13,8	0	0	799	48	570	34,3	65	3,9	1.663	3,1
CS 99%	56	3,3	0	0	1.056	61,3	316	18,4	292	17	1.720	3,2
CS tot.	569	12	0	0	2.381	50,2	1.407	29,7	384	8,1	4.742	8,9
AN	20.766	46,3	0	0	4.767	10,6	19.225	42,9	71	0,2	44.829	83,7
HS 90%	784	42,9	0	0	22	1,2	1.022	55,9	0	0	1.829	3,4
HS 95%	826	49,4	0	0	9	0,5	837	50,1	0	0	1.671	3,1
HS 99%	358	76,5	0	0	1	0,1	109	23,4	0	0	468	0,9
HS tot.	1.968	49,6	0	0	32	0,8	1.968	49,6	0	0	3.968	7,4
Totale	23.303	43,5	0	0	7.180	13,4	22.600	42,2	455	0,9	53.538	10

Tabella 36. Distribuzione delle anomalie termiche per classe di copertura del suolo.

Individuazione delle aree prioritarie per interventi di forestazione

La mappa delle anomalie termiche e l'analisi del Piano Regolatore Generale hanno supportato l'individuazione delle aree prioritarie di interventi di forestazione all'interno dell'area urbana del comune di Roma, permettendo la selezione degli ambiti più carenti di aree verdi configurate e più critici dal punto di vista termico. In questo paragrafo viene fornito, prima di tutto, uno sguardo di insieme sulla distribuzione per municipio delle diverse tipologie di spazi aperti; successivamente queste aree vengono caratterizzate in funzione dell'incidenza delle anomalie termiche.

Gli spazi aperti configurati occupano un quinto dell'area urbana (Figura 100) e per l'80% si tratta di riserve naturali localizzate ai margini del tessuto insediativo, prevalentemente nei municipi VIII, X, XIV e XV. Le ville storiche, i giardini configurati e il verde di arredo occupano solo il 2% dell'area urbana e rappresentano l'11% degli spazi aperti configurati. Questi ultimi sono presenti per lo più nei municipi I, II e XII, dove le aree destinate a verde pubblico sono veri e propri residui di naturalità. I municipi V e VI sono quelli più carenti dal punto di vista della presenza di aree verdi configurate secondo il PRG ma sono anche quelli in cui è presente la quota maggiore di spazi aperti a pianificazione definita o da definire sia in valore assoluto che in percentuale (1.902 ettari). A questi ultimi si aggiungono quelli dei municipi III, IV e IX, pari a 2.519 ettari.

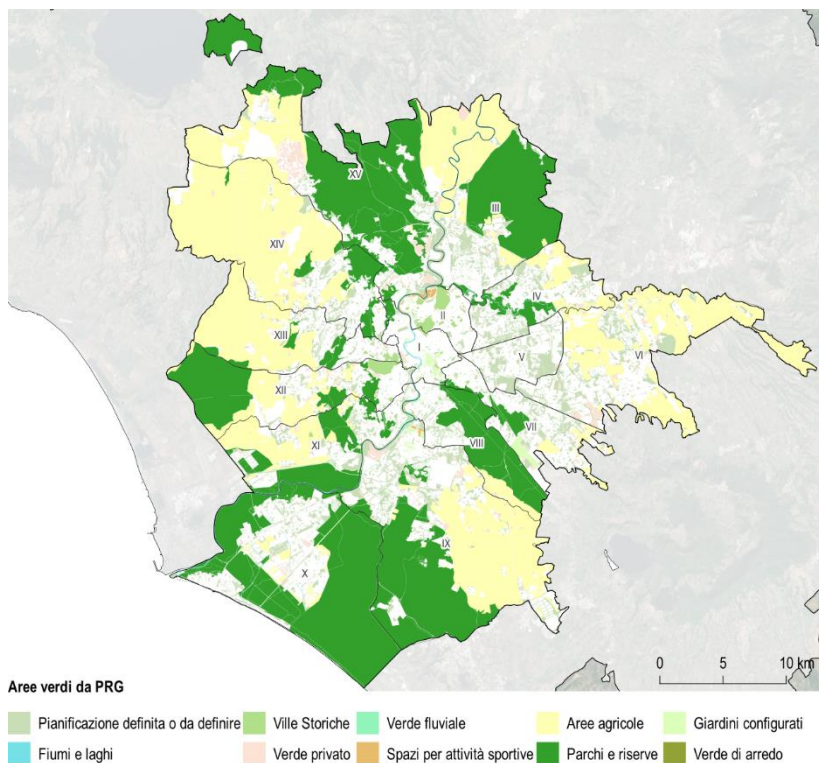


Figura 100. Mappa delle aree verdi configurate e da configurare estratte dal Piano Regolatore Generale del Comune di Roma.

Gli spazi aperti configurati presenti nell'area urbana del comune riescono, di fatto, a svolgere un ruolo di mitigazione delle temperature (Figura 101): il 42% sviluppa cluster più freddi, mentre il 55% non mostra oscillazioni dei valori di temperatura significativamente più bassi o più alti. Solo il 3% (781 ha) è caratterizzato da anomalie termiche in cui i valori di temperatura sono più elevati rispetto alla media dell'area urbana e si localizzano prevalentemente nei municipi VI (verde privato intorno all'area della vela di Calatrava), VII (parco degli acquedotti) e X (un ampio spazio aperto tra Malafede e Castelporziano). Gli spazi aperti a pianificazione definita o da definire mostrano prevalentemente comportamenti termici neutri, in cui le temperature mantengono valori

vicini alla media dell'area urbana, e solo il 15% (1.213 ha) è caratterizzato da anomalie termiche hot-spot. Tuttavia, osservando i risultati disaggregati per municipio, nei municipi V e VI, è presente la quota maggiore di spazi aperti a pianificazione definita o da definire che sviluppano anomalie termiche hot-spot (il 61% del totale degli spazi aperti classificati come hot-spot). A questi si aggiungono gli oltre 400 ettari nei municipi IV, VII e IX. Quasi un quinto delle aree agricole sviluppa anomalie termiche hot-spot e due terzi si localizzano nel municipio VI. Escludendo le aree agricole, gli spazi aperti hot-spot sui quali intervenire in via prioritaria sono pari a quasi 2.000 ha, cui si aggiungono più di 5.600 ha di spazi aperti a pianificazione definita o da definire che mostrano un comportamento termico neutro, per un totale di oltre **7.600 ha** di nuovi possibili ambiti prioritari di forestazione.

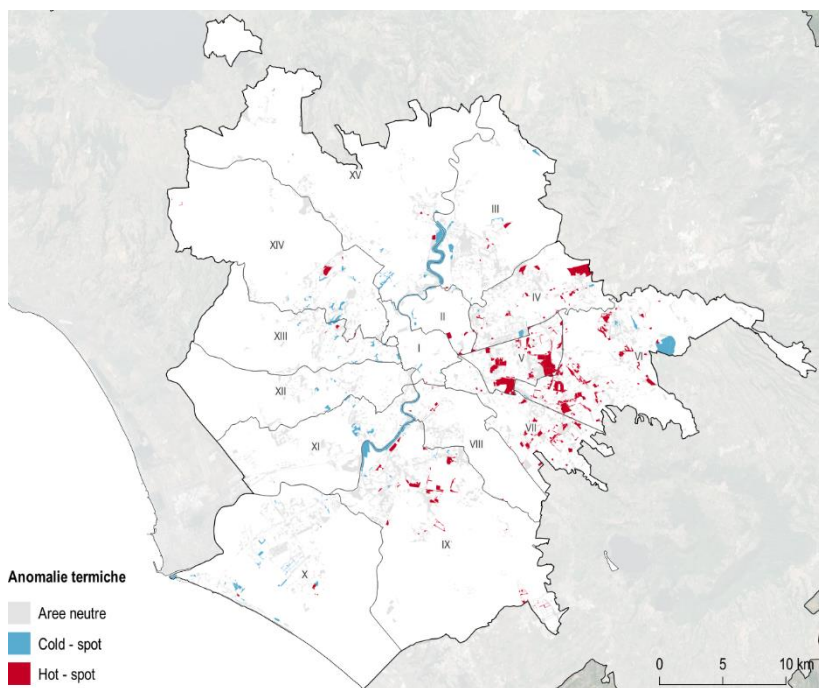


Figura 101. Caratterizzazione dei poligoni del PRG afferenti agli spazi aperti a pianificazione definita o da definire e al verde fluviale, in funzione dell'anomalia termica.

Discussioni

La mappa della temperatura media diurna estiva al suolo (LST – *Land Surface Temperature*) con risoluzione spaziale di 30m, ottenuta tramite integrazione di immagini satellitari Landsat 8, Landsat 9 e MODIS, ha mostrato una buona correlazione rispetto alla stessa mappa con risoluzione di 1km derivata dalle sole immagini MODIS e utilizzata in precedenza per condurre studi a scala nazionale sul fenomeno *Surface Urban Heat Island* (SUHI). Lo studio ha mostrato come, aumentando il periodo di acquisizione delle immagini, è possibile ridurre le aree prive di informazioni (a causa della presenza di nuvole sulla scena) e l'incertezza delle rilevazioni, dovute ai tempi di rivisitazione più lunghi delle missioni Landsat, stabilendo un intervallo di almeno 10 anni. In questo senso, lo script implementato sulla piattaforma di *cloud computing* GEE ha permesso di accedere facilmente e rapidamente all'archivio di dati geospaziali delle recenti missioni satellitari della NASA, riducendo le limitazioni connesse con il *download* e il processamento in locale della grande quantità di immagini necessarie.

L'intensità del fenomeno SUHI in Italia è stata valutata con riferimento alle classi urbano-rurali della mappa del Grado di Artificializzazione e Densità della Copertura Arborea (GADA). Quest'ultima è in grado di sintetizzare la struttura del paesaggio italiano nelle due principali componenti di copertura del suolo considerate significativi predittori della LST, e di supportare l'individuazione delle aree che richiedono azioni di mitigazione tramite l'intensificazione della copertura arborea. Dall'analisi condotta a scala provinciale e sulle 14 città metropolitane, è emerso che, al variare delle classi GADA, sebbene la posizione geografica e le caratteristiche climatiche influenzino le temperature, un ruolo importante è da attribuire alla morfologia urbana (in città grandi e compatte l'intensità del fenomeno SUHI è più elevata rispetto a città più piccole e diffuse) e alla presenza di aree arborate all'interno e ai margini del tessuto urbano, che contribuiscono a spiegare la variabilità nell'intensità del fenomeno SUHI tra le diverse città italiane. In città come Firenze e Napoli, l'abbondanza di copertura arborea ai margini del tessuto insediativo denso, comporta una maggiore differenza di

temperature tra l'area urbana e le aree circostanti, cui si associa un andamento, tipico dell'isola di calore urbana, chiaramente visibile osservando le immagini satellitari diurne. In città come Roma o Bari, la ridotta presenza di aree arborate nelle aree rurali porta ad un andamento spaziale delle temperature che mostra valori complessivamente alti sia nell'area urbana che nelle zone circostanti. In corrispondenza di configurazioni simili, per comprendere l'effettiva influenza che le superfici artificiali esercitano sulle temperature superficiali dell'area urbana, occorre prendere in considerazione ulteriori fonti di dati, come quelli sulla temperatura dell'aria o immagini satellitari notturne, la cui disponibilità è, tuttavia, limitata. Nel caso delle immagini satellitari Landsat, a differenza delle immagini diurne, che vengono acquisite di routine con un ciclo di rivisitazione di 16 giorni all'equatore, la frequenza di acquisizione delle immagini notturne ha mostrato, in altri studi, una notevole variabilità geografica che non rende possibile recuperare dati statisticamente significativi a scala vasta (*Wu et al., 2024*). Inoltre, le immagini notturne distribuite dall'USGS e disponibili sulla piattaforma Google Earth Engine sono prive di metadati utili a recuperare informazioni sulle condizioni atmosferiche, per cui è necessario adottare metodologie basate sull'acquisizione di dati ancillari. Alcuni studi hanno tentato di recuperare la LST notturna basandosi su rilevazioni a terra che, tuttavia, non è possibile trovare per qualsiasi luogo e momento (*Sekertekin & Bonafoni, 2020*). La Figura 102 riporta un'immagine notturna acquisita dal satellite Landsat 9 sul comune di Roma, che mostra chiaramente come le aree più densamente urbanizzate presentino temperature notturne superiori rispetto alle aree rurali circostanti, anche in contesti dove tale differenza, considerando le immagini diurne, può apparire meno marcata. I suoli nudi, infatti, tendono a riscaldarsi rapidamente durante il giorno a causa della radiazione solare diretta e alla mancanza di vegetazione, che normalmente fornisce ombra e umidità, per poi raffreddarsi durante la notte. Anche i suoli coperti da asfalto, cemento o altre superfici artificiali, mostrano una tendenza ad assorbire e trattenere il calore durante il giorno, che, tuttavia, viene rilasciato più lentamente durante

la notte, portando a temperature notturne più elevate rispetto alle aree rurali circostanti.

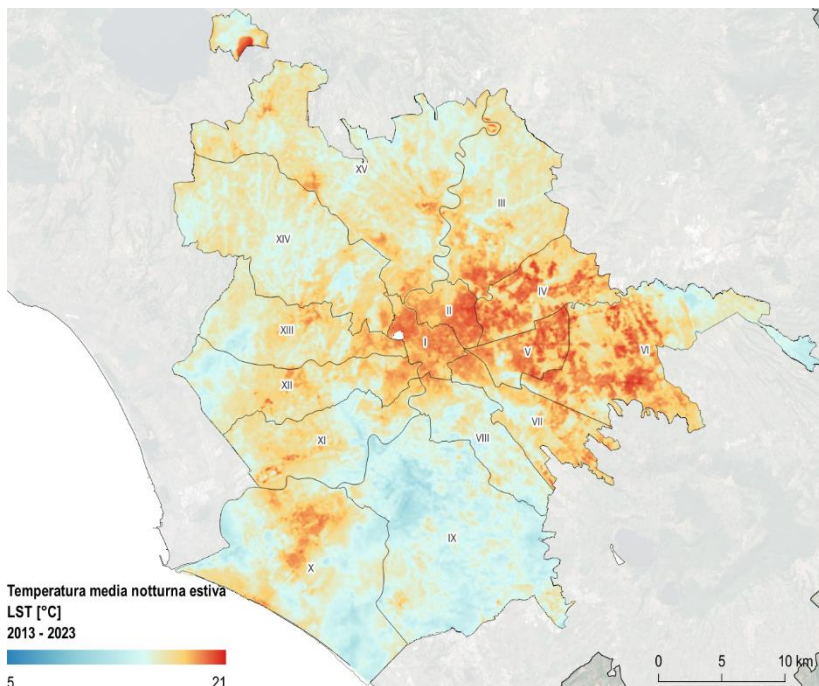


Figura 102. Temperatura media notturna estiva ottenuta da 41 scene grezze disponibili in GEE e restituite dai satelliti Landsat 8 e Landsat 9 per il comune di Roma tra il 2018 e il 2024.

L'analisi delle temperature sui transetti urbano-rurali mostra chiaramente la variabilità dell'effetto di mitigazione esercitata da diversi parchi urbani, confermando i risultati di altri studi che hanno valutato la correlazione tra capacità di mitigazione delle temperature e forma e composizione degli elementi verdi all'interno dei paesaggi urbani. Tali conclusioni, sono rilevanti in un'ottica di progettazione di interventi di forestazione urbana che, tuttavia, devono garantire oltre alla funzione ecologica anche una funzione di tipo sociale. Come osservato negli studi di Maria Livia Olivetti "Città selvatica", non tutta la foresta si può considerare praticabile; il bosco ha bisogno dei suoi spazi e bisogna

garantire una separazione tra i bisogni umani e quelli della natura (Olivetti, 2019). In termini di composizione spaziale e ottimizzazione dei servizi di regolazione microclimatica, questa affermazione potrebbe tradursi in un'alternanza di grandi spazi aperti con ambiti a vegetazione arborea fitta in quanto, dal punto di vista termico, gli spazi aperti di medie e grandi dimensioni con ampie porzioni di superfici arborate, nel comune di Roma, hanno mostrato il potenziale maggiore per configurarsi come cluster termici *cold-spot*. In tal senso, la mappatura dei cluster termici più caldi e più freddi unitamente all'analisi della disponibilità di spazi aperti configurati sul territorio comunale, ha fornito informazioni utili per orientare e ottimizzare le azioni di mitigazione alla scala locale. Nel comune di Roma, il municipio V è risultato essere il più critico in relazione alla disponibilità di aree verdi configurate e alle anomalie termiche registrate. Inoltre, altri studi hanno concluso che, nello stesso municipio, è possibile osservare anche la richiesta più alta di servizi ecosistemici di regolazione della qualità dell'aria (Sebastiani et al., 2021). Gli approfondimenti sul comune di Roma sono replicabili su altri contesti comunali e scalabili su altri ambiti territoriali, costituendo un utile strumento di supporto decisionale alla pianificazione, in grado di produrre risultati comparabili e omogenei.

Nel contesto del processo di mappatura e valutazione dei servizi ecosistemici forniti dalle foreste urbane e periurbane su larga scala, i risultati supportano le affermazioni secondo cui intensificare la copertura arborea nei contesti più densamente artificializzati delle città mediterranee e limitare, al contempo, il consumo di suolo rappresenta una strategia di adattamento climatico basata sul potenziamento dei servizi ecosistemici, prioritaria. Inoltre, rendere operativi gli indicatori proposti relativamente alla vegetazione, alle proprietà termiche superficiali, alla popolazione esposta e alle anomalie termiche intra-urbane, significa fornire indicazioni utili per supportare la Pubblica Amministrazione nei processi decisionali e per garantire il monitoraggio degli interventi di forestazione a scala vasta con bassi costi di realizzazione ed elevata frequenza di aggiornamento.

3.4 Disponibilità e accessibilità alle aree verdi pubbliche urbane nelle 14 città metropolitane

La disponibilità di informazioni tempestive e dettagliate sulla presenza, le caratteristiche e l'accessibilità delle aree verdi urbane è un elemento cruciale per suggerire politiche e iniziative di gestione delle aree urbane per il prossimo futuro, finalizzate a migliorare la qualità della vita dei cittadini e a massimizzare i servizi ecosistemici erogati. A livello locale si sta lavorando all'implementazione di informazioni sempre più dettagliate, con l'obiettivo di supportare la programmazione di interventi di forestazione urbana mirati a migliorare la disponibilità e l'accessibilità alle risorse naturali in ambito urbano. Tuttavia, non è stato ancora compiuto alcuno sforzo per restituire una mappatura di dettaglio a scala vasta. Questa ricerca si colloca in questa lacuna ed esplora per la prima volta la fattibilità di una valutazione su larga scala dell'accessibilità alle aree verdi pubbliche urbane (*Green Urban Public Spaces – GUPS*), basata su dati liberamente accessibili a scala europea (*Urban Atlas - UA*) e globale (*OpenStreetMap - OSM*) e seguendo la metodologia delle Nazioni Unite per il calcolo degli indicatori SDG.



Figura 103 Vista di villa Torlonia e della recinzione lungo via Lazzaro Spallanzani.

3.4.1 Città metropolitane a confronto

La valutazione dell'accessibilità alle GUPS, svolta rispetto ai centri urbani e ai nuclei urbani densi delle 14 città metropolitane, con riferimento a una griglia a maglia esagonale di apotema 50m, ha prodotto i risultati mostrati nella Figura 104 (per la Città Metropolitana di Milano) e in Figura 112 e Figura 113 in appendice (per tutte le altre Città Metropolitane).

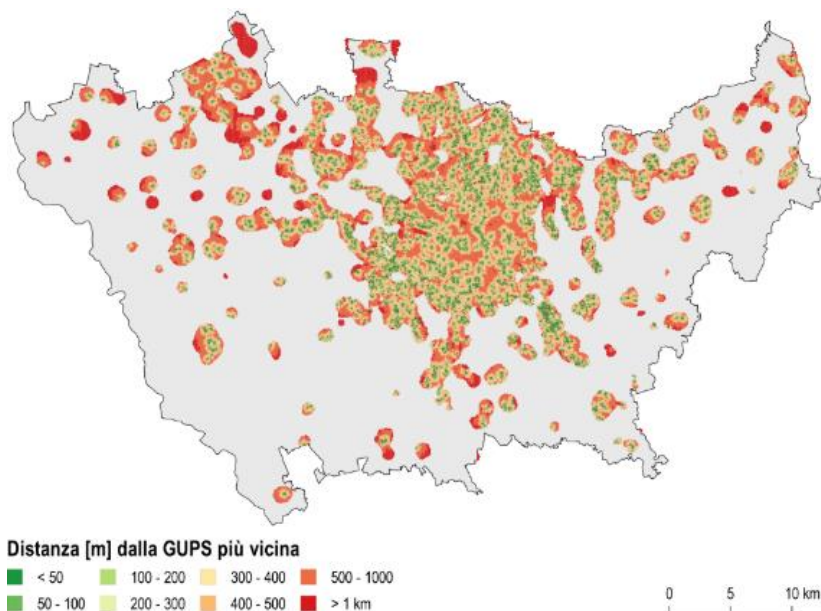


Figura 104. Esempio di mappatura dell'accessibilità alle aree verdi pubbliche urbane (GUPS) tramite dati *OpenStreetMap* nelle aree urbane della Città Metropolitana di Milano

I risultati ottenuti rispetto alla popolazione che ha accesso a una GUPS entro 300 metri (considerando la soglia IUCN) ed entro 400 metri (considerando la soglia dei metadati dell'indicatore SDG 11.7.1) sono sintetizzati nella Tabella 37.

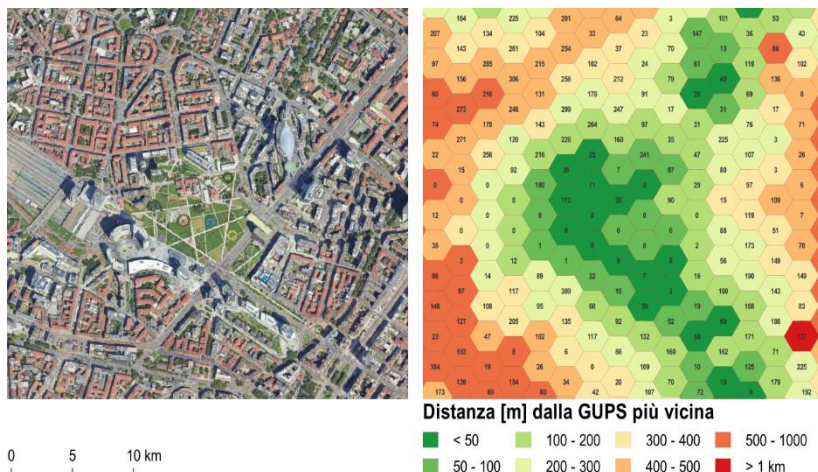


Figura 105. Dettaglio relativo alla valutazione dell'accessibilità al parco biblioteca degli alberi di Milano, con evidenza del dato di popolazione al 2021 associato a ciascun esagono.

Considerando OSM, circa il 28% della popolazione residente nelle aree urbane delle 14 città metropolitane ha accesso a una GUPS entro 300 m, con valori inferiori alla media nazionale a Genova e nelle città metropolitane del sud e delle isole; il valore sale al 40% considerando un raggio di 400 m. Le aree urbane delle Città metropolitane di Milano e Bologna garantiscono l'accesso a una GUPS entro 300 m a piedi a più della metà della popolazione; considerando una distanza massima di 400 m a queste città si aggiungono anche quelle di Torino e Firenze.

I valori ottenuti considerando le GUPS di UA sono inferiori di circa 10 punti percentuali rispetto a quelle OSM, sia per il raggio di 300 metri che per quello di 400 metri. Meno di un quinto della popolazione ha accesso a una GUPS entro 300 metri, e anche in questo caso Genova e le città metropolitane del sud e delle isole (tranne Cagliari) mostrano valori inferiori alla media nazionale. Il valore arriva a poco meno di un terzo

considerando una distanza massima di 400 metri e solo la città metropolitana di Bologna garantisce l'accesso a una GUPS a più della metà della popolazione.

CM	Popolazione che ha accesso ad un'area verde pubblica							
	OSM				UA			
	Entro 300 m		Entro 400 m		Entro 300 m		Entro 400 m	
	[n° abitanti]	[%]	[n° abitanti]	[%]	[n° abitanti]	[%]	[n° abitanti]	[%]
Torino	590.640	37,9	839.799	53,9	279.268	17,9	420.090	27
Genova	124.725	19,1	192.809	29,5	103.234	15,8	159.562	24,4
Milano	1.484.951	49,8	1.978.162	66,4	891.384	29,9	1.283.206	43,1
Venezia	104.030	28,3	155.779	42,3	75.664	20,6	114.489	31,1
Bologna	318.255	56,6	411.987	73,2	217.860	38,7	289.490	51,4
Firenze	247.748	39,6	347.600	55,5	163.729	26,2	239.398	38,2
Roma	994.934	29,4	1.427.518	42,2	738.062	21,8	1.031.376	30,5
Napoli	333.286	12,3	514.773	19	469.901	17,3	677.108	25
Bari	193.773	18,8	308.033	29,9	56.421	5,5	86.897	8,4
Reggio Calabria	15.958	6,3	25.114	10	6.830	2,7	10.101	4
Palermo	85.910	9,9	133.860	15,4	108.735	12,5	166.965	19,2
Messina	19.836	7	32.444	11,4	-	-	-	-
Catania	58.901	7,3	99.027	12,3	33.929	4,2	54.310	6,8
Cagliari	67.043	19,1	107.180	30,6	77.038	22	117.162	33,4
Totale	4.639.989	28,2	6.574.084	40	3.222.055	19,6	4.650.153	28,3

Tabella 37. Numero di abitanti che ha accesso ad una GUPS entro 300 o 400 metri a piedi, con riferimento ai dati OSM e UA.

La valutazione del verde urbano pro-capite (Urban Green Spaces – UGS) permette di supportare l'interpretazione dei risultati ottenuti relativamente all'accessibilità e di completare il quadro informativo sulla disponibilità di aree verdi per le aree urbane delle città metropolitane.

La quota di UGS varia da 53,2 m²/abitante (Torino) a 91,9 m²/abitante (Roma), con un valore medio nazionale di poco inferiore a 75m²/abitante. Considerando solo il verde pubblico, rispetto al verde urbano totale i valori sono 7 volte inferiori (10 m²/abitante) per OSM, e 10 volte inferiori (6,6 m²/abitante) secondo UA. Bologna è la città che registra i valori più elevati, sia con riferimento ai dati OSM (25 m²/abitante) che UA (12 m²/abitante). Secondo UA, Venezia è la città con il valore più elevato di verde pubblico urbano pro-capite (18

m²/abitante). Solo un terzo delle aree urbane delle 14 città metropolitane offre un valore di GUPS pro-capite in linea con il minimo previsto dalla legge sugli standard urbanistici (9 m²/abitante), valori molto al di sotto si rilevano a Reggio Calabria e Catania sia con riferimento a OSM che a UA (Tabella 38).

CM	UGS	UGS Pro-capite	OSM GUPS Pro-capite	UA GUPS Pro-capite
	[ha]	[m ² /ab]	[m ² /ab]	[m ² /ab]
Torino	8.288	53,2	10,3	7,2
Genova	5.185	79,3	3,3	2,1
Milano	18.534	62,2	14,1	10,2
Venezia	3.035	82,4	8,1	18,2
Bologna	3.862	68,6	25,4	12,0
Firenze	5.108	81,6	12,4	8,1
Roma	31.110	91,9	17,6	9,5
Napoli	21.808	80,4	3,4	3,2
Bari	5.117	49,6	1,8	1,2
Reggio Calabria	2.091	83,0	0,9	0,6
Palermo	5.882	67,7	4,1	2,4
Messina	2.709	95,3	1,6	-
Catania	6.916	86,0	1,1	0,8
Cagliari	2.441	69,6	7,5	4,4
Totale	122.087	74,3	10,0	6,6

Tabella 38. Aree verdi urbane (UGS) pro-capite (elaborate su dati CLC Plus Backbone) e aree verdi pubbliche (GUPS) pro-capite (elaborate da dati OSM e UA) per le aree urbane delle 14 Città Metropolitane.

3.4.1.1 Strati informativi intermedi propedeutici alla mappatura dell'accessibilità

Spazializzazione della popolazione

La spazializzazione della popolazione sul grigliato esagonale, relativamente alla porzione di territorio classificata come area urbana, secondo la carta del continuum urbano-rurale 2021, è mostrata nella Figura 106.

La popolazione residente nei territori metropolitani e la quota presente all'interno delle aree urbane è sintetizzata nella Tabella 39. Oltre tre quarti della popolazione delle 14 città metropolitane vive in contesti urbani; i valori più bassi si osservano a Venezia (44%), Messina (47%) e Reggio Calabria (48%), mentre nelle aree urbane di Milano e Napoli si

concentra oltre il 92% della popolazione. Le città che superano la media nazionale sono, nell'ordine, Bari (84%), Cagliari (83%), Roma e Genova (80%).

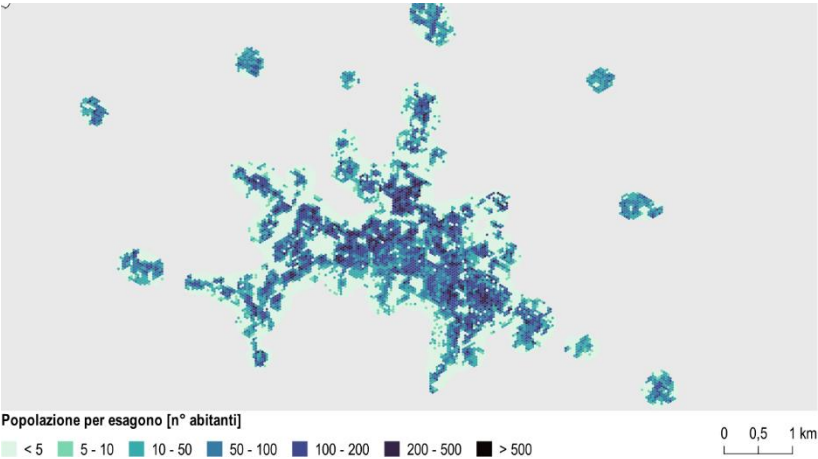


Figura 106. Popolazione per esagono nelle aree urbane della CM di Bologna

CM	Popolazione totale	Popolazione in area urbana	
	[n° abitanti]	[n° abitanti]	[%]
Torino	2.208.370	1.556.719	70,5
Genova	817.402	654.077	80,0
Milano	3.214.630	2.978.997	92,7
Venezia	836.916	368.138	44,0
Bologna	1.010.812	562.695	55,7
Firenze	987.260	626.038	63,4
Roma	4.216.874	3.384.763	80,3
Napoli	2.931.250	2.710.728	92,5
Bari	1.226.784	1.030.954	84,0
Reggio Calabria	522.127	252.003	48,3
Palermo	1.208.991	868.424	71,8
Messina	603.229	284.205	47,1
Catania	1.077.515	803.756	74,6
Cagliari	421.688	350.559	83,1
Totale	21.283.848	16.432.056	77,2

Tabella 39. Popolazione totale (numero di abitanti) e popolazione in area urbana (numero di abitanti e percentuale sulla popolazione totale) delle 14 Città Metropolitane.

Individuazione dei GUPS e dei relativi punti di accesso

L'identificazione dei GUPS è stata effettuata sia rispetto agli spazi verdi OSM che a quelli UA. Per OSM, a partire dai quasi 24.000 poligoni classificati con i tag “Garden” e “Park”, sono stati selezionati i 5.333 più grandi di mezzo ettaro, per una superficie totale di 33.610 ettari.

Per quanto riguarda le UA, dai 13.421 poligoni classificati come “1.4 - Aree artificiali vegetate non agricole” sull'intero territorio dei 14 MC, sono stati selezionati i 4.526 più grandi di mezzo ettaro e con superficie consumata inferiore al 20%, per un totale di 15.378 ettari. I risultati per ciascun Città Metropolitana (CM) sono riportati nella Tabella 40.

CM	Poligoni OSM			Poligoni UA		
	n° tot	n° >0,5 ha	[ha]	n° tot	n° >0,5 ha	[ha]
Torino	2,990	624	2,089	1,808	594	1,865
Genova	636	108	235	442	129	248
Milano	4,449	1380	4,721	2,217	877	3,813
Venezia	1238	336	854	981	256	670
Bologna	1913	1002	3,623	787	411	1,151
Firenze	926	273	776	801	305	763
Roma	2,924	765	5,957	2,847	1,000	4,892
Napoli	3,620	340	6694	1,455	468	985
Bari	1114	151	281	624	104	200
Reggio Calabria	397	41	55	178	21	64
Palermo	436	74	425	551	137	302
Messina	497	41	96	-	-	-
Catania	2306	85	288	365	78	111
Cagliari	513	113	7516	365	146	314
Totale	23,959	5,333	33,610	13,421	4,526	15,378

Tabella 40. Per il territorio di ciascuno dei 14 MC sono riportate: le aree mappate con i tag “Garden” e “Park” da OSM (in termini di numero totale di patch, numero di patch con superficie superiore a mezzo ettaro e loro superficie totale) e le aree classificate come “1.4 - Aree vegetate artificiali non agricole” da UA (in termini di numero totale di patch, numero di patch con SC <20% e loro superficie totale). OSM = Open Street Map, UA = Urban Atlas, SC = suolo consumato.

L'identificazione dei punti di accesso effettuata considerando i nodi mappati, l'intersezione tra GUPS e strade e, in loro assenza, un punto ogni 100 metri, ha dato i risultati riportati nella Tabella 41. In particolare, per le GUPS di OSM, sono stati identificati 35.646 punti di accesso, due terzi dei quali derivanti dall'intersezione tra i poligoni GUPS e la rete stradale e meno di uno su 10 già mappato da OSM come “Gate” o

“Entrance”. Per il database UA sono stati considerati solo gli accessi ogni 100 metri lungo il perimetro (Tabella 41).

CM	Numero di accessi alle GUPS			
	Gate/Entrance	Derivati	Ogni 100 m	Totale
Torino	279	2.718	794	3.791
Genova	130	569	49	748
Milano	942	8.221	845	10.008
Venezia	77	1.263	437	1.777
Bologna	192	4.818	660	5.670
Firenze	113	2.147	549	2.809
Roma	729	758	4.429	5.916
Napoli	139	1.036	857	2.032
Bari	58	431	258	747
Reggio Calabria	9	129	51	189
Palermo	36	233	139	408
Messina	20	68	81	169
Catania	61	200	201	462
Cagliari	66	674	180	920
Totale	2.851	23.265	9.530	35.646

Tabella 41. Punti di accesso individuati considerando quelli mappati da OSM, le intersezioni tra perimetro delle GUPS e l’infrastruttura viaria e, in loro assenza, distribuendo un punto ogni 100m lungo il perimetro della GUPS.



Figura 107. Accesso limitato ai soli ingressi per il Parco Cavallo Pazzo a Garbatella, Roma. Foto scattata da Angela Cimini a luglio 2023.

3.4.2 Approfondimento sul comune di Roma

L'accesso alle aree verdi pubbliche (GUPS) all'interno dell'area urbana del comune di Roma è stata correlata con la mappa delle anomalie termiche (cfr. § 3.3.3) per valutare la disponibilità e l'accessibilità a GUPS (ottenute dal database OSM) che si configurano come isole di raffrescamento (Cold-Spot – CS). Inoltre, l'approfondimento sui 15 municipi è utile per stabilire con maggiore chiarezza quali sono le aree più critiche.

Poco meno di un terzo delle GUPS sviluppa comportamenti termici CS e solo l'1,4% è caratterizzato da anomalie termiche Hot-spot (HS) (Tabella 42). Osservando i risultati in Tabella 43 il 32% della popolazione ha la possibilità di accedere entro 300 m ad un'area verde pubblica e solo l'8% ad una GUPS CS, di cui il 3%, pari a poco più di 27.000 abitanti, appartiene alla fascia di popolazione vulnerabile (con un'età inferiore a 14 anni e superiore a 65 anni). Oltre i 300 m (Tabella 44), fino ad una distanza massima di 10km, quasi il 10% della popolazione (poco meno di 176.000 abitanti) ha la possibilità di trovare una GUPS in grado di abbattere le temperature, mediamente, di 6 °C. Un risultato rilevante riguarda anche gli oltre 11.000 abitanti, di cui 3.600 appartenenti alle categorie più vulnerabili, che entro una distanza di 300m hanno accesso ad una GUPS che sviluppa comportamenti termici HS in cui le temperature sono mediamente superiori di 5 °C rispetto all'area urbana. Questa quota supera i 41.000 abitanti se si considerano distanze superiori a 300m.

Nella mappa in Figura 109, sono rappresentate le GUPS in funzione della classe di anomalia termica prevalente. Mentre le GUPS CS si localizzano prevalentemente nei municipi II, XIV e XV, le GUPS HS si concentrano nella zona a sud-est di Roma, tra i municipi V, VI e VII. Quelli di dimensioni maggiori, sono il Parco di Centocelle, parco Bonafede, Parco Luigi Gastinelli e Parco Salvador Allende. Come descritto nel paragrafo 3.3.3 ” le aree CS sono caratterizzate da un'elevata presenza di copertura arborea e di corpi idrici, mentre in quelle HS la copertura prevalente è quella dei suoli nudi che, unitamente alla presenza di

superfici artificiali sui margini, contribuiscono all'innalzamento delle temperature superficiali durante le giornate estive.

A livello municipale, l'unico municipio che garantisce a più della metà della popolazione totale e al 20% della popolazione vulnerabile in area urbana l'accesso ad un'area verde pubblica entro 300 m, è il municipio VIII (53%). Seguono, nell'ordine, il municipio IV (48%), II (46%), V (42%) e III (41%). Il municipio V è anche quello con la più alta densità abitativa (oltre 11.000 abitanti per km²); tuttavia, l'analisi precedente ha mostrato come diverse GUPS localizzate all'interno di questo municipio sviluppino comportamenti termici anomali di tipo Hot-spot. Quelli che, al contrario, mostrano i valori più bassi di accessibilità, anche al di sotto del 20% della popolazione totale, sono i municipi XIII (13%), XI (14%), XV (17%) e VI (19%) (Figura 108).

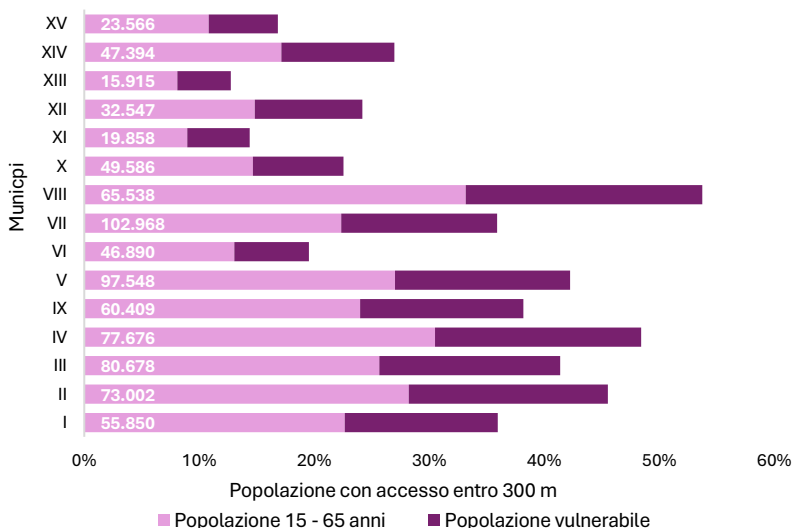


Figura 108. Percentuale di popolazione vulnerabile e tra i 15 e i 65 anni di età che hanno accesso ad un'area verde pubblica entro 300m per municipio. Per ogni municipio viene specificata la popolazione totale che ha accesso ad un'area verde pubblica entro 300 m.

GUPS	Superficie	
	[ha]	[%]
Neutre	3.812	68,9
Cold-Spot	1.644	29,7
Hot-spot	79	1,4
Totale	5.535	

Tabella 42. Ripartizione delle GUPS per anomalia termica registrata.

Entro 300 metri	15 – 65 anni	≤ 14 e ≥ 65 anni	Totale	
	[n° abitanti]	[n° abitanti]	[n° abitanti]	[%*]
Neutre	484.629	283.035	767.664	90,3
Cold-spot	43.559	27.169	70.728	8,3
Hot-spot	7.713	3.630	11.343	1,3
Totale	535.901	313.834	849.735	32,1*

Tabella 43. Popolazione nell'area urbana di Roma che ha accesso, entro un percorso a piedi di 300 metri, a GUPS mappate da OpenStreetMap e caratterizzate in termini di anomalie termiche Cold-spot, Hot-spot e Neutre, con particolare riferimento alle fasce vulnerabili (≤ 14 e ≥ 65 anni). (*) la percentuale è calcolata rispetto alla popolazione totale nell'area urbana di Roma.

Oltre 300 metri	15 – 65 anni	≤ 14 e ≥ 65 anni	Totale	
	[n° abitanti]	[n° abitanti]	[n° abitanti]	[%*]
Neutre	1.015.258	563.606	1.578.864	87,9
Cold-spot	109.521	66.418	175.938	9,8
Hot-spot	28.109	13.246	41.354	2,3
Totale	1.152.888	643.269	1.796.157	67,9*

Tabella 44. Popolazione nell'area urbana di Roma che ha accesso, con un percorso a piedi di oltre 300 metri e fino a 10km, a GUPS mappate da OpenStreetMap e caratterizzate in termini di anomalie termiche Cold-spot, Hot-spot e Neutre, con particolare riferimento alle fasce vulnerabili (≤ 14 e ≥ 65 anni). (*) La percentuale è calcolata rispetto alla popolazione totale nell'area urbana di Roma.

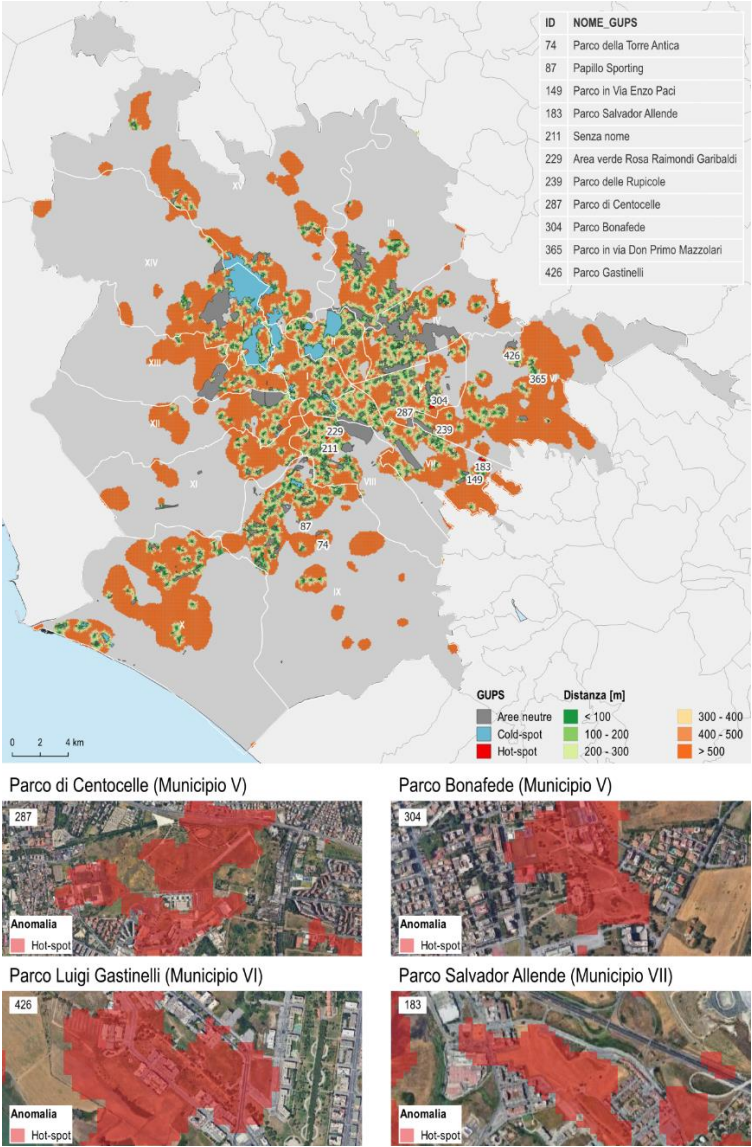


Figura 109. Accessibilità alle GUPS nell'area urbana di Roma e caratterizzazione in funzione delle anomalie termiche registrate. Le immagini satellitari in basso mostrano l'incidenza delle anomalie termiche Hot-Spot su alcuni parchi di Roma.

Discussioni

Questo studio presenta per la prima volta una valutazione su larga scala dell'accessibilità delle GUPS in Italia, basata sulla metodologia delle Nazioni Unite per il calcolo dell'indicatore 11.7.1 degli SDG. La valutazione è strettamente dipendente dalla disponibilità di dati di input adeguati su punti di partenza, reti stradali (accessibili a piedi), aree verdi urbane (da raggiungere) e relativi punti di accesso.

Con riferimento ai **punti di partenza**, la griglia a maglia esagonale regolare consente una buona copertura dell'area di studio ed è facilmente aggiornabile, replicabile e interpretabile. Inoltre, offre una rappresentazione più omogenea dei punti di partenza e una distribuzione più realistica della popolazione nell'area urbana, rispetto ad altri studi che considerano, per esempio, i centroidi dei poligoni delle sezioni di censimento. Una rappresentazione più dettagliata richiederebbe informazioni sulla posizione dei singoli edifici residenziali e dei relativi punti di accesso, che tuttavia spesso non sono facilmente disponibili o regolarmente aggiornate. In Italia, i dati sugli edifici residenziali sono raccolti in database catastali o nel "database nazionale di sintesi" (DBSN), entrambi non sempre aggiornati e con differenze da regione a regione. In alternativa è possibile utilizzare il database OSM, considerando però, anche in questo caso, la disomogeneità dell'aggiornamento del dataset rispetto ad altri dati ufficiali come la Carta nazionale del suolo consumato di ISPRA.

La **rete stradale** fornita da OSM sui 14 MC fornisce una rappresentazione soddisfacente, fatta eccezione per alcune lacune nella mappatura che influenzano il calcolo dell'accessibilità rispetto ad alcuni punti di partenza. Tuttavia, l'approccio partecipativo alla base dell'attività di mappatura in OSM offre la possibilità di correggere gli errori presenti nel dataset.

L'identificazione dei GUPS e dei relativi punti di accesso è l'aspetto più critico, sia dal punto di vista geometrico che semantico, sia per UA che per OSM, poiché richiede una buona conoscenza dell'area di studio in termini di copertura e uso del suolo. L'informazione sulla copertura

del suolo permette di identificare le aree vegetate ed è facilmente ottenibile attraverso il telerilevamento o da dati esistenti, mentre l'informazione sull'uso è necessaria per discriminare gli usi pubblici da quelli privati, ad esempio i cortili interni degli edifici, i giardini privati e le componenti verdi dell'arredo urbano. I due dataset mostrano risultati diversi in termini di numero ed estensione delle GUPS mappate; il database UA è caratterizzato da omogeneità temporale, spaziale e semantica, garantendo una mappatura uniforme delle aree verdi urbane sulle principali FUA, ma include anche aree non riconducibili a GUPS (cimiteri, auditorium, piazze altamente artificializzate, teatri, campi sportivi, ville, ecc.) o aree precedentemente naturali in cui sono state registrate variazioni di copertura dovute al consumo di suolo dopo il 2018 (anno di riferimento della versione più recente dei dati) e che devono essere filtrate. A tal fine, è stata introdotta la soglia sulla percentuale di suolo consumato per l'intera area di studio che, tuttavia, può portare a una sottostima dell'accessibilità. Questo primo risultato, per quanto conservativo, può essere migliorato considerando soglie diverse in relazione alle specificità territoriali o introducendo dati accessori, come i censimenti forniti dai Comuni (che però sono spesso indisponibili) e previsti anche dalla legge 10/2013 “Norme per lo sviluppo degli spazi verdi urbani”²³.

La potenza del database OSM risiede nella sua grande versatilità, ma anche nella capacità di valorizzare le informazioni provenienti da chi conosce il territorio e nella possibilità di implementare ulteriormente nuove informazioni. Rispetto a UA, l'approccio aperto offre ampie possibilità per migliorare l'acquisizione di dati utili alla valutazione dell'accessibilità, che attualmente sono spesso carenti. In tal senso, si ritiene utile incoraggiare la compilazione dei tag “access” e “fee”, già previsti nel sistema di mappatura OSM, per distinguere, ad esempio, le aree aperte con accesso libero da quelle private o con accesso limitato, occasionale o a pagamento. OSM potrebbe configurarsi come uno

²³ Questa legge è stata il punto di partenza per valorizzare il ruolo degli spazi verdi nelle città non solo da un punto di vista ambientale ma anche sociale e culturale

strumento ideale per valutare servizi ecosistemici appartenenti alla sfera culturale/sociale forniti dalle GUPS e connessi con la fruibilità e il potenziale di un'area in termini di valori estetici, spirituali, educativi e ricreativi. Questi aspetti sono legati alla sfera esperienziale e, pertanto, non possono essere dedotti attraverso tecniche di telerilevamento o altri strumenti di monitoraggio simili. Un esempio è l'attività svolta nel comune di Roma per valutare l'apprezzamento degli spazi verdi pubblici da parte della popolazione attraverso le informazioni estratte dai Social Network (Benati et al., 2024). Sarebbe utile implementare tali informazioni anche per la descrizione della rete stradale, per tenere conto della reale fruibilità del percorso, ad esempio, in termini di senso di sicurezza percepito, presenza di ostacoli o barriere architettoniche o pendenza delle strade; un esempio è l'iniziativa *Bike Improver Day*²⁴ a Trento, per raccogliere informazioni sulla rete ciclabile in termini di soddisfazione degli utenti e di percezione di rischio e/o degrado dell'infrastruttura.

Tuttavia, il popolamento in *crowdsourcing* del database OSM introduce delle fonti di incertezza che vanno tenute in considerazione nell'utilizzo del dato. Le principali criticità sono legate all'interpretazione degli elementi presenti sul territorio da parte dell'operatore, in termini di omogeneità della mappatura, da un punto di vista sia tematico che geometrico, da considerare nella lettura dei dati. Infatti, l'assenza di indicazioni stringenti sull'unità minima mappabile e sulle definizioni di GUPS influisce significativamente sulla forma dei poligoni e sull'attribuzione dei tag, portando anche a risultati potenzialmente incoerenti o fuorvianti.

La Figura 110 mostra alcune delle principali criticità riscontrate nell'analisi dei tag OSM “*park*” e “*garden*”, che influiscono sulla valutazione dell'accessibilità. In alcuni casi, vengono mappati con il “tag” “*park*” rotatorie o viali (immagini a e b) alberati che non hanno caratteristiche tali da renderli GUPS in cui l'allontanamento dal contesto cittadino può essere effettivamente percepito. In altri casi, mappati con

²⁴ <https://www.wikimedia.it/news/partecipa-a-bikingimprover-day-a-trento/>

lo stesso “tag” sia le aree aperte al pubblico che i giardini privati o gli spazi con restrizioni di accesso al pubblico (immagini c e d). Un'ulteriore criticità è rappresentata dalla disomogeneità nella mappatura di alcune aree verdi, che sono delimitate in modo parziale, incompleto o non sono affatto mappate.



Figura 110. Esempi di mappatura nei dati OSM (identificati nelle figure con poligoni verdi) che influenzano la valutazione dell'accessibilità: (a) Rotonda stradale mappata come

parco, (b) viale alberato mappato come parco, (c) giardini privati descritti con il tag garden, lo stesso tag viene utilizzato anche per mappare giardini pubblici come il giardino degli aranci a Roma (d), (e) parziale mappatura delle aree verdi pubbliche nell'area residenziale.

La scelta di selezionare poligoni con una dimensione minima di 0,5 ettari permette di escludere dal calcolo aree che generalmente non sono GUPS (in particolare rotatorie, arredi verdi o corti verdi); questa soglia ha avuto un effetto maggiore sui dati OSM, mentre ha avuto un impatto minore su UA che ha un MMU simile alla soglia stessa. Nel complesso, entrambi i dati mostrano limiti e potenzialità per l'identificazione delle GUPS, anche se OSM appare più adeguato, soprattutto nell'identificazione dei punti di accesso e nella valutazione dell'accessibilità. La rigida definizione di aree verdi urbane fornita dalla classe "1. 4 - Aree vegetate artificiali non agricole" di UA (che costringe a individuare una strategia e/o dati accessori per filtrare le aree non GUPS, come i cimiteri e i campi sportivi), la ridotta frequenza di aggiornamento (non tiene in considerazione le aree che nel frattempo hanno subito trasformazioni da suoli naturali a suoli artificiali), la limitata copertura spaziale (il dato è disponibile solo per le FUA europee con almeno 50.000 abitanti), e l'assenza di informazioni sugli accessi (che rendono necessario l'inserimento di punti di accesso fittizi) condizionano l'identificazione di GUPS. OSM, pur avendo una maggiore eterogeneità nella qualità della mappatura, offre una copertura spaziale molto più ampia e maggiori possibilità di interazione con i dati, con l'opportunità di introdurre criteri di mappatura adeguati alla valutazione dell'accessibilità.

Le informazioni sui **punti di accesso** sono parziali su OSM e non vengono fornite da UA. L'introduzione dei punti derivati ha permesso di ridurre il numero di poligoni privi di accessi e gli errori che si ottengono inserendo punti di accesso a intervalli regolari senza considerare le caratteristiche dei perimetri delle GUPS; andrebbe, comunque, incoraggiata la mappatura di queste entità, essenziali per ottenere una valutazione dell'accessibilità a una GUPS aderente alla realtà. Nel caso di UA, l'introduzione di accessi fittizi ogni 100 metri può aver portato a una sovrastima dell'accessibilità, soprattutto nelle aree verdi con un numero limitato di accessi (ad esempio quando i perimetri delle aree

verdi presentano barriere fisiche). Su OSM, la sovrastima dell'accessibilità è più limitata e può riguardare solo i poligoni per i quali le informazioni sull'accesso non sono fornite nativamente o dove non è stato possibile ricavare tali informazioni incrociando i poligoni delle GUPS con la rete stradale.

La disponibilità di **dati demografici** adeguatamente spazializzati e aggiornati è un ulteriore elemento che incide notevolmente sulla valutazione dell'accessibilità, in quanto determina la distribuzione della popolazione intorno alla GUPS. In Italia, i dati delle sezioni di censimento ISTAT sono un valido supporto per la spazializzazione della popolazione, ma la frequenza di aggiornamento (10 anni) condiziona il monitoraggio. I dati sulla popolazione comunale sono aggiornati annualmente e sono spazializzabili, anche se non permettono di considerare la corretta distribuzione della popolazione all'interno del comune.

Le riflessioni riportate in questo lavoro sono valide in tutte le aree coperte da OSM e UA. Sebbene questa ricerca si sia focalizzata sull'area urbana delle 14 Città Metropolitane italiane, la valutazione può essere estesa ad altre aree del territorio italiano o all'intero territorio nazionale, grazie alla copertura della griglia di popolazione (prodotta da ISPRA a partire dai dati ISTAT 2021) e dei dati OSM (relativi alla rappresentazione della rete stradale e delle aree verdi). Inoltre, la copertura globale dei dati OSM permette di estendere le considerazioni presentate in questo lavoro, relativamente alla rete stradale, alle aree verdi e ai punti di accesso anche al di fuori del territorio europeo, mentre la spazializzazione della popolazione (e, di conseguenza, la rappresentazione dell'area urbana secondo DEGURBA) richiede la disponibilità di dati demografici e di informazioni sulla localizzazione dell'edificato residenziale affidabili e aggiornati. In questo senso, i dati del CLMS *High Resolution Layer* (HRL) consentono di replicare la metodologia di spazializzazione della popolazione su qualsiasi area del territorio europeo per la quale siano disponibili dati demografici. In alternativa, per le aree extraeuropee, è possibile utilizzare la griglia

demografica globale o il layer DEGURBA di Eurostat con una risoluzione spaziale di 1 km.

I risultati hanno mostrato che nelle aree urbane delle 14 Città Metropolitane meno di una persona su tre ha accesso a una GUPS nel raggio di 300 metri a piedi (meno di una su cinque per i dati UA) e in 9 delle 14 Città Metropolitane la disponibilità di GUPS pro capite è inferiore ai 9 m²/abitante richiesti dalla legge sugli standard urbanistici; infatti, anche se il verde totale dell'area urbana è di un ordine di grandezza superiore ai GUPS, questo comprende anche aree non utilizzabili dal pubblico per attività ricreative, come rotatorie, aree verdi di pertinenza di infrastrutture o di arredo urbano, aree agricole private e aree verdi private. Inoltre, si notano differenze significative tra le città del nord e del centro rispetto a quelle del sud e delle isole, che mostrano i valori più bassi di disponibilità e accessibilità alle GUPS indipendentemente dai dati di input utilizzati (OSM o UA). Tali risultati sottolineano la necessità di incrementare la disponibilità di verde pubblico pro-capite, di collocarlo strategicamente all'interno del tessuto insediativo e progettarlo con l'obiettivo di massimizzare il contributo ecosistemico offerto.

L'analisi condotta sul comune di Roma, integrando tutti gli strati informativi cartografici prodotti in questa ricerca, è un esempio di analisi multi-criteriale del paesaggio urbano indirizzata alla valutazione dei servizi ecosistemici di regolazione e culturali erogati dalle foreste urbane in contesto mediterraneo, in grado di soddisfare i requisiti di monitoraggio previsti in ambito europeo e internazionale e di individuare le aree prioritarie di intervento.

In questo senso, il caso studio del comune di Roma costituisce un buon esempio dell'efficacia di questo sistema di strumenti di supporto decisionale che, a partire dalla lettura integrata dei dati, ha permesso di individuare il municipio V come ambito comunale prioritario di interventi. Se si osservano i valori riassunti in Figura 111 si nota, infatti, come l'area presenti elevata densità di popolazione residente e disponibilità di spazi destinati dal PRG a "verde pubblico" e "servizi pubblici di livello locale", ai quali ha accesso un'elevata percentuale

della popolazione residente. Tali spazi, necessitano, tuttavia, della definizione di interventi volti a migliorarne il comfort termico durante il periodo estivo (per via dell'elevata presenza di anomalie hot-spot), oltre che la concentrazione di inquinanti (come si osserva dai risultati della ricerca di *Sebastiani et al., 2021*).

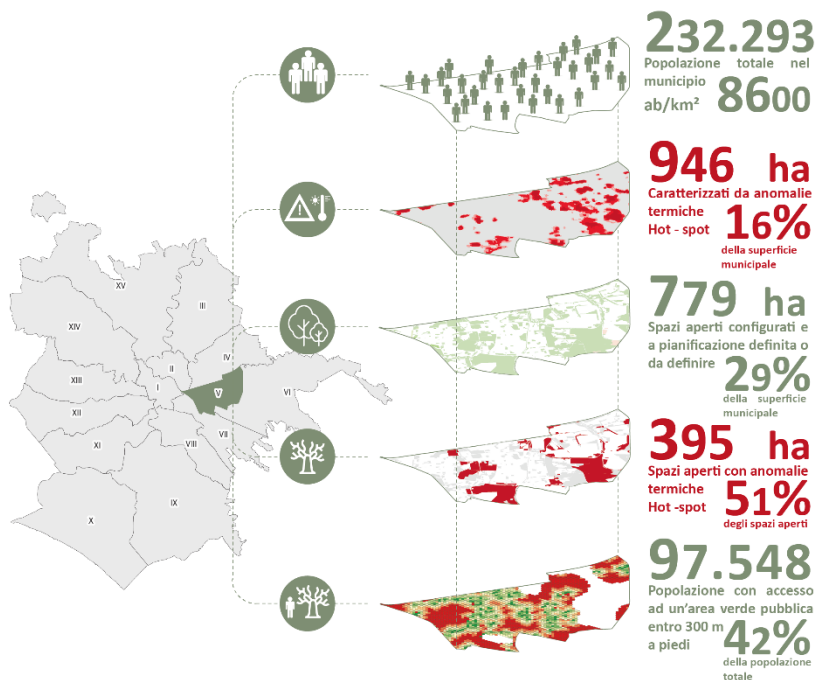


Figura 111. Dati principali di temperatura, accessibilità, popolazione e disponibilità di aree verdi pubbliche nel municipio V del comune di Roma.

4. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Le attività condotte in questo lavoro hanno consentito di mettere a punto strumenti cartografici a scala nazionale innovativi che contribuiscono alla ricerca sul progetto di paesaggio, offrendo un quadro sulla configurazione spaziale dei paesaggi urbani (con la mappatura del Continuum urbano-rurale), sulle dinamiche di trasformazione in atto e sulla capacità di utilizzare in modo efficiente le risorse naturali (tramite la valutazione dell'SDG delle Nazioni Unite 11.3.1 e degli obiettivi della NRR). Ciò si concretizza anche nella necessità di infrastrutture verdi urbane (la ricerca offre una proposta metodologica per l'aggiornamento delle mappe forestali e per l'individuazione delle foreste urbane) adeguate a erogare servizi ecosistemici in grado di migliorare la qualità della vita della popolazione (in particolare, la regolazione microclimatica e l'accessibilità alle aree verdi pubbliche). Le mappe sono state progettate per rispondere a tre principi di base: l'uso di dati e strumenti *Open Source*, per sostenere la democratizzazione nello studio e nel monitoraggio del paesaggio, la conformità con le direttive di sostenibilità europee e internazionali, per rendere il processo di adattamento condivisibile a più livelli e in linea con il rispetto degli obblighi normativi, e la fruibilità da parte della Pubblica Amministrazione (PA), per sostenere in modo concreto e operativo la progettazione di interventi di forestazione efficaci e orientati al potenziamento dei servizi ecosistemici.

Il paesaggio urbano è l'elemento centrale di tutte le analisi presentate in questa ricerca, per via delle complesse e urgenti sfide ambientali, sociali, di pianificazione, conservazione e gestione delle risorse naturali imposte dall'insostenibile combinazione delle dinamiche di urbanizzazione globale con gli effetti della crisi climatica. Tale complessità coinvolge molteplici aspetti, primo tra tutti la necessità di stabilire il significato stesso di cosa è "urbano". In questo senso, le analisi presentate nel primo capitolo della tesi hanno evidenziato l'enorme mole di dati disponibili per la rappresentazione dei paesaggi urbani, provenienti dal programma Copernicus dell'Unione Europea, disponibili in ambito nazionale o generate da piattaforme di *citizen science* che, pur garantendo grande versatilità e flessibilità nella rappresentazione, introducono delle criticità dal punto di vista

dell'interoperabilità, aumentando il rischio di utilizzare informazioni obsolete o non rilevanti o difficilmente integrabili e combinabili. Coerentemente con il principio di conformità con gli indirizzi politici, la ricerca fa chiarezza sulle definizioni riconosciute dalle principali direttive europee e internazionali come standard per valutare i progressi verso il raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità, tra i quali le iniziative di forestazione urbana, e applica al contesto italiano la metodologia di classificazione DEGURBA proposta dall'EUROSTAT e adottata dagli SDG delle UN e dal nuovo regolamento sul ripristino della natura.

La ricerca ha adottato strumenti prodotti in ambito nazionale dai principali istituti di ricerca, con livelli di accuratezza tematica, spaziale e temporale maggiori rispetto a quelli considerati dal JRC, con l'intenzione di raggiungere un duplice obiettivo:

- sviluppare una mappa in linea con il DEGURBA di Eurostat dal punto di vista metodologico e geometrico, ma basata sui nuovi e più dettagliati dati di popolazione aggiornati al 2021, che permettesse di rispondere alle richieste imposte dalla NRR relativamente all'individuazione degli ambiti amministrativi comunali e sub-comunali da sottoporre agli obblighi di azzeramento della perdita netta di superfici naturali e copertura arborea entro il 2030 e di incremento entro il 2050;
- ottenere un prodotto che, pur mantenendo la coerenza metodologica con il modello DEGURBA, consentisse il raggiungimento di un maggiore dettaglio spaziale, massimizzando la risoluzione geometrica offerta dai dati di input e permettendo di cogliere le specificità territoriali in modo più aderente alla realtà rispetto alla rigida delimitazione imposta dalla griglia a 1km di Eurostat.

Il Continuum urbano-rurale soddisfa tali requisiti, allineandosi, inoltre, con i principali dati Copernicus per la rappresentazione degli ecosistemi forestali e della copertura del suolo e costituisce uno strumento con il potenziale per supportare la redazione dei Piani di Ripristino previsti nell'articolo 14 della NRR.

La mappa del Continuum urbano-rurale a 10 metri di risoluzione presenta una notevole coerenza con quella del JRC nella rappresentazione del paesaggio urbano anche a scala comunale, con alcune differenze imputabili prevalentemente alla definizione della classe “aree suburbane/periurbane” e alla diversa risoluzione dei dati di input. Tale differenza, ha permesso di superare alcune limitazioni osservate nella mappatura del JRC in merito all’attribuzione del grado di urbanizzazione ai comuni capoluogo di provincia, costituendo un vantaggio notevole nella selezione degli ambiti da sottoporre agli obblighi secondo la NRR.

Le principali criticità riscontrate nell’applicazione della metodologia Eurostat riguardano la disponibilità di dati di input dettagliati e aggiornati soprattutto con riferimento alla popolazione. Tuttavia, combinando il dettaglio tematico della carta nazionale del consumo di suolo con i dati di popolazione ISTAT a scala comunale per il 2018, è stato possibile ottenere, comunque, una rappresentazione con elevata affidabilità aggiornabile a cadenza annuale.

Nell’ottica di migliorare la descrizione del tessuto insediativo, sono state portate avanti diverse iniziative connesse con le attività di monitoraggio del consumo di suolo di ISPRA-SNPA. In primo luogo, è stato definito un sistema di classificazione per l’attribuzione di un attributo di uso del suolo ai nuovi cambiamenti, allo scopo di aumentare il contenuto informativo della carta nazionale del consumo di suolo. Tale attività è stata condotta definendo classi di uso coerenti con le indicazioni in materia di sistemi di classificazione, fornite in ambito Copernicus dal Gruppo EAGLE (*Eionet Action Group on Land monitoring in Europe*). Nell’ambito dell’attività di aggiornamento della mappatura del consumo di suolo è stata, inoltre, sviluppata una Web-app per il coinvolgimento degli operatori di comuni, province e regioni nelle attività di validazione della cartografia nazionale, con l’obiettivo di democratizzare ulteriormente l’attività di monitoraggio. In futuro lo sviluppo della piattaforma potrebbe essere orientato alla raccolta di informazioni puntuali sulle trasformazioni in atto sul territorio e, in particolare, all’interno dei paesaggi urbani secondo un approccio “*bottom-up*”,

includere le iniziative di rigenerazione e forestazione urbana orientate a massimizzare il ruolo del verde urbano nell'erogazione di servizi ecosistemici per la popolazione.

Alla luce del quadro politico e strategico sia europeo che nazionale, le rappresentazioni proposte del paesaggio urbano italiano svolgono un ruolo cruciale per definire l'ambito di applicazione delle azioni di ripristino degli ecosistemi urbani, soddisfacendo i requisiti di monitoraggio e pianificazione previsti dai regolamenti, evidenziando i punti di forza e debolezza dei processi decisionali in atto sul territorio e permettendo di comprendere in che misura sono stati raggiunti gli obiettivi strategici. In questo senso, le mappe sono state integrate all'interno del rapporto sul consumo di suolo di ISPRA e hanno permesso di condurre per la prima volta la valutazione dell'SDG 11.3.1 coerentemente con le indicazioni fornite dalle Nazioni Unite e sviluppando indicatori ancillari per guidare la lettura dei risultati. Questi ultimi confermano la tendenza a densificare il tessuto insediativo urbano anche in presenza di condizioni demografiche stabili o decrescita della popolazione, mostrando chiaramente l'incapacità degli attuali strumenti di governo del territorio di adempiere all'obiettivo di azzeramento del consumo di suolo sancito dalla NRR. È dunque urgente una profonda revisione che introduca vincoli urbanistici, promuova la riqualificazione e il riuso del tessuto urbano e che sia orientata alla rigenerazione urbana. Le prescrizioni della NRR possono essere considerate come un nuovo standard che integra e supera il tradizionale riferimento al verde degli standard urbanistici. I nuovi riferimenti sono la dimensione della città costruita e la delimitazione dell'area urbana oltre i tradizionali limiti amministrativi.

Assumendo questa nuova visione dei paesaggi urbani come standard sostenuto dagli indirizzi strategici comunitari per valutare e monitorare la disponibilità di infrastrutture verdi e di servizi ecosistemici erogati, la ricerca ha offerto una rappresentazione spaziale e una valutazione delle foreste urbane (come affermato anche dalla Strategia Nazionale del verde urbano, rappresentano la spina dorsale delle infrastrutture verdi), in linea con i requisiti di monitoraggio internazionali ed europei e che,

contestualmente, si configurano come strumenti utili a individuare localmente gli ambiti di applicazione delle iniziative di forestazione urbana.

La disamina dei prodotti cartografici disponibili per la mappatura delle foreste urbane ha evidenziato due questioni critiche: da un lato la sovrabbondanza e l'eterogeneità dei dati disponibili in ambito nazionale ed europeo, e la conseguente necessità di una sintesi, e dall'altro la mancanza di una cartografia aggiornata che sia in grado di descrivere il paesaggio forestale, anche cogliendo le specificità della definizione di foresta urbana della FAO. L'attività di aggiornamento della carta forestale su base tipologica della regione Lazio, presentata in questa ricerca, è stata condotta con l'obiettivo di rispondere alle questioni sollevate nella fase di analisi dello stato dell'arte e garantendo il rispetto di due condizioni: la riduzione dei costi di produzione, sia in termini di tempo che di tecnologie impiegate, e la valorizzazione delle informazioni cartografiche più recenti, messe a disposizione dal CLMS, omogenee e condivise a livello europeo.

La metodologia di aggiornamento basata su tecniche GIS di analisi spaziale ha permesso, in primo luogo, di incrementare il dettaglio geometrico della rappresentazione rispetto alla cartografia del 2011 e la separazione delle specie arboree da quelle arbustive. Oltre all'aggiornamento della carta delle tipologie forestali, l'innovazione principale offerta da questa sperimentazione, rispetto al contenuto informativo della cartografia precedente, riguarda la restituzione di una rappresentazione inedita che, sfruttando la risoluzione spaziale del CLC *Plus Backbone*, discrimina i boschi dagli AFF secondo la definizione fornita del TUFF, superando la lacuna cartografica che riguardava la disponibilità di dati sulla distribuzione dei AFF nel paesaggio. Un contributo importante è da rintracciare anche nell'introduzione della Carta di Uso e Copertura del suolo da integrazione di dati Copernicus di ISPRA per associare alla mappatura delle formazioni boschive e degli AFF la distinzione degli ambiti paesaggistici di riferimento. La disponibilità di tali informazioni offre la possibilità di monitorare, ad esempio, l'obiettivo della Strategia Europea per la Biodiversità di

destinare almeno il 10% delle superfici agricole ad elementi caratteristici del paesaggio con elevata diversità; e ancora, per valutare la frammentazione delle risorse naturali all'interno dei paesaggi urbani e individuare le aree in cui intervenire per potenziare la connettività.

L'utilizzo di dati ISPRA e CLMS a copertura nazionale come principali dati di input per l'implementazione della metodologia, porta con sé dei vantaggi in termini di comparabilità replicabilità della procedura in altri contesti territoriali, garantendo la produzione di output omogenei dal punto di vista geometrico, la distinzione degli ambiti paesaggistici, ma anche di fornire un dato aggiornato nella fase transitoria di pubblicazione della nuova carta forestale. La metodologia consente, inoltre, l'integrazione di ulteriori dati di input, come la stessa carta forestale nazionale, rispetto alla quale la metodologia si presta come strumento di supporto per la conduzione di analisi diacroniche. La mappa è soprattutto idonea a supportare il monitoraggio degli obblighi della NRR e la progettazione dei piani di ripristino degli ecosistemi urbani che deve basarsi su evidenze scientifiche derivabili da dati prodotti in ambito nazionale o da dati CLMS. In questo senso, la ricerca ha ulteriormente arricchito il quadro conoscitivo sui paesaggi urbani offrendo strumenti inediti e significativi per il progetto di paesaggio, relativamente alla capacità di fornire accesso universale a spazi verdi pubblici, in grado di garantire sia servizi di tipo sociale/culturale ma anche di regolazione microclimatica.

Inserendosi nell'ambito del progetto MIRIFICUS, ancora in corso, e delle attività di monitoraggio degli impatti del consumo di suolo, il lavoro ha migliorato i prodotti di *Land Surface Temperature* (LST) e gli indicatori sul fenomeno isola di calore urbana distribuiti in precedenza dall'ISPRA per il territorio nazionale, utilizzando immagini satellitari provenienti dalle missioni Landsat, unitamente alle potenzialità di calcolo della piattaforma Google Earth Engine (GEE). Queste tecnologie hanno permesso di restituire una mappa dell'LST nazionale con dettaglio 30 volte superiore rispetto a quello su base dati MODIS. A questo miglioramento si associa la possibilità di sviluppare indicatori a livello comunale, rappresentazioni sintetiche sulle caratteristiche termiche

delle aree urbane lungo la penisola italiana e sul contributo delle foreste urbane nella mitigazione delle temperature estreme durante il periodo estivo. Inoltre, il dato di popolazione messo a punto nell'ambito della mappatura delle aree urbane ha permesso di aggiungere nuove considerazioni sulla quota di popolazione esposta a temperature estreme durante il periodo estivo.

Le applicazioni sul comune di Roma hanno dimostrato come gli strumenti derivati da osservazioni satellitari gratuite e tempestive integrati nella pianificazione urbanistica, possono fornire un valido contributo alla selezione delle aree prioritarie per interventi di forestazione e alla tutela dei residui di naturalità dalle attività di edificazione.

L'analisi delle isole di calore urbane tramite dati satellitari offre una visione preziosa su questo fenomeno, ma presenta anche diversi limiti e sfide legate, ad esempio, alla risoluzione spaziale e temporale dei dati, al fatto che non sempre la LST rappresenta accuratamente la temperatura dell'aria percepita dall'uomo e le osservazioni notturne sono per lo più indisponibili. Sviluppi futuri saranno orientati ad approfondire la possibilità di recuperare la LST notturna da osservazioni satellitari *Open Source* (a partire dalle stesse immagini Landsat o da quelle recuperate dal sensore ECOSTress della NASA), ed esplorare l'impiego di tecnologie di *machine learning* per migliorare ulteriormente la risoluzione spaziale del dato LST tramite tecniche di *downscaling* basate sulla combinazione di immagini satellitari *Open Source* di maggiore dettaglio. Attualmente la disponibilità di dati a maggiore risoluzione è limitata a servizi che non sono disponibili in modo gratuito. Infine, le analisi sulla popolazione esposta possono essere ulteriormente migliorate introducendo, ad esempio, variabili economiche che possono far luce sulla correlazione tra disparità climatiche e sociali. Quest'ultimo è un tema cruciale per la sostenibilità delle aree urbane, affrontato anche nell'ambito dell'SDG 11.7.1 delle Nazioni Unite "garantire all'interno delle aree urbane l'accesso universale a spazi pubblici aperti". La ricerca ha approfondito questo obiettivo con particolare riferimento alle aree verdi pubbliche, per

fornire un quadro conoscitivo inedito sulle 14 città metropolitane con indicatori sulla popolazione servita entro le soglie stabilite dagli indirizzi di sostenibilità internazionali. Gli strumenti analizzati in questa ricerca sono un importante punto di partenza per condurre valutazioni sempre più accurate sull'accessibilità agli spazi pubblici aperti nelle aree urbane (*Green Urban Public Spaces* - GUPS), soprattutto considerando i risultati ottenuti. In questo senso, lo sviluppo di strumenti di monitoraggio per osservare nel dettaglio la capacità delle aree urbane di fornire servizi ricreativi sufficienti e adeguati è un prerequisito essenziale per proporre iniziative efficaci di forestazione, indirizzate a migliorare la qualità della vita di tutti i cittadini. Inoltre, questi strumenti rispondono in modo tecnicamente adeguato alle richieste istituzionali, in primo luogo il monitoraggio dell'accessibilità al verde pubblico urbano previsto dalle Nazioni Unite e dall'Agenda 2030 per la sostenibilità.

I risultati ottenuti sulla disponibilità di GUPS sono coerenti con quanto emerge dal piano europeo NextGenerationEU, che destina alle Città metropolitane del sud e delle isole più della metà dei fondi previsti per l'Italia per nuovi interventi di forestazione, la cui implementazione nelle aree urbane può contribuire ad aumentare la presenza di aree pubbliche configurate, (simili alle GUPS) quindi migliorare l'accessibilità e la fornitura di molteplici altri servizi ecosistemici ricreativi e di regolazione.

Questa parte della ricerca contribuisce a rendere disponibili informazioni in grado di supportare i policy maker nel raggiungimento degli obiettivi stabiliti dagli SDG delle Nazioni Unite o nella gestione dei finanziamenti stanziati per progetti di forestazione previsti dal PNRR, ad esempio individuando aree prioritarie per nuovi interventi, ma anche per supportare lo sviluppo dei piani di recupero previsti dal NRR. A tal fine sono state prese in considerazione le metodologie adottate ufficialmente dai principali strumenti normativi che si occupano di aree urbane e verde urbano (NRR, SDGs, PNRR), operando su due fronti: la mappatura dell'accessibilità utile per l'individuazione di aree critiche o di aree prioritarie di intervento e la valutazione dei limiti dei dati attualmente disponibili per ottenere una rappresentazione il più possibile vicina alla realtà.

La ricerca su SDG 11 e il target 11.7.1 è in espansione, con un crescente riconoscimento della necessità di spazi pubblici verdi nelle città. Tuttavia, le sfide legate alla raccolta di dati e all'inclusività delle politiche rimangono significative. È fondamentale continuare a esplorare pratiche efficaci e sviluppare metodologie che consentano una valutazione più accurata dei progressi verso questo obiettivo cruciale per la sostenibilità urbana. Gli sviluppi futuri devono prevedere il coinvolgimento nel processo di recupero dei dati delle amministrazioni e delle comunità locali. In questo senso, infrastrutture di ricerca come i *Living labs* possono enfatizzare il ruolo della “cittadinanza attiva” nell'adattamento ai cambiamenti climatici promuovendo attività di co-creazione e co-progettazione di strumenti per il monitoraggio delle aree verdi pubbliche che siano in grado di restituire informazioni puntuali sulla qualità, sulla funzionalità e sull'apprezzamento da parte della popolazione, più difficilmente recuperabili tramite dati di puro uso e copertura del suolo. L'attribuzione di valore da parte degli stakeholder (urbani) è rilevante nel processo di valutazione ed è fondamentale per comprendere i benefici effettivi dei servizi ecosistemici urbani. Il coinvolgimento delle comunità locali può, inoltre, contribuire ad accrescere l'interesse dei cittadini verso la tutela del paesaggio.

L'approfondimento sul comune di Roma ha dimostrato come l'uso integrato di strumenti cartografici coerenti dal punto di vista spaziale, temporale e tematico e tecnicamente adeguati a rispondere alle richieste istituzionali, possono indirizzare i processi decisionali e il progetto di paesaggio in modo scientificamente valido e riconosciuto ottimizzando, contestualmente, l'uso delle risorse sia ambientali che finanziarie disponibili.

Un risultato importante raggiunto è la pubblicazione di tutti gli strati cartografici prodotti nell'ambito della ricerca di dottorato, all'interno del portale dei dati ambientali del Sistema Informativo Nazionale Ambientale (SINA) e, con particolare riferimento alle mappe dell'accessibilità alle GUPS, sul Web-GIS sviluppato dall'azienda Deda Next.

La condivisione dei dati e delle rappresentazioni è un elemento di centrale in tutte le attività presentate in questa ricerca, soprattutto alla luce delle complessità tecniche e operative associate alla loro realizzazione (dal reperimento e pre-processamento dei dati di input, alla produzione dello strato finale, all'estrazione di indicatori e statistiche di superficie), che possono essere un ostacolo per alcuni portatori di interessi, dal momento che la loro conduzione richiede competenze specifiche e infrastrutture computazionali idonee. Il libero accesso alle informazioni permette agli stakeholders di disporre di strumenti validati e con caratteristiche in linea con le indicazioni tecniche e metodologiche fornite dai principali strumenti normativi nazionali, europei e internazionali, fornendo una base quantitativa oggettiva e affidabile per la conduzione di ulteriori approfondimenti e studi. Ciò a sostegno di uno dei principi alla base del lavoro, ossia la democratizzazione e la fruibilità dei dati da parte dei soggetti che, a vario titolo, sono chiamati a ripensare i paesaggi urbani, come la Pubblica Amministrazione o il mondo della ricerca e dell'associazionismo, nell'ottica di incentivare e supportare un approccio olistico alla definizione di azioni concrete ed efficaci di sostenibilità ambientale e sociale, favorendo l'adozione di soluzioni basate sulla natura.

Elenco delle pubblicazioni esite dal dottorato

Pubblicazioni su riviste

- Cimini A., De Fioravante P., Riitano N., Dichicco P., Calò A., Scarascia Mugnozza G., Marchetti M., Munafò M. *Land Consumption Dynamics and Urban–Rural Continuum Mapping in Italy for SDG 11.3.1 Indicator Assessment*. Land. 2023; 12(1):155. <https://doi.org/10.3390/land12010155>
- Munafò, M. (a cura di), 2022. *Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici. Edizione 2022*. Report SNPA 32/2022.
- Munafò, M. (a cura di), 2023. *Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici. Edizione 2023*.
- SNPA, *Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici. Edizione 2024*, Report ambientali SNPA, 43/2024
- De Corso S., De Benedetti A.A., Di Leginio M., Munafò, M. (a cura di), 2023. *Atlante dei dati ambientali. Edizione 2023*. ISPRA. ISBN 978-88-448-1154-9
- De Corso S., De Benedetti A.A., Cimini A., De Fioravante P., d'Antona M., Di Leginio M., Finocchiaro G., Vaccaro L., Giunta M., Munafò, M. (a cura di), 2024. *Atlante dei dati ambientali. Edizione 2024*. ISPRA. ISBN 978-88-448-1228-7
- Fabbro S., Faraone C., Assennato F., Cimini A., Riitano N., *I territori provinciali italiani con caratteristiche ecopolitane*. In: Postmetropoli e sistemi ecopolitani, a cura di Sandro Fabbro. Roma: Carocci editore, 2024, pp. 91-100. ISBN 978-88-290-2771-2
- Cimini, A., De Fioravante, P., Munafò, M. (2024), *La Nature Restoration Law e il ripristino degli ecosistemi urbani*. In Urbanistica Informazioni, 317, Anno LII, sett.-ott. 2024.
- Munafò, M., De Fioravante, P., Cimini, A., Riitano, N., d'Antona, M., Di Leginio, M., Marinosci, M., Assennato, F., Luise, A., Falconi, M., Vecchio, A., Jacomini, C., *ISPRA Land and Soil Monitoring, mapping, and assessment activities*. In Dazzi, C., Benedetti, A., Corti, G., & Costantini, E. A. (2024). *Soil Science in Italy: 1861 to 2024*. Springer Nature.

- De Fioravante, P., Strollo, A., Cavalli, A., Cimini, A., Smiraglia, D., Assennato, F., & Munafò, M. (2023). *Ecosystem Mapping and Accounting in Italy Based on Copernicus and National Data through Integration of EAGLE and SEEA-EA Frameworks*. *Land*, 12(2), 286. <https://doi.org/10.3390/land1202028>
- G., Guerri, G., Albini, A., Casali, A., Cimini, L., Congedo, A., Crisci, A.A., De Benedetti, S., De Corso, P., Dichicco, M., Munafò, M., Morabito, *Activities and Development of a GIS Information Tool to Support Public Administrations to Counteract the Urban Heat Island Phenomenon: The First Year of Activity of the Mirificus Project*, IGARSS 2024 - 2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Athens, Greece, 2024, pp. 1388-1393, doi: 10.1109/IGARSS53475.2024.10641083.
- Cimini A., De Fioravante P., Marinosci I., Congedo L., Cipriano P., Dazzi L., Marchetti M., Scarascia Mugnozza G., Munafò M. *Green Urban Public Spaces Accessibility: A Spatial Analysis for the Urban Area of the 14 Italian Metropolitan Cities Based on SDG Methodology*. *Land*. 2024; 13(12):2174. <https://doi.org/10.3390/land13122174>

Pubblicazioni delle cartografie su portali web

- Munafò, M. (a cura di), 2024. EcoAtl@nte. Viaggio nell'ambiente in Italia. Facile come leggere una storia. Sezione "Trasformazioni del territorio", disponibile on-line all'indirizzo <https://sinacloud.isprambiente.it/portal/apps/MapSeries/index.html?appid=4a4a3792be324495b8f52f748c6649e0>
- SINANet Groupware. Uso, copertura e consumo di suolo. Aree urbane, disponibile on-line all'indirizzo <https://groupware.sinanet.isprambiente.it/uso-copertura-e-consumo-di-suolo/library/aree-urbane>
- Portale MIRIFICUS. disponibile on-line all'indirizzo <https://mirificus.isprambiente.it/home/Homepage.html>
- Città e spazi verdi pubblici accessibili. Mappe dell'accessibilità alle aree verdi pubbliche per le 14 città metropolitane, disponibile on-

line all'indirizzo <https://www.dedanext.it/aree-verdi-pubbliche-urbane>

Partecipazioni a convegni

- Angela Cimini, *“Evoluzioni del paesaggio urban. Consumo di suolo, strategie e orientamenti comunitari per lo sviluppo sostenibile. Ciclo di seminari “Siamo ragazzi di oggi”* organizzato dal Dipartimento di Architettura dell'Università G.d'Annunzio di Chieti-Pescara il 30/03/2023
- Angela Cimini e Beatrice Olivari, *“Are Italian cities already 15-minute? Presenting a glocal proximity index, based on open data.”* Convegno State of the Map Europe 2023 (SotM Europe 2023), Antwerp (Belgio), 10-12/11/ 2023
- De Corso S., Congedo L., De Benedetti A.A., Munafò M., Dichicco P., Casali A., Cimini A., Guerri G., Morabito M., *“Monitoraggio degli Interventi di RIForestazione per l'Isola di Calore Urbana tramite i Satelliti”* al Convegno GEOdaysIT 2023 11° AIT Conference OSMit – FOSS4G -IT.
- Angela Cimini e Ines Marinosci, *“Le infrastrutture verdi: monitoraggio attraverso i dati Copernicus e accessibilità alle aree verdi pubbliche.”* Conferenza di presentazione del Progetto VeBS “il buon uso degli spazi verdi e blu per la promozione della salute e del benessere”. L'Aquila - Sala “San Basilio” presso il Centro Congressi “Luigi Zordan”, 10/05 2024
- Angela Cimini, Michele Munafò e Paolo De Fioravante, *“Restoration of urban Ecosystem.”* Terza edizione degli Stati generali per la salute del suolo che si è tenuta a Rimini in occasione della fiera ECOMONDO, curata dal Comitato Tecnico Scientifico Ecomondo & European Mission A Soil Deal for Europe, Re Soil Foundation, Coldiretti e dal Gruppo Coordinamento Nazionale per la Bioeconomia (GCNB), 07/11/2024.
- Angela Cimini, Piergiorgio Cipriano, Leonardo Dazzi, *“Indice di prossimità agli spazi verdi pubblici urbani (con dati aperti)”*. Foss4G, Palazzo Bo – Aula Nieveo, Padova, 12/12/2024

- Angela Cimini, Paolo De Fioravante, “*Monitoraggio del consumo di suolo e del fenomeno isola di calore a Roma.*” Convegno La Riserva Naturale dell’Insugherata: conservazione e valorizzazione della biodiversità nelle aree protette di RomaNatura, presso l’Aranciera Orto Botanico di Roma il 21/03/2025

APPENDICE

I. Accessibilità alle aree verdi pubbliche: città metropolitane a confronto

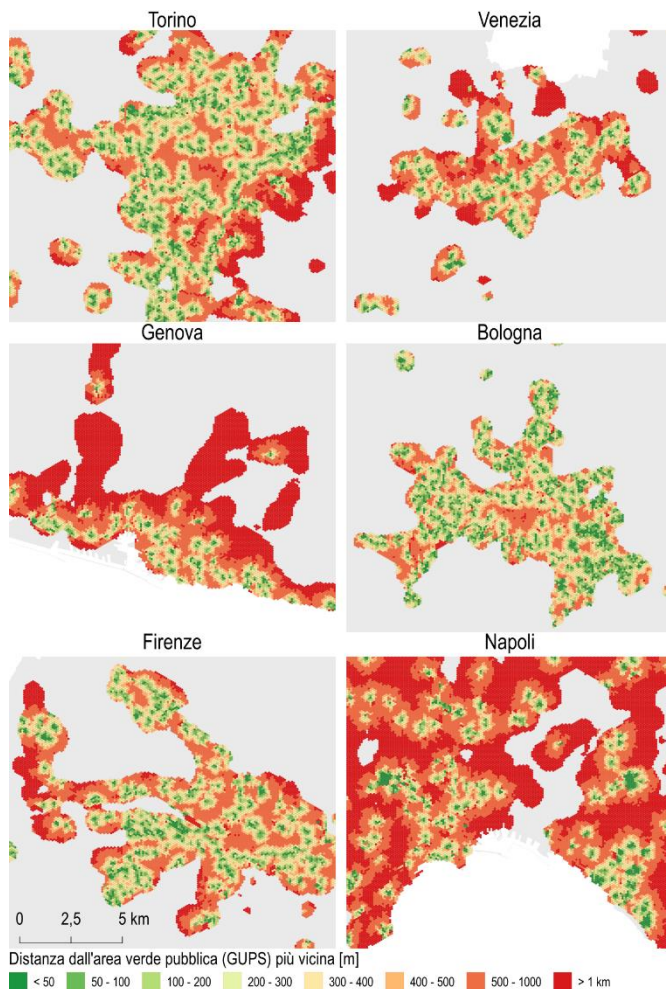


Figura 112. Stralci di mappa dell'accessibilità alle aree verdi pubbliche mappate dal dato OSM. Le mappe complete sono disponibili per la consultazione e il download al Web-GIS <https://www.dedanext.it/aree-verdi-pubbliche-urbane>.

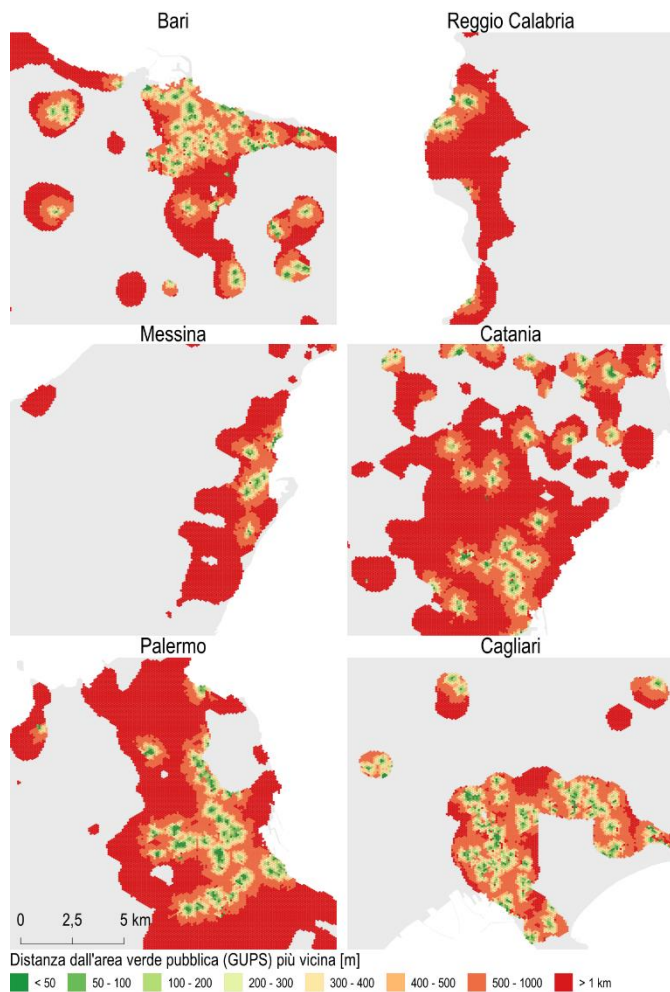


Figura 113. Stralci di mappa dell'accessibilità alle aree verdi pubbliche mappate dal dato OSM. Le mappe complete sono disponibili per la consultazione e il download al Web-GIS <https://www.dedanext.it/aree-verdi-pubbliche-urbane>.

BIBLIOGRAFIA

- Agrimi, M. (2013). Significato e ruolo della «Foresta urbana» nella gestione territoriale in Italia. *L'Italia Forestale e Montana*, 11–23. <https://doi.org/10.4129/ifm.2013.1.01>
- Ahmed Memon, R., Leung, D. Y., & Chunho, L. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. In *Journal of Environmental Sciences* (Vol. 20).
- Akbari, H., & Konopacki, S. (2005). Calculating energy-saving potentials of heat-island reduction strategies. *Energy Policy*, 33(6), 721–756. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2003.10.001>
- Alberti, M. (2005). The effects of urban patterns on ecosystem function. *International Regional Science Review*, 28(2), 168–192. <https://doi.org/10.1177/0160017605275160>
- Anderson, J. R. (1976). *A land use and land cover classification system for use with remote sensor data* (Vol. 964). US Government Printing Office.
- Annerstedt Van Den Bosch, M., Egorov, A. I., Mudu, P., Uscila, V., Barndahl, M., Kruize, H., Kulinkina, A., Staatsen, B., Swart, W., & Zurlyte, I. (2016). Development of an urban green space indicator and the public health rationale. *Scandinavian Journal of Public Health*, 44(2), 159–167. <https://doi.org/10.1177/1403494815615444>
- Arnold, S., Kosztra, B., Banko, G., Milenov, P., Smith, G., Hazeu, G., Bock, M., Perger, C., & Caetano, M. (2021). *Explanatory Documentation of the EAGLE Concept-Version 3.1.2*.
- Atelli, M., Blasi, C., Boldini, G., Cignini, B., Cosenza, G., Emiliani, V., Marchetti, M., Maggiore, A. M., Pericoli, T., Ricciardi, A., Sisti, A., & Stefani, A. (2018). *Strategia nazionale del verde urbano. Foreste urbane resilienti ed eterogenee per la salute e il benessere dei*

- cittadini* (pagg. 1–142). Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare.
- Baioni, M., Basso, S., Caudo, G., Franzese, A., Marchigiani, E., Munarin, S., Renzoni, C., Savoldi, P., Tosi, M. C., & Vazzoler, N. (2021). *Diritti in città: gli standard urbanistici in Italia dal 1968 a oggi* (Vol. 1). Donzelli.
- Ballester, J., Quijal-Zamorano, M., Méndez Turrubiates, R. F., Pegenaute, F., Herrmann, F. R., Robine, J. M., Basagaña, X., Tonne, C., Antó, J. M., & Achebak, H. (2023). Heat-related mortality in Europe during the summer of 2022. *Nature Medicine*, 29(7), 1857–1866. <https://doi.org/10.1038/s41591-023-02419-z>
- Barradas, V. L., Miranda, J. A., Esperón-Rodríguez, M., & Ballinas, M. (2022). (Re)Designing Urban Parks to Maximize Urban Heat Island Mitigation by Natural Means. *Forests*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/f13071143>
- Beckschäfer, P., Schnell, S., & Kleinn, C. (2017). Monitoring and Assessment of Trees Outside Forests (TOF). In J. C. Dagar & V. P. Tewari (A c. Di), *Agroforestry: Anecdotal to Modern Science* (pagg. 137–161). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7650-3_5
- Benati, G., Calcagni, F., Matellozzo, F., Ghermandi, A., & Langemeyer, J. (2024). Unequal access to cultural ecosystem services of green spaces within the city of Rome – A spatial social media-based analysis. *Ecosystem Services*, 66. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2023.101594>
- Bencivenni, M., & De Vico, F. M. (2003). La gestione del verde urbano. *Atti della Conferenza Nazione sul Verde Urbano*, 141–156.
- Boeri, S., Pastore, M. C., Marchetti, M., Vacchiano, G., Shamir, L., Pimentel, L., & Paoli, S. (2022). The Parco Italia Project as a Nationwide Resilient Ecological Infrastructure. In Ku Leuven (A c. Di), *Urban Forests Forest Urbanisms & Global Warming* (pagg. 31–

- 32).
<https://re.public.polimi.it/handle/11311/1234944?mode=simple>
- Bologna, S., Chirici, G., Corona, P., Marchetti, M., Pugliese, A., & Munafò, M. (2004). Sviluppo e implementazione del IV livello Corine Land Cover 2000 per i territori boscati e ambienti semi-naturali in Italia. *ATTI CONFERENZA NAZIONALE ASITA*, 1, 467–472.
- Bottalico, G., Brini, S., & Vitali, W. (2022). Città e comunità sostenibili. Infrastrutture verdi urbane e periurbane. In *ASviS* (Position paper).
- Brinkhoff, T. (2016). Open street map data as source for built-up and urban areas on global scale. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 41, 557–564.
<https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B4-557-2016>
- Brown, C. F., Brumby, S. P., Guzder-Williams, B., Birch, T., Hyde, S. B., Mazzariello, J., Czerwinski, W., Pasquarella, V. J., Haertel, R., Ilyushchenko, S., Schwehr, K., Weisse, M., Stolle, F., Hanson, C., Guinan, O., Moore, R., & Tait, A. M. (2022). Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping. *Scientific Data*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01307-4>
- Burdziej, J. (2019). Using hexagonal grids and network analysis for spatial accessibility assessment in urban environments- A case study of public amenities in Toruń. *Miscellanea Geographica*, 23(2), 99–110. <https://doi.org/10.2478/mgrsd-2018-0037>
- Büttner, G., Kosztra, B., Maucha, G., Pataki, R., Kleeschulte, S., Hazeu, G., Vittek, M., & Littkopf, A. (2021). *Copernicus Land Monitoring Service. CORINE Land Cover*. <https://land.copernicus.eu/>
- Cardinali, M., Beenackers, M. A., van Timmeren, A., & Pottgiesser, U. (2024). The relation between proximity to and characteristics of green spaces to physical activity and health: A multi-dimensional sensitivity analysis in four European cities. *Environmental Research*, 241. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117605>

- Cattivelli, V. (2021). Planning peri-urban areas at regional level: The experience of Lombardy and Emilia-Romagna (Italy). *Land Use Policy*, 103. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105282>
- Ceccarelli, T., Bajocco, S., Perini, L. L., & Salvati, L. (2014). Urbanisation and land take of high quality agricultural soils - Exploring long-term land use changes and land capability in Northern Italy. *International Journal of Environmental Research*, 8(1), 181–192. <https://doi.org/10.22059/ijer.2014.707>
- Chen, M., Jia, W., Yan, L., Du, C., & Wang, K. (2022). Quantification and mapping cooling effect and its accessibility of urban parks in an extreme heat event in a megacity. *Journal of Cleaner Production*, 334. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130252>
- Chen, X. L., Zhao, H. M., Li, P. X., & Yin, Z. Y. (2006). Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sensing of Environment*, 104(2), 133–146. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.11.016>
- Cheng, X., Wei, B., Chen, G., Li, J., & Song, C. (2015). Influence of park size and its surrounding urban landscape patterns on the park cooling effect. *Journal of Urban Planning and Development*, 141(3), A4014002.
- Chiesura Anna, Bultrini, M., De Maio, E., Faticanti, M., Giardi, G., Lepore, A., Bataloni, S., Baldini, B., Santonico, D., Giordano, F., Amori, M., D'Ambrogio, S., & Pileri, P. (2024). I Piani comunali del verde: strumenti per riportare la natura nella nostra vita? In *ISPRA* (Vol. 33, pagg. 1–147). Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale.
- Churkina, G. (2016). The role of urbanization in the global carbon cycle. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 3(JAN), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fevo.2015.00144>
- Cimini, A., De Fioravante, P., Riitano, N., Dichicco, P., Calò, A., Scarascia Mugnozza, G., Marchetti, M., & Munafò, M. (2023). Land

- Consumption Dynamics and Urban–Rural Continuum Mapping in Italy for SDG 11.3.1 Indicator Assessment. *Land*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/land12010155>
- Cook, M., Schott, J. R., Mandel, J., & Raqueno, N. (2014). Development of an operational calibration methodology for the Landsat thermal data archive and initial testing of the atmospheric compensation component of a land surface temperature (LST) product from the archive. *Remote Sensing*, 6(11), 11244–11266. <https://doi.org/10.3390/rs6111244>
- Corbane, C., Sabo, F., Syrris, V., Kemper, T., Politis, P., Pesaresi, M., Soille, P., & Ose, K. (2020). Application of the Symbolic Machine Learning to Copernicus VHR Imagery: The European Settlement Map. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 17(7), 1153–1157. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2942131>
- Corona, P., Chiriaco, M. V., Salvati, R., Marchetti, M., Lasserre, B., & Ferrari, B. (2009). Proposta metodologica per l'inventario su vasta scala degli alberi fuori foresta. *L'Italia Forestale e Montana*, 367–380. <https://doi.org/10.4129/ifm.2009.6.04>
- Cortinovis, C., Geneletti, D., & Hedlund, K. (2021). Synthesizing multiple ecosystem service assessments for urban planning: A review of approaches, and recommendations. *Landscape and Urban Planning*, 213, 104129.
- Costanza, R., de Groot, R., Farberll, S., Grassot, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O, R. V, Paruelo, J., Raskin, R. G., & Suttonllll, P. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387.
- Couch, C., Petschel-Held, G., & Leontidou, L. (2008). *Urban sprawl in Europe: landscape, land-use change and policy*. John Wiley & Sons.
- Craul, P. J. (1992). *Urban soil in landscape design*. John Wiley & Sons.

- Crippa, M., Guizzardi, D., Pisoni, E., Solazzo, E., Guion, A., Muntean, M., Florczyk, A., Schiavina, M., Melchiorri, M., & Hutfilter, A. F. (2021). Global anthropogenic emissions in urban areas: Patterns, trends, and challenges. *Environmental Research Letters*, 16(7). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac00e2>
- Daily, G. C., Matson, P. A., & Vitousek, P. M. (1997). Ecosystem services supplied by soil. *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems*, 113–132.
- De Fioravante, P., Luti, T., Cavalli, A., Giuliani, C., Dichicco, P., Marchetti, M., Chirici, G., Congedo, L., & Munafò, M. (2021). Multispectral sentinel-2 and sar sentinel-1 integration for automatic land cover classification. *Land*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/land10060611>
- De Fioravante, P., Strollo, A., Assennato, F., Marinosci, I., Congedo, L., & Munafò, M. (2022). High resolution land cover integrating copernicus products: A 2012–2020 map of Italy. *Land*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/land11010035>
- De Fioravante, P., Strollo, A., Cavalli, A., Cimini, A., Smiraglia, D., Assennato, F., & Munafò, M. (2023). Ecosystem Mapping and Accounting in Italy Based on Copernicus and National Data through Integration of EAGLE and SEEA-EA Frameworks. *Land*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/land12020286>
- De Foresta, H., Somarriba, E., Temu, C. A., Désirée Boulanger, I., Feuilly, H., & Gauthier, M. (2013). *Towards the Assessment of Trees Outside Forests. A thematic Report prepared in the framework of The Global Forest Resources Assessment* (183).
- De La Barrera, F., Reyes-Paecke, S., & Banzhaf, E. (2016). Indicators for green spaces in contrasting urban settings. *Ecological Indicators*, 62, 212–219. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.10.027>
- Département de la Communication Externe et de l'Information Nantes Métropole. (2024). Charte Métropolitaine des arbres. In *Nantes métropole*. Nantes Métropole. <https://nature.metropole.nantes.fr/wp->

- content/uploads/2024/04/19/nm-2023-03-nmx226-chartedelarbre-maj-26-03-20pages-web2-1-1.pdf
- Devisscher, T., Konijnendijk, C., Nesbitt, L., Lenhart, J., Salbitano, F., Cheng, Z. C., Lwasa, S., & van den Bosch, M. (2019). SDG 11: sustainable cities and communities—impacts on forests and forest-based livelihoods. *Sustainable development goals: Their impacts on forests and people*, 349–385.
- D.lgs 3 aprile 2018 n.34. (s.d.). Testo unico in materia di foreste e filiere forestali. In *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana - Serie generale n.92*.
- Ekkel, E. D., & de Vries, S. (2017). Nearby green space and human health: Evaluating accessibility metrics. In *Landscape and Urban Planning* (Vol. 157, pagg. 214–220). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.06.008>
- Epting, S. (2017). On moral prioritization in environmental ethics: Weak anthropocentrism for the city. In *Environmental Ethics* (Vol. 39, Numero 2, pagg. 131–146). Environmental Philosophy Inc. <https://doi.org/10.5840/enviroethics201712146>
- Escobedo, F. J., Giannico, V., Jim, C. Y., Sanesi, G., & Laforteza, R. (2019). Urban forests, ecosystem services, green infrastructure and nature-based solutions: Nexus or evolving metaphors? In *Urban Forestry and Urban Greening* (Vol. 37, pagg. 3–12). Elsevier GmbH. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.02.011>
- European Commission. (2020a). *Mapping Guide v6.3 for a European Urban Atlas*. https://land.copernicus.eu/en/technical-library/urban_atlas_2012_2018_mapping_guide/@@download/fil
e
- European Commission. (2020b). Strategia dell'UE sulla biodiversità per il 2030. Riportare la natura nella nostra vita. In *COM(2020) 380 final* (pagg. 1–25). European Commission. <https://ec.europa.eu/research/environment/index.cfm?pg=nbs>

- European Commission. (2021a). *Applying the degree of urbanisation : a methodological manual to define cities, towns and rural areas for international comparisons : 2021 edition*. (Statistical Office of the European Union, Organisation for Economic Co-operation and Development, Food and Agriculture Organization of the United Nations, United Nations Human Settlements Programme, & World Bank, A c. Di).
- European Commission. (2021b). New EU Forest Strategy for 2030. In *COM(2021)572 final* ({SWD(2021)651 final}-{SWD(2021)652 final}; pagg. 1–27).
- European Commission. (2021c). Plasmare un'Europa resiliente ai cambiamenti climatici – La nuova strategia dell'UE di adattamento ai cambiamenti climatici. In *European Commission* (pagg. 1–26). European Commission.
<https://www.eea.europa.eu/highlights/soer2020-europes-environment-state-and-outlook-report>.
- European Commission. (2021d). Strategia dell'UE per il suolo per il 2030. Suoli sani a vantaggio delle persone, degli alimenti, della natura e del clima. In *COM(2021) 699 final* (pagg. 1–27). {SWD(2021) 323 final}. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/dashboards/land-take-statistics#tab-based-on-data>
- European Commission. (2022). *Copernicus: Summer 2022 Europe's hottest on record*. Copernicus Climate Change Service.
- European Commission. (2023). *GHSL data package 2023* (Publications Office of the European Union, A c. Di). Publications Office of the European Union. <https://doi.org/doi:10.2760/098587,JRC133256>
- European Environment Agency. (2021). *HRL Forest 2018 Product User Manual*. <https://land.copernicus.eu/en/technical-library/hrl-forest-2018/@@download/file>
- European Parliament, & Council of the European Union. (2024). *Regulation (EU) 2024/1991 of the European Parliament and of the Council of 24 June 2024 on nature restoration and amending*

- Regulation (EU) 2022/869 (Text with EEA relevance)* (2024/1991; pagg. 1–93). <http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1991/oj>
- Eurostat. (2021). *Applying the degree of urbanisation : a methodological manual to define cities, towns and rural areas for international comparisons* (2021^a ed.). Publications Office of the European Union.
- Ewing, R. H. (1994). Characteristics, Causes, and Effects of Sprawl: A Literature Review. *Environmental and Urban Studies*, 21(2), 519–535.
- Fang, D., Liu, D., & Kwan, M.-P. (2025). Evaluating spatial variation of accessibility to urban green spaces and its inequity in Chicago: Perspectives from multi-types of travel modes and travel time. *Urban Forestry & Urban Greening*, 104, 128593. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128593>
- FAO. (2016). Guidelines on urban and peri-urban forestry. In Food and Agriculture Organization of the United Nations (A c. Di), *FAO Forestry Paper* (Vol. 178).
- FAO. (2023). *Terms and Definitions FRA 2025* (194). www.fao.org/forestry
- Ferrara, G. (1968). *L'architettura del paesaggio italiano*.
- Ferretti, F. (2017). Situated Knowledge and Visual Education: Patrick Geddes and Reclus's Geography (1886–1932). *Journal of Geography*, 116(1), 3–19. <https://doi.org/10.1080/00221341.2016.1204347>
- Ferretti, F., Sboarina, C., Tattoni, C., Vitti, A., Zatelli, P., Geri, F., Pompei, E., & Ciolli, M. (2018). The 1936 Italian Kingdom Forest Map reviewed: A dataset for landscape and ecological research. *Annals of Silvicultural Research*, 42(1), 3–19. <https://doi.org/10.12899/asr-1411>
- Gasparini, P., Di Cosmo, L., Floris, A., & De Laurentis Editors, D. (2022). Italian National Forest Inventory - Methods and results of the third survey. In Springer (A c. Di), *Springer Tracts in Civil Engineering: Vol.*

- XXXII (pagg. 1–576). Springer Cham.
<https://link.springer.com/bookseries/15088>
- Geddes, P. (1925). The valley plan of civilization. *The Survey*, 54, 288–290.
- Giaimo, C. (2021). Standard urbanistici e qualità dell’abitare: a che punto siamo? *INU edizioni*.
<https://urbanpromo.it/2015/eventi/nuovi-standard-per-nuovi-bisogni/>
- Giuliani, G., Petri, E., Interwies, E., Vysna, V., Guigoz, Y., Ray, N., & Dickie, I. (2021). Modelling accessibility to urban green areas using open earth observations data: A novel approach to support the urban SDG in four european cities. *Remote Sensing*, 13(3).
<https://doi.org/10.3390/rs13030422>
- Gomes, V. C. F., Queiroz, G. R., & Ferreira, K. R. (2020). An overview of platforms for big earth observation data management and analysis. In *Remote Sensing* (Vol. 12, Numero 8). MDPI AG.
<https://doi.org/10.3390/RS12081253>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Groenewegen, P. P., Van Den Berg, A. E., De Vries, S., & Verheij, R. A. (2006). Vitamin G: Effects of green space on health, well-being, and social safety. *BMC Public Health*, 6.
<https://doi.org/10.1186/1471-2458-6-149>
- Guerri, G., Crisci, A., Messeri, A., Congedo, L., Munafò, M., & Morabito, M. (2021). Thermal summer diurnal hot-spot analysis: The role of local urban features layers. *Remote Sensing*, 13(3).
<https://doi.org/10.3390/rs13030538>
- Haase, D., Larondelle, N., Andersson, E., Artmann, M., Borgström, S., Breuste, J., Gomez-Baggethun, E., Gren, Å., Hamstead, Z.,

- Hansen, R., Kabisch, N., Kremer, P., Langemeyer, J., Rall, E. L., McPhearson, T., Pauleit, S., Qureshi, S., Schwarz, N., Voigt, A., ... Elmqvist, T. (2014). A quantitative review of urban ecosystem service assessments: Concepts, models, and implementation. In *Ambio* (Vol. 43, Numero 4, pagg. 413–433). Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0504-0>
- Heaviside, C., Macintyre, H., & Vardoulakis, S. (2017). The Urban Heat Island: Implications for Health in a Changing Environment. In *Current environmental health reports* (Vol. 4, Numero 3, pagg. 296–305). Springer. <https://doi.org/10.1007/s40572-017-0150-3>
- Helms, J. A. (1998). *The dictionary of forestry*.
- Howard, L. (2012). *The climate of London: deduced from meteorological observations* (Vol. 1). Cambridge University Press.
- Huang, B. X., Li, W. Y., Ma, W. J., & Xiao, H. (2023). Space Accessibility and Equity of Urban Green Space. *Land*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/land12040766>
- Huang, F., Jiang, S., Zhan, W., Bechtel, B., Liu, Z., Demuzere, M., Huang, Y., Xu, Y., Ma, L., Xia, W., Quan, J., Jiang, L., Lai, J., Wang, C., Kong, F., Du, H., Miao, S., Chen, Y., & Chen, J. (2023). Mapping local climate zones for cities: A large review. In *Remote Sensing of Environment* (Vol. 292). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113573>
- IPBES. (2019). *The global assessment report on Biodiversity and Ecosystem Services* (IPBES secretariat, A c. Di; 2019^a ed.). www.ipbes.net
- ISPRA. (2023). *Il clima in Italia nel 2022: Vol. Report SNPA 36* (2022^a ed.). ISPRA.
- ISPRA SNPA. (2020). *Portale delle coste*. ISPRA SNPA.
- ISTAT. (2024a). *BES 2023. Il Benessere Equo e Sostenibile in Italia* (2023^a ed.). ISTAT.

- ISTAT. (2024b, luglio 26). *Nota metodologica. Dati del Censimento Permanente al 31.12.2021 sulle nuove Basi Territoriali 2021*.
<https://www.istat.it/wp-content/uploads/2023/06/Nota-Metodologica-sezioni-censimento-2021.pdf>
- Ito World. (2022, marzo 7). *Green space access ITO map*.
OpenStreetMap Wiki.
https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Ito_Map
- Jacobson, C. R. (2011). Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: A review. *Journal of Environmental Management*, 92(6), 1438–1448.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.01.018>
- Kabisch, N., Strohbach, M., Haase, D., & Kronenberg, J. (2016). Urban green space availability in European cities. *Ecological Indicators*, 70, 586–596. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.029>
- Kawashima, S., Ishida, T., Minomura, M., & Miwa, T. (2000). Relations between surface temperature and air temperature on a local scale during winter nights. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 39(9), 1570–1579.
- Konecny, M. (2011). Cartography: Challenges and potential in the virtual geographic environments era. In *Annals of GIS* (Vol. 17, Numero 3, pagg. 135–146). <https://doi.org/10.1080/19475683.2011.602027>
- Konijnendijk, C. C. (1999). *Urban forestry in Europe: a comparative study of concepts, policies and planning for forest conservation, management and development in and around major European cities*.
- Konijnendijk, C. C. (2023). Evidence-based guidelines for greener, healthier, more resilient neighbourhoods: Introducing the 3–30–300 rule. *Journal of Forestry Research*, 34(3), 821–830.
<https://doi.org/10.1007/s11676-022-01523-z>
- Konijnendijk, C. C., Ricard, R. M., Kenney, A., & Randrup, T. B. (2006). Defining urban forestry - A comparative perspective of North

- America and Europe. *Urban Forestry and Urban Greening*, 4(3–4), 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2005.11.003>
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- La Rosa, D. (2014). Accessibility to greenspaces: GIS based indicators for sustainable planning in a dense urban context. *Ecological Indicators*, 42, 122–134. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.11.011>
- Lanzani, A. (2020). L'Italia degli standard urbanistici. Che fare, oggi? *TERRITORIO*, 2019/90.
- Levine, J. (2020). A century of evolution of the accessibility concept. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 83. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102309>
- Li, B., Zhang, B., Yin, L., & Chang, J. (2023). Assessing heat risk for residents of complex urban areas from an accessibility-based perspective. *Sustainable Cities and Society*, 88. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104278>
- Li, Z. L., Wu, H., Duan, S. B., Zhao, W., Ren, H., Liu, X., Leng, P., Tang, R., Ye, X., Zhu, J., Sun, Y., Si, M., Liu, M., Li, J., Zhang, X., Shang, G., Tang, B. H., Yan, G., & Zhou, C. (2023). Satellite Remote Sensing of Global Land Surface Temperature: Definition, Methods, Products, and Applications. In *Reviews of Geophysics* (Vol. 61, Numero 1). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1029/2022RG000777>
- Long, A. J., & Ramachandran, P. K. (1999). Trees outside forests: agro-, community, and urban forestry. In *New Forests* (Vol. 17).
- Luederitz, C., Brink, E., Gralla, F., Hermelingmeier, V., Meyer, M., Niven, L., Panzer, L., Partelow, S., Rau, A. L., Sasaki, R., Abson, D. J., Lang, D. J., Wamsler, C., & von Wehrden, H. (2015). A review of urban ecosystem services: Six key challenges for future research. In

- Ecosystem Services* (Vol. 14, pagg. 98–112). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.05.001>
- Lynch, K. (2013). *L'immagine della città*. Marsilio Editori spa.
- Mahendra, A., & Seto, K. C. (2019). *Upward and Outward Growth: Managing Urban Expansion for More Equitable Cities in the Global South*. www.citiesforall.org.
- Maheng, D., Pathirana, A., Bhattacharya, B., Zevenbergen, C., Lauwaet, D., Siswanto, S., & Suwondo, A. (2024). Impact of land use land cover changes on urban temperature in Jakarta: insights from an urban boundary layer climate model. *Frontiers in Environmental Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1399041>
- Mahtta, R., Fragkias, M., Güneralp, B., Mahendra, A., Reba, M., Wentz, E. A., & Seto, K. C. (2022). Urban land expansion: the role of population and economic growth for 300+ cities. *npj Urban Sustainability*, 2(1). <https://doi.org/10.1038/s42949-022-00048-y>
- Manganelli, B., Murgante, B., & Saganeiti, L. (2020). The social cost of urban sprinkling. *Sustainability (Switzerland)*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/su12062236>
- Marando, F., Heris, M. P., Zulian, G., Udías, A., Mentaschi, L., Chrysoulakis, N., Parastatidis, D., & Maes, J. (2022). Urban heat island mitigation by green infrastructure in European Functional Urban Areas. *Sustainable Cities and Society*, 77. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103564>
- Marando, F., Salvatori, E., Sebastiani, A., Fusaro, L., & Manes, F. (2019). Regulating Ecosystem Services and Green Infrastructure: assessment of Urban Heat Island effect mitigation in the municipality of Rome, Italy. *Ecological Modelling*, 392, 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.11.011>
- Marinosci, I. (2009). La classificazione del verde urbano: una proposta metodologica. In ISPRA (A c. Di), 96 (Vol. 96). Institute for

- Environmental Protection and Research (ISPRA).
www.sinanet.apat.it/it/inventaria.
- Massaro, E., Schifanella, R., Piccardo, M., Caporaso, L., Taubenböck, H., Cescatti, A., & Duveiller, G. (2023). Spatially-optimized urban greening for reduction of population exposure to land surface temperature extremes. *Nature Communications*, 14(1).
<https://doi.org/10.1038/s41467-023-38596-1>
- McGranahan, G., Marcotullio, P., Bai, X., Balk, D., Braga, T., Douglas, I., Elmqvist, T., Rees, W., Satterthwaite, D., & Songsore, J. (2005). Urban systems. *Ecosystems and human well-being: Current state and trends*, 1, 795–825.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystem and Human Well-being. Opportunities and Challenges for Business and Industry*.
- Ministero della Transizione Ecologica. (2021). *Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza. Piano di forestazione urbana ed extraurbana* (pagg. 1–67). Ministero della Transizione Ecologica.
- Ministero della Transizione Ecologica. (2022). *Strategia Nazionale Biodiversità 2030*. www.mite.gov.it/
- Ministero dell'Ambiente della Tutela del Territorio e del Mare. (2015). Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici. In *MATTM* (pagg. 1–181). MATTM.
- MIPAAFT. (2019). *Rapporto sullo stato delle foreste e del settore forestale in Italia 2017 - 2018* (Compagnie delle foreste, A c. Di; Prima edizione). MIPAAFT.
https://sinfor.sian.it/assets/resources/pdf/RAF_Italia_2019.pdf
- Morabito, M., Crisci, A., Guerri, G., Messeri, A., Congedo, L., & Munafò, M. (2021). Surface urban heat islands in Italian metropolitan cities: Tree cover and impervious surface influences. *Science of the Total Environment*, 751.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142334>

- Morabito, M., Crisci, A., Messeri, A., Orlandini, S., Raschi, A., Maracchi, G., & Munafò, M. (2016). The impact of built-up surfaces on land surface temperatures in Italian urban areas. *Science of the Total Environment*, 551–552, 317–326. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.029>
- Morakinyo, T. E., Ouyang, W., Lau, K. K. L., Ren, C., & Ng, E. (2020). Right tree, right place (urban canyon): Tree species selection approach for optimum urban heat mitigation - development and evaluation. *Science of the Total Environment*, 719. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137461>
- Morel, J. L., Chenu, C., & Lorenz, K. (2015). Ecosystem services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining, and military areas (SUITMAS). *Journal of Soils and Sediments*, 15(8), 1659–1666. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0926-0>
- Munafò, M. (2023). *Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici. Edizione 2023* (SNPA, A c. Di; 37^a ed.). SNPA.
- Munafò, M. (2024). *Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici. Edizione 2024* (2024^a ed., Vol. 43).
- Natale, D. F. (2006). *L'Inventario degli Alberi Fuori Foresta (IAFF) come strumento di analisi del paesaggio e supporto alle scelte di pianificazione territoriale*. <http://www.sisef.it/>
- Norme per lo sviluppo degli spazi verdi urbani, Pub. L. No. 10, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana 1 (2013).
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. In *Quart. J. R. Met. Soc* (Vol. 108, Numero 455).
- Olivari, B., Cipriano, P., Napolitano, M., & Giovannini, L. (2023). Are Italian cities already 15-minute? Presenting the Next Proximity Index: A novel and scalable way to measure it, based on open data. *Journal of Urban Mobility*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.urbmob.2023.100057>
- Olivetti, M. L. (2019). Il selvatico e la città. *L&SCAPE*, 55–75.

- Ord, J. K., & Getis, A. (1995). Local Spatial Autocorrelation Statistics: Distributional Issues and an Application. *Geographical Analysis*, 27(4), 286–306. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00912.x>
- Osservatorio del Mercato Immobiliare. (2018, gennaio 2). *Manuale della Banca Dati Quotazioni dell'Osservatorio del Mercato Immobiliare. Istruzioni tecniche per la formazione della Banca Dati Quotazioni OMI*.
https://www.agenziaentrate.gov.it/portale/documents/20143/265514/Il+manuale+della+banca+dati+OMI_Manuale+2016_vers_2.0+modificata+in+data+02-01-2018.pdf/c2073cce-b58f-cc2d-4827-d52a8b5eac95?t=1514891451982
- Ottaviano, M., & Marchetti, M. (2023). Census and Dynamics of Trees Outside Forests in Central Italy: Changes, Net Balance and Implications on the Landscape. *Land*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/land12051013>
- Owen, D., Fitch, A., Fletcher, D., Knopp, J., Levin, G., Farley, K., Banzhaf, E., Zandersen, M., Grandin, G., & Jones, L. (2024). Opportunities and constraints of implementing the 3–30–300 rule for urban greening. *Urban Forestry and Urban Greening*, 98. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128393>
- Pagliacci, F. (2017). Measuring EU Urban-Rural Continuum Through Fuzzy Logic. *Tijdschrift voor Economische en Sociale Geografie*, 108(2), 157–174. <https://doi.org/10.1111/tesg.12201>
- Palazzo, A. L., & Aristone, O. (2016). Né città né campagna. *Agriregionieuropa*, 44, 1–7. <http://agrireregionieuropa.univpm.it/it/content/article/31/44/ne>
- Pastore, M. C., Parenti, C. I. M., & Patetta, C. (2025). Measuring Accessibility of Green Spaces for the Health and Wellbeing of Inhabitants of the Milan Metropolitan Area. *Land*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/land14010097>

- Perkins, S. E., & Alexander, L. V. (2013). On the measurement of heat waves. *Journal of climate*, 26(13), 4500–4517.
- Peroni, F., Pappalardo, S. E., Facchinelli, F., Crescini, E., Munafò, M., Hodgson, M. E., & De Marchi, M. (2022). How to map soil sealing, land take and impervious surfaces? A systematic review. In *Environmental Research Letters* (Vol. 17, Numero 5). Institute of Physics. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac6887>
- Poelman, H. (2018). *A Walk to the park? Assessing Access to Green Areas in Europe'S cities* (WP 01; Regional and Urban Policy). <http://www.un.org/sustainabledevelopment/cities/>
- Przewoźna, P., Inglot, A., Mielewczyk, M., Maczka, K., & Matczak, P. (2024). Accessibility to urban green spaces: A critical review of WHO recommendations in the light of tree-covered areas assessment. *Ecological Indicators*, 166. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112548>
- Raffaelli, D. G., & Frid, C. L. J. (2010). The evolution of ecosystem ecology. *Ecosystem Ecology: A New Synthesis*, 1–18.
- Rahman, M. A., Stratopoulos, L. M. F., Moser-Reischl, A., Zölch, T., Häberle, K. H., Rötzer, T., Pretzsch, H., & Pauleit, S. (2020). Traits of trees for cooling urban heat islands: A meta-analysis. In *Building and Environment* (Vol. 170). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106606>
- Regione Lazio. (2010, novembre 15). *Carta delle formazioni naturali e seminaturali mediante approfondimento al 4° e 5° livello Corine Land Cover della Carta dell'Uso del Suolo della Regione Lazio*. <https://geoportale.regione.lazio.it/documents/172/link>
- Resemini, R., Geroldi, C., Capotorti, G., De Toni, A., Parisi, F., De Sanctis, M., Cabai, T., Rossini, M., Vignali, L., Poli, M. U., Lo Piccolo, E., Mariotti, B., Arcidiacono, A., Biella, P., Alghisi, E., Bani, L., Bertini, M., Blasi, C., Buffi, F., ... Gentili, R. (2025). Building Greener Cities Together: Urban Afforestation Requires Multiple Skills to Address

- Social, Ecological, and Climate Challenges. *Plants*, 14(3), 404.
<https://doi.org/10.3390/plants14030404>
- Robine, J. M., Cheung, S. L. K., Le Roy, S., Van Oyen, H., Griffiths, C., Michel, J. P., & Herrmann, F. R. (2008). Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *Comptes Rendus - Biologies*, 331(2), 171–178.
<https://doi.org/10.1016/j.crvi.2007.12.001>
- Romano, B., Fiorini, L., & Marucci, A. (2019). Italy without urban «sprinkling». A uchronia for a country that needs a retrofit of its urban and landscape planning. *Sustainability (Switzerland)*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/SU11123469>
- Romano, B., Zullo, F., Ciabò, S., Fiorini, L., & Marucci, A. (2016). Il modello italiano di dispersione urbana: la sfida dello «sprinkling». *Sentieri Urbani*, 19, 15–22.
- Rosina, K., Batista e Silva, F., Vizcaino, P., Marín Herrera, M., Freire, S., & Schiavina, M. (2020). Increasing the detail of European land use/cover data by combining heterogeneous data sets. *International Journal of Digital Earth*, 13(5), 602–626.
<https://doi.org/10.1080/17538947.2018.1550119>
- Ruckelshaus, M., McKenzie, E., Tallis, H., Guerry, A., Daily, G., Kareiva, P., Polasky, S., Ricketts, T., Bhagabati, N., & Wood, S. A. (2015). Notes from the field: Lessons learned from using ecosystem service approaches to inform real-world decisions. *Ecological Economics*, 115, 11–21.
- Rülke, J., Rieckmann, M., Nzau, J. M., & Teucher, M. (2020). How ecocentrism and anthropocentrism influence human-environment relationships in a kenyan biodiversity hotspot. *Sustainability (Switzerland)*, 12(19).
<https://doi.org/10.3390/su12198213>
- Sallustio, L., Lasserre, B., Blasi, C., & Marchetti, M. (2020). Infrastrutture verdi contro il consumo di suolo. *Reticula*, 25, 21–31.
<https://www.researchgate.net/publication/348333341>

- Sallustio, L., Perone, A., Vizzarri, M., Corona, P., Fares, S., Coccozza, C., Tognetti, R., Lasserre, B., & Marchetti, M. (2019). The green side of the grey: Assessing greenspaces in built-up areas of Italy. *Urban Forestry and Urban Greening*, 37, 147–153. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.10.018>
- Sangwan, A., Saraswat, A., Kumar, N., Pipralia, S., & Kumar, A. (2022). *Urban Green Spaces Prospects and Retrospect's* (R. A. Castanho & J. C. Fernández, A c. Di; Urban Green Spaces). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.97910>
- Sayão, V. M., dos Santos, N. V., de Sousa Mendes, W., Marques, K. P. P., Safanelli, J. L., Poppiel, R. R., & Demattê, J. A. M. (2020). Land use/land cover changes and bare soil surface temperature monitoring in southeast Brazil. *Geoderma Regional*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00313>
- Scarascia-Mugnozza, G. E., Guallart, V., Salbitano, F., Aalmo, G. O., & Boeri, S. (2023). *Transforming BioCities: Designing Urban Spaces Inspired by Nature* (Vol. 20). Springer Nature.
- Schiavina, M., Melchiorri, M., Corbane, C., Florczyk, A. J., Freire, S., Pesaresi, M., & Kemper, T. (2019). Multi-scale estimation of land use efficiency (SDG 11.3.1) across 25 Years Using Global Open and Free Data. *Sustainability (Switzerland)*, 11(20). <https://doi.org/10.3390/su11205674>
- Schnell, S., Kleinn, C., & Ståhl, G. (2015). Monitoring trees outside forests: a review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(9). <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4817-7>
- Sebastiani, A., Marando, F., & Manes, F. (2021). Mismatch of regulating ecosystem services for sustainable urban planning: PM10 removal and urban heat island effect mitigation in the municipality of Rome (Italy). *Urban Forestry and Urban Greening*, 57. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126938>
- Sekertekin, A., & Bonafoni, S. (2020). Sensitivity analysis and validation of daytime and nighttime land surface temperature retrievals from

- landsat 8 using different algorithms and emissivity models. *Remote Sensing*, 12(17). <https://doi.org/10.3390/RS12172776>
- Silva, C., & Larsson, A. (2018). *Challenges for Accessibility Planning and Research in the Context of Sustainable Mobility*. OECD. www.itf-oecd.org
- SINFor. (2024). *Carta Forestale d'Italia*. <https://sinforang.geodatalab.cloud/#/carta>
- Stewart, I. D., Oke, T. R., & Krayenhoff, E. S. (2014). Evaluation of the local climate zone scheme using temperature observations and model simulations. *International journal of climatology*, 34(4).
- Tarquini, S., Vinci, S., Favalli, M., Doumaz, F., Fornaciai, A., & Nannipieri, L. (2012). Release of a 10-m-resolution DEM for the Italian territory: Comparison with global-coverage DEMs and anaglyph-mode exploration via the web. *Computers and Geosciences*, 38(1), 168–170. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.04.018>
- Taylor, L., & Hochuli, D. F. (2017). Defining greenspace: Multiple uses across multiple disciplines. *Landscape and Urban Planning*, 158, 25–38. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.09.024>
- Testo unico in materia di foreste e filiere forestali, Pub. L. No. 34, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana 1 (2018).
- Thomas, N., Baltezar, P., Lagomasino, D., Stovall, A., Iqbal, Z., & Fatoyinbo, L. (2021). Trees outside forests are an underestimated resource in a country with low forest cover. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86944-2>
- Trigila, A., Iadanza, C., Lastoria, B., Bussetini, M., & Barbano, A. (2021). *Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio: Vol. Rapporti 356* (ISPRA, A c. Di; 2021^a ed.).
- Tuvikene, T., Nugin, R., Kasemets, K., Pikner, T., Printsman, A., Dean, K., & Palang, H. (2022). The landscape approach to planetary urbanization: beyond the planetary urbanization approach. *City*, 26(4), 723–744. <https://doi.org/10.1080/13604813.2022.2079884>

- UN DESA Population Division. (2019). *World Urbanization Prospects The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420)*.
- UN Habitat. (2018a). *Metadata on SDGs Indicator 11.7.1 Indicator category: Tier II*. UN Habitat.
- UN Habitat. (2018b, ottobre). *Metadata on SDGs Indicator 11.7.1 Indicator category: Tier II*.
https://unhabitat.org/sites/default/files/2020/07/metadata_on_sdg_indicator_11.7.1.pdf
- United Nations. (2015). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. In *General Assembly: Vol. A/RES/70/1 (A/RES/70/1; pagg. 1–35)*.
- United Nations Human Settlements Programme. (2021). *SDG 11.03.01 indicator metadata. Harmonized metadata template - format version 1.0*.
- Urso, G. (2021). Metropolisation and the challenge of rural-urban dichotomies. *Urban Geography*, 42(1), 37–57.
<https://doi.org/10.1080/02723638.2020.1760536>
- USGS. (2024). *Landsat 8-9 Collection 2 (C2) Level 2 Science Product (L2SP) Guide: Vol. Version 6.0* (Department of the Interior U.S. Geological Survey, A c. Di). USGS. https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/media/files/LSDS-1619_Landsat8-9-Collection2-Level2-Science-Product-Guide-v6.pdf
- van Vliet, J., Birch-Thomsen, T., Gallardo, M., Hemerijckx, L. M., Hersperger, A. M., Li, M., Tumwesigye, S., Twongyirwe, R., & van Rompaey, A. (2020). Bridging the rural-urban dichotomy in land use science. In *Journal of Land Use Science* (Vol. 15, Numero 5, pagg. 585–591). Taylor and Francis Ltd.
<https://doi.org/10.1080/1747423X.2020.1829120>

- Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 370–384. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)
- Ward, K., Lauf, S., Kleinschmit, B., & Endlicher, W. (2016). Heat waves and urban heat islands in Europe: A review of relevant drivers. *Science of the Total Environment*, 569–570, 527–539. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.119>
- Winbourne, J. B., Jones, T. S., Garvey, S. M., Harrison, J. L., Wang, L., Li, D., Templer, P. H., & Huttyra, L. R. (2020). Tree transpiration and urban temperatures: Current understanding, implications, and future research directions. In *BioScience* (Vol. 70, Numero 7, pagg. 576–588). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/biosci/biaa055>
- World Health Organization. (2017). *Urban green spaces: a brief for action*.
- Wu, H., Liu, Y., Pu, Y., Liu, P., Zhao, W., & Guo, X. (2024). National-scale nighttime high-temperature anomalies from Landsat-8 OLI images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 212, 212–229. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2024.05.002>
- Yu, Z., Yang, G., Zuo, S., Jørgensen, G., Koga, M., & Vejre, H. (2020). Critical review on the cooling effect of urban blue-green space: A threshold-size perspective. In *Urban Forestry and Urban Greening* (Vol. 49). Elsevier GmbH. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126630>
- Zhang, P., Bounoua, L., Imhoff, M. L., Wolfe, R. E., & Thome, K. (2014). Comparison of MODIS Land Surface Temperature and Air Temperature over the Continental USA Meteorological Stations. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 40(2), 110–122. <https://doi.org/10.1080/07038992.2014.935934>
- Zhong, R. (2024, maggio 3). What happens when NASA Loses Eyes on Earth? We're About to Find Out. *The New York Times*.

- Ziter, C., & Turner, M. G. (2018). Current and historical land use influence soil-based ecosystem services in an urban landscape. *Ecological Applications*, 28(3), 643–654.



UNIONE EUROPEA
Fondo Sociale Europeo



*Ministero dell'Università
e della Ricerca*



PON REACT EU
RICERCA
E INNOVAZIONE
2014-2020

La borsa di dottorato è stata cofinanziata con risorse del
Programma Operativo Nazionale Ricerca e Innovazione 2014-2020, risorse FSE REACT-EU
Azione IV.4 "Dottorati e contratti di ricerca su tematiche dell'innovazione"
e Azione IV.5 "Dottorati su tematiche Green"