PIANO STRUTTURALE PRATO

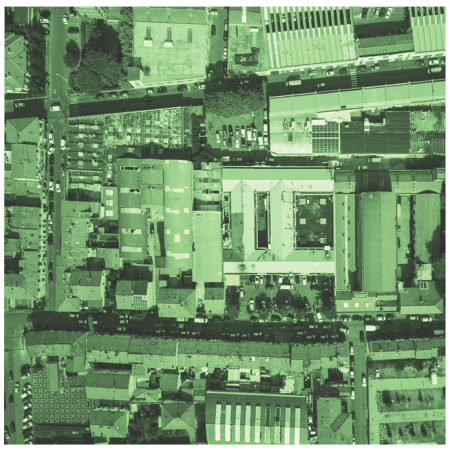
comune di PRATO



Piano Strutturale 2024

Relazione delle attività di ricerca per lo sviluppo del Piano d'Azione per l'Energia sostenibile ed il Clima







ELABORATO QC_AA_2

Approvazione 2024

Consiglio Nazionale delle Ricerche

Istituto per la BioEconomia

Relazione delle attività di ricerca per lo sviluppo del Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile ed il Clima (PAESC) per il Comune di Prato

Piano di ricerca finalizzato alla valutazione dei rischi e delle vulnerabilità indotti dal cambiamento climatico e alla valutazione della potenzialità mitigativa del piano di azione sulla forestazione urbana della città di Prato

REPORT ATTIVITA' ANNO I

RESPONSABILE SCIENTIFICO

Dr. Beniamino Gioli

AUTORE

Dr. Lorenzo Brilli

CO-AUTORI

Federico Carotenuto, Marta Chiesi, Letizia Cremonini, Edoardo Fiorillo, Tommaso Giordano, Giovanni Gualtieri, Giulia Guerri, Ramona Magno, Francesca Martelli, Fabio Maselli, Marco Morabito, Marianna Nardino, Carolina Vagnoli, Alessandro Zaldei.

1. Introduzione

Nell'ambito del post emergenza COVID19, la commissione Europea ha approvato finanziamenti straordinari per i paesi membri che permetteranno l'attuazione di misure fondamentali di investimento e riforma per la ripresa e la resilienza quali il perseguimento verso la transizione verde e digitale, il rafforzamento della resilienza economica e sociale e la coesione del mercato unico. Il piano dell'Italia riserva il 37% della spesa totale a misure di sostegno agli obiettivi climatici, in cui sono inclusi investimenti per finanziare un programma di ristrutturazioni per migliorare l'efficienza energetica degli edifici, interventi per promuovere l'uso di fonti di energia rinnovabile, riduzione delle emissioni di gas a effetto serra dei trasporti mediante investimenti nella mobilità urbana sostenibile e nelle infrastrutture ferroviarie. Tali azioni si collocano in un momento storico fondamentale per gli impegni alla lotta contro il cambiamento climatico, dove così come l'Unione europea inserisce nel programma comune un impegno alla riduzione delle emissioni al 2030 del 55% rispetto a quelle del 1990, anche le città italiane si muovono in questa direzione sottoscrivendo la *Carta per la neutralità climatica delle green city*. La normativa europea prevede che tutti i Paesi dell'Unione dovranno raggiungere la neutralità climatica al 2050 attraverso l'azzeramento delle emissioni, gli investimenti nelle tecnologie verdi e la protezione dell'ambiente naturale. Anche per le nostre città la sfida della neutralità climatica è un impegno decisivo per il loro futuro e un'occasione di riqualificazione ecologica e di miglioramento del benessere dei cittadini. Tramite la Carta per la neutralità climatica le città italiane (ad oggi 45 città hanno già sottoscritto tale carta) dovranno individuare un pacchetto di misure per raggiungere i cinque obiettivi strategici di seguito riportati:

a) *Promuovere un nuovo protagonismo delle città per la transizione alla neutralità climatica, attraverso l'utilizzazione al meglio delle risorse del PNRR con misure per una vivibilità delle città, in particolare per la qualità dell'aria, la rigenerazione urbana, la riqualificazione del patrimonio edilizio esistente, la mobilità sostenibile, la gestione ecologica delle acque e lo sviluppo delle infrastrutture verdi, la riduzione del consumo di risorse e di energia nella produzione e nei consumi.*

b) *Aumentare l'impegno per l'efficienza energetica e le fonti rinnovabili, riducendo i consumi complessivi di energia entro il 2030 di almeno il 15% a quelli pre-pandemia e tagliando di circa il 40% i consumi di combustibili fossili, con le rinnovabili che dovranno coprire a fine decennio il 70% della produzione. Per rispettare questo trend le città dovranno, tra l'altro,*

definire programmi di riqualificazione energetica degli edifici pubblici e privati, definire misure contro gli sprechi di energia, pro muovere l'uso di apparecchiature ed elettrodomestici ad alta efficienza energetica, promuovere sistemi solari attivi, termici e fotovoltaici di nuova generazione.

c) *Puntare su una mobilità urbana più sostenibile, meno dipendente dall'auto. Il trasporto stradale è responsabile del 90% delle emissioni. Le città dovranno definire un piano per la mobilità sostenibile precisando gli obiettivi, con particolare riferimento alla riduzione dell'uso dell'auto privata, favorendo la sharing mobility; estendere le zone pedonalizzate e le Ztl a pagamento; facilitare la riduzione degli spostamenti ricorrendo allo smart working; estendere le reti di piste ciclabili e percorsi pedonali; promuovere l'elettrificazione; riorganizzare la distribuzione urbana delle merci.*

d) *Promuovere l'economia circolare de carbonizzata attraverso la diffusione tra i cittadini di consumi consapevoli che non danneggino il clima; promuovere la diffusione di pratiche agro-ecologiche e biologiche; ridurre la produzione di rifiuti anche attraverso obiettivi avanzati di raccolta differenziata e di riciclo di tutti i rifiuti, potenziando la raccolta di quelli organici.*

e) *Aumentare gli assorbimenti di carbonio nei suoli, nei sistemi forestali e nelle infrastrutture verdi, che dovrebbero almeno raddoppiare entro il 2050 rispetto ai livelli attuali, per compensare le emissioni incomprimibili e consentire un bilancio di emissioni nette pari a zero. Quindi valorizzare la biodiversità nelle città puntando all'incremento dei parchi e dei giardini, delle dotazioni di alberature stradali, dei sistemi di orti urbani; promuovere l'impiego di materiali atti alla cattura, sequestro e stoccaggio della CO_2 attraverso "l'azione di rinnovati involucri architettonici, coperture edilizie, pavimentazioni".*

Con delibera n.79 del 24/10/2019, il Consiglio Comunale del Comune di Prato ha condiviso e approvato la proposta formulata dalla Commissione Europea del "Patto dei Sindaci per il Clima e l'Energia". Tale proposta è finalizzata al coinvolgimento delle comunità locali alla realizzazione di iniziative per ridurre nelle città le emissioni di CO_2 e contrastare gli effetti e le vulnerabilità del cambiamento climatico attraverso l'attuazione di un Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile e il Clima (PAESC). In tale ottica il Comune di Prato in accordo con i ricercatori del Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per la BioEconomia (CNR-IBE), ha pertanto sottoscritto una convenzione proponente lo sviluppo di un piano di attività di ricerca finalizzato alla valutazione dei rischi e delle

vulnerabilità indotti dal cambiamento climatico sul territorio comunale. Tale attività risulterebbe difatti propedeutica e necessaria per la successiva definizione del Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile ed il Clima (PAESC) attraverso l'individuazione di azioni integrate negli aspetti di mitigazione e adattamento al cambiamento climatico, con l'obiettivo della riduzione delle emissioni di gas serra ed inquinanti in atmosfera in accordo con il nuovo Patto dei Sindaci e il target 2030 e aumentando nel contempo la resilienza del territorio agli eventi climatici estremi.

Entro tale convenzione sono state quindi proposte attività legate al ruolo dei sistemi biologici e delle Nature Based Solutions (NBS), ed alle tecnologie più innovative di monitoraggio delle emissioni e degli assorbimenti di gas serra, sfruttando la sinergia con il progetto europeo UIA-PUJ (Urban Innovation Actions – Prato Urban Jungle) attualmente in corso nel comune di Prato. Le attività, come previsto dalla convenzione tra Comune di Prato e CNR-IBE si sono rivolte a quattro grandi aree tematiche:

i. *vulnerabilità climatica*
ii. *assorbimento di carbonio*
iii. *modello Digital-Twin*
iv. *super-sito per la misura degli scambi di CO_2*

Nel presente documento sono stati riportati i materiali e le metodologie adottate (sezione 2) e i risultati preliminari (3). Nella sezione 4 sono invece indicati possibili sviluppi futuri delle attività sinora condotte. Tutte le sezioni sono riferite al primo anno di lavoro, pertanto alcune di esse dovranno ancora essere completate.

2. Materiali e Metodi

Al fine di raggiungere gli obiettivi preposti, il gruppo di lavoro del CNR-IBE ha utilizzato e sviluppato diversi approcci metodologici. L'integrazione dei diversi approcci utilizzati, insieme ai diversi materiali messi in campo, ha permesso di ottenere risultati integrati che hanno fornito una panoramica completa della situazione all'interno del comune di Prato. Di seguito è stata riportata una breve descrizione degli approcci metodologici utilizzati:

a) Dato inventariale e rilievi in campo

Il dato inventariale delle misure del verde urbano comunale, fornito dal comune stesso e comprensivo di localizzazione, tipo di specie e circonferenza della pianta, è stato necessario per ottenere una prima panoramica della situazione del verde urbano. Partendo da tale database, una prima analisi ha consistito nella creazione di curve ipsometriche per la stima del volume arbore tramite la relazione esistente tra C-stock/diametro (3.1). Benché recentemente aggiornato, il database ha previsto misure aggiuntive di analisi per la differenziazione di tale relazione tra le diverse specie.

b) Remote sensing

Immagini da satellite ottenute da database presenti, liberamente scaricabili, e analisi con procedure software sono state utilizzate come dati di input e driver modellistici. L'elaborazione ha consistito nell'estrazione di indici vegetazionali di diverso tipo, i quali hanno permesso un ottimizzazione della parte modellistica necessaria per valutare dinamiche e stock di carbonio.

c) Sistemi informativi geografici

Lo strumento GIS è stato utilizzato per evidenziare i confini del Comune ed individuare al suo interno macrocategorie necessarie allo svolgimento delle analisi. Nello specifico, sono state discriminate le superfici urbane, agricole e forestali. Di queste ultime, sono state suddivise ulteriori aree inquadrandole per macrocategorie al fine di ottenere informazioni che potessero permettere la validazione modellistica. Le macrocategorie forestali discriminate dall'analisi sono state: i) pineta (area forestale); ii) macchia querceta (area forestale); iii) latifoglie sempreverdi (area urbana); iv) latifoglie decidue (area urbana); v) conifere (area urbana); vi) oliveti (area agricola).

d) Modellistica

L'approccio modellistico consta dell'utilizzo di tre modelli diversi. Il modello "C-Fix" è stato utilizzato per ottenere una stima diretta della produzione primaria lorda (GPP) con fPAR; il modello "Biome-BGC" è stato utilizzato per ottenere la capacità di immagazzinamento degli ecosistemi in termini di NEE grazie alla sua capacità di riprodurre i principali processi degli ecosistemi forestali validato in diversi ecosistemi; ed infine il modello fluidodinamico ENVI-met, un modello microclimatico tridimensionale non idrostatico (Bruse and Fleer, 1998) in grado di simulare le

interazioni superficie-pianta-aria in ambiente urbano con una risoluzione spaziali di 0.5-10 m e una risoluzione temporale di 10 sec.

3. Risultati

3.1. Vulnerabilità climatica

I cambiamenti climatici, correlabili a fattori antropici, come sostenuto dalla comunità scientifica internazionale, hanno impatti di dimensioni crescenti sugli equilibri ecosistemici, in particolare, sulla regolazione e sulla disponibilità di risorse idriche. Nelle aree mediterranee, gli impatti negativi sono principalmente associati a un innalzamento delle temperature medie e massime, a un'aumentata frequenza di precipitazioni intense e concentrate in brevi periodi, alternate a lunghi periodi di siccità. A fronte di tale situazione si registra una diminuzione delle precipitazioni medie e dei volumi di corsi d'acqua superficiali. Tali preoccupazioni hanno indotto l'Unione Europea a intraprendere una serie di iniziative che, ad aprile 2013, si sono concretizzate con l'adozione della "Strategia europea per i cambiamenti climatici" e con le successive Conclusioni del Consiglio del 13 giugno 2013. La Strategia Nazionale di Adattamento ai cambiamenti climatici (SNAC) conferma quanto già indicato nei documenti elaborati dall'International Panel on Climate Change (IPCC) e dall'European Environmental Agency (EEA) sulle vulnerabilità dell'Italia nel contesto dell'area mediterranea con particolare riferimento alle ondate di calore e alla gestione delle acque e ai rischi connessi causati da fenomeni meteorologici estremi.

3.1.1. Analisi storica delle successioni climatiche sul territorio del Comune di Prato

L'analisi delle serie storiche dei dati climatici disponibili per la città di Prato è stata effettuata su due siti: Prato_Urban e Prato_Rural (Figura 1) al fine di vedere la differenza tra area urbanizzata e area rurale. Il set di dati di Prato_Urban era differenziato in quanto la stazione è stata spostata nel 2010. Si è quindi proceduto ad un'omogeneizzazione dei dati al fine di avere la serie storica più lunga possibile: 1955-2019.

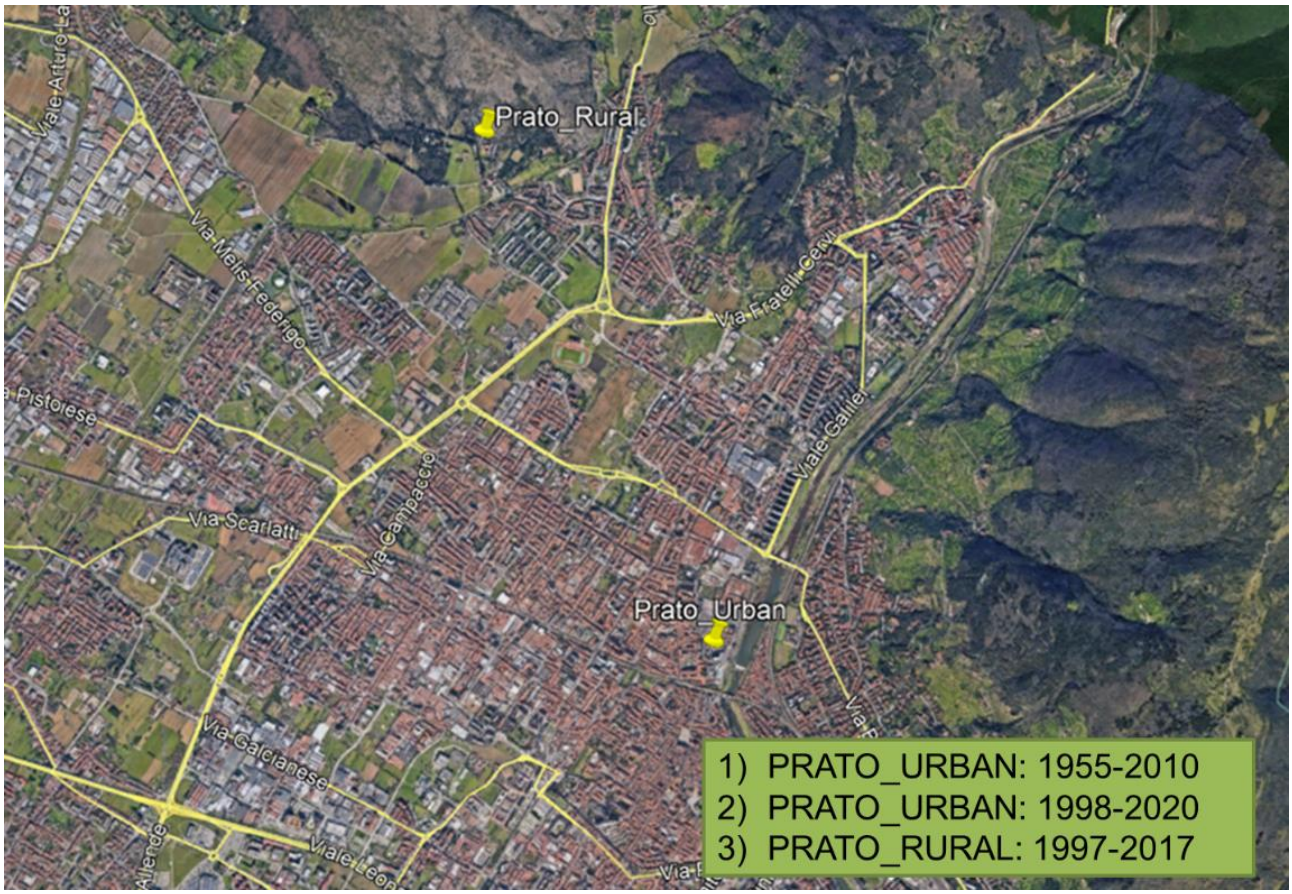
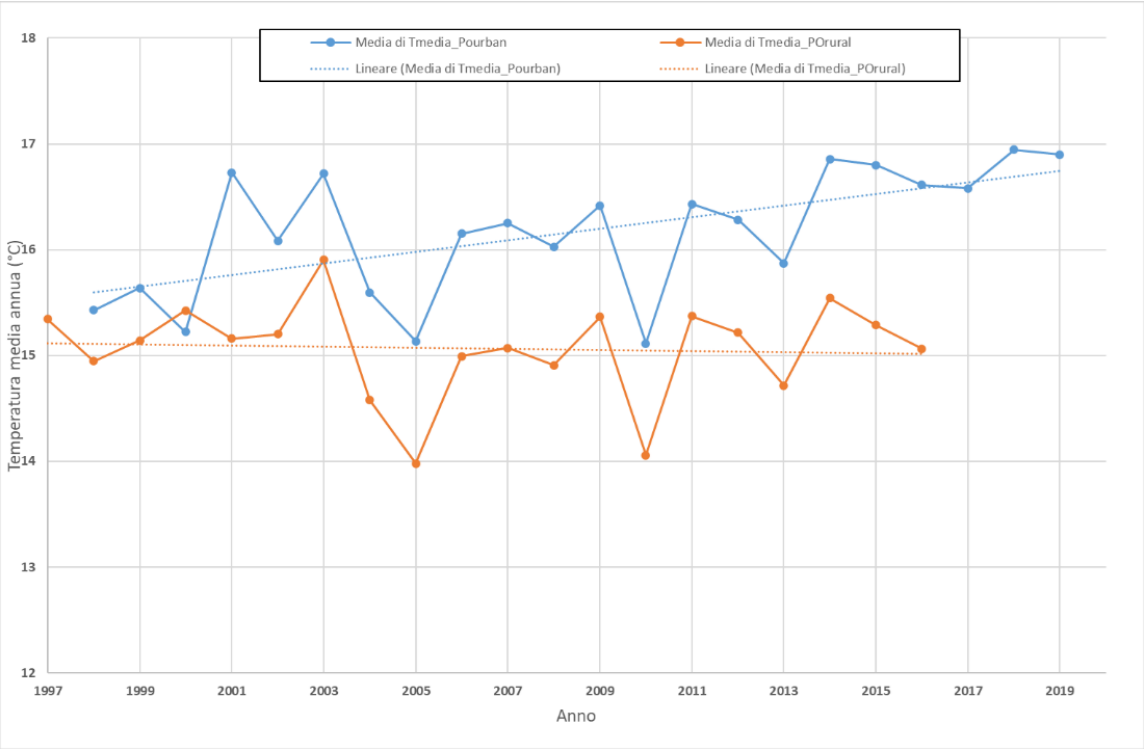


Figura 1. *Geolocalizzazione delle due stazioni di misura Prato_Urban e Prato_Rural utilizzate per l'analisi delle condizioni climatiche nella città di Prato (immagine da Google Earth).*

I dati della temperatura dell'aria media annua per i due siti (Figura 2) mostrano una differenza di circa un grado centigrado tra i due siti a dimostrazione della ben nota isola di calore urbana che si sviluppa all'interno di un'area urbana a causa delle superfici non permeabili e dell'immagazzinamento e ri-emissione di calore da parte degli edifici. La cosa interessante è notare come l'aumento negli anni della temperatura sia più evidente per l'area urbana rispetto all'area rurale.

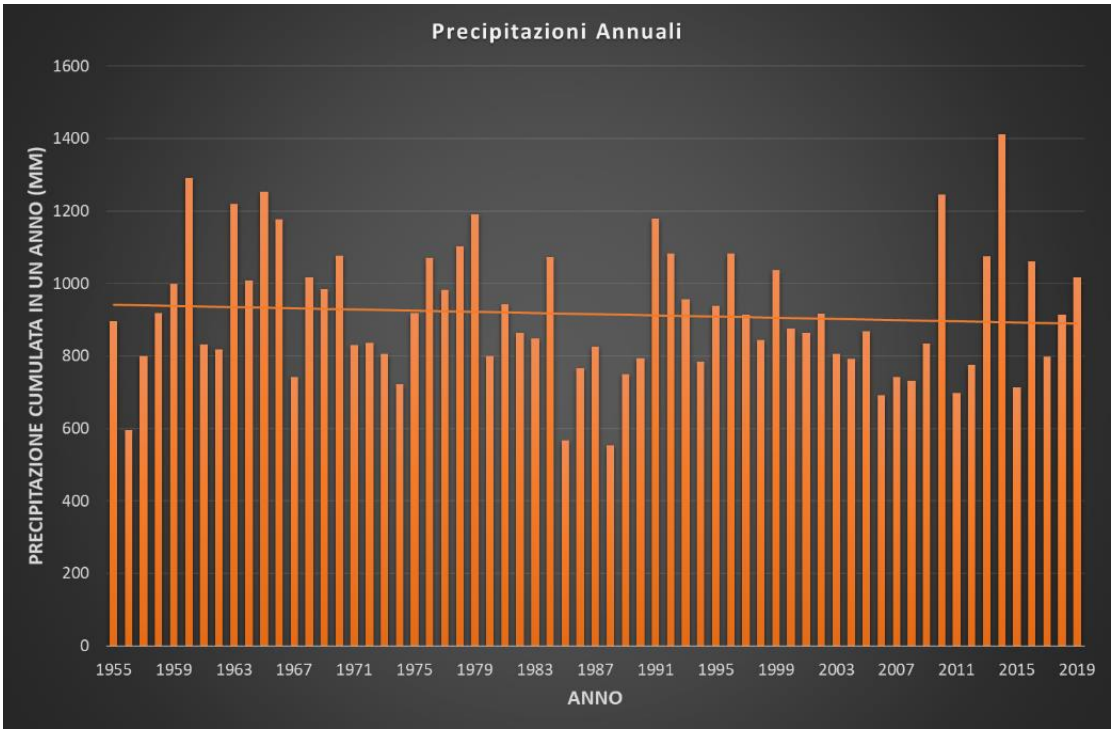


194

195 ***Figura 2.*** *Media annuale della temperatura dell'aria per Prato_urban e Padro_rural con le loro linee di tendenza dal*
196 *1997 al 2019.*

197

198 Il trend di precipitazione (Figura 3) nella la stazione Prato_urban non mostra particolari variazioni
199 durante gli anni dando conferma del fatto che le variazioni date dai cambiamenti climatici sono sulla
200 frequenza e l'intensità delle piogge e non sul valore cumulato annuale.



201

Figura 3. *Precipitazione cumulata annuale per Prato_urban con linea di tendenza dal 1955 al 2019.*

In figura 4 è riportata la temperatura media annua per la serie storica 1955-2019 nella stazione Prato_urban: l'incremento mostrato dalla linea di tendenza mostra quello che si riscontra a livello globale relativamente ai cambiamenti climatici e al riscaldamento globale ovvero che negli ultimi 50 anni la temperatura dell'aria media annua è aumentata

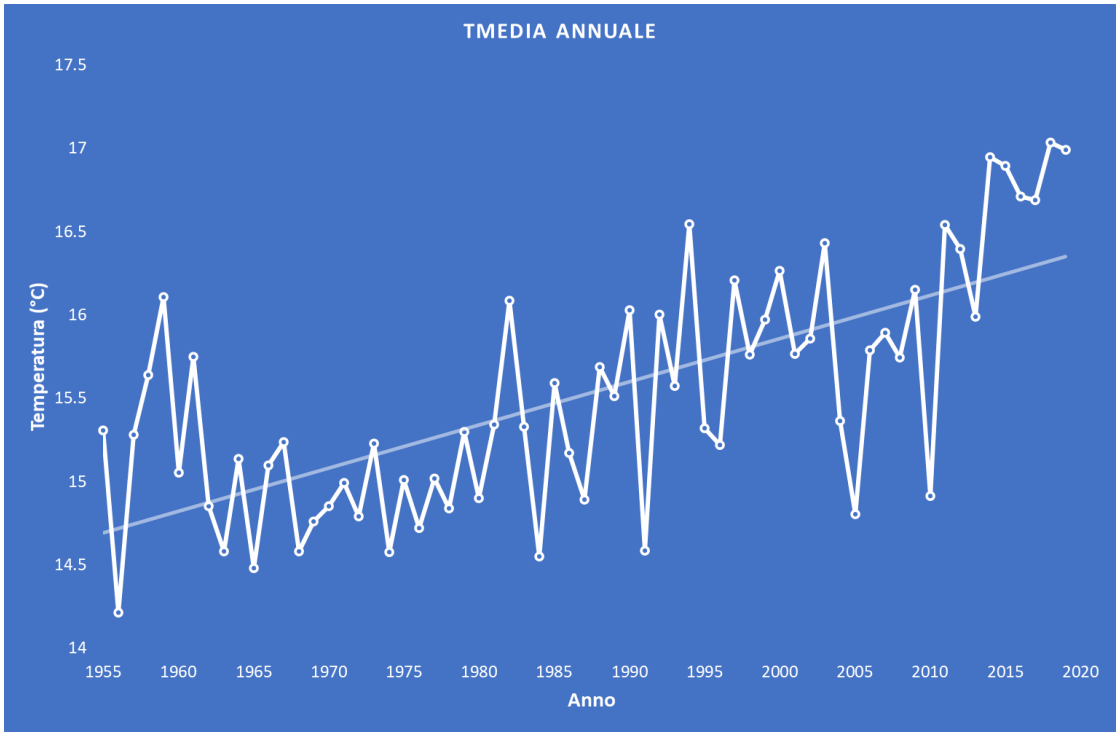


Figura 4. Temperatura media annua per Prato_urban con linea di tendenza dal 1955 al 2019.

3.1.2. Identificazione e valutazione delle vulnerabilità del territorio ai principali effetti climatici estremi (ondate di calore, precipitazioni estreme, siccità)

L'aumento di temperatura dell'aria fa sì che le ondate di calore siano sempre più frequenti e che i problemi legati alla salute della popolazione, soprattutto quella caratterizzata dalle fasce deboli, siano di maggiore interesse sia da un punto di vista medico, ma anche da un punto di vista di progettazione e rigenerazione urbanistica. Un'ondata di calore, in meteorologia, è un periodo di tempo atmosferico durante il quale la temperatura è insolitamente elevata rispetto alle temperature medie usualmente sperimentate in una data regione, in quel periodo e con caratteristiche di persistenza. La definizione di ondata di calore è relativa ad un dato clima nel senso che ciò che è percepito dalla popolazione come una temperatura eccessiva in un clima temperato può non esserlo in un'area dal clima maggiormente caldo. Nell'estate 2003 nel nostro paese si è osservato come l'onda di calore patologica

per la salute umana fosse “un periodo di almeno tre giorni con temperatura massima dell’aria superiore a 30°C (Ministero della Salute)”. Da questa definizione per la città di Prato, attraverso i dati orari della serie storica disponibile 1998-2020, sono state studiate e analizzate le ondate di calore. In Figura 5 sono riportate le ondate di calore in funzione del numero di giorni della durata di ogni singola ondata di calore. Per ogni anno sono poi riportati (nel quadrato in verde) i numeri di eventi che si sono avuti. Il grafico mostra che non vi è tanto un incremento del numero di ondate di calore per anno bensì vi è un aumento della durata di ogni singola ondata di calore come si evidenzia meglio dalla Figura 6.

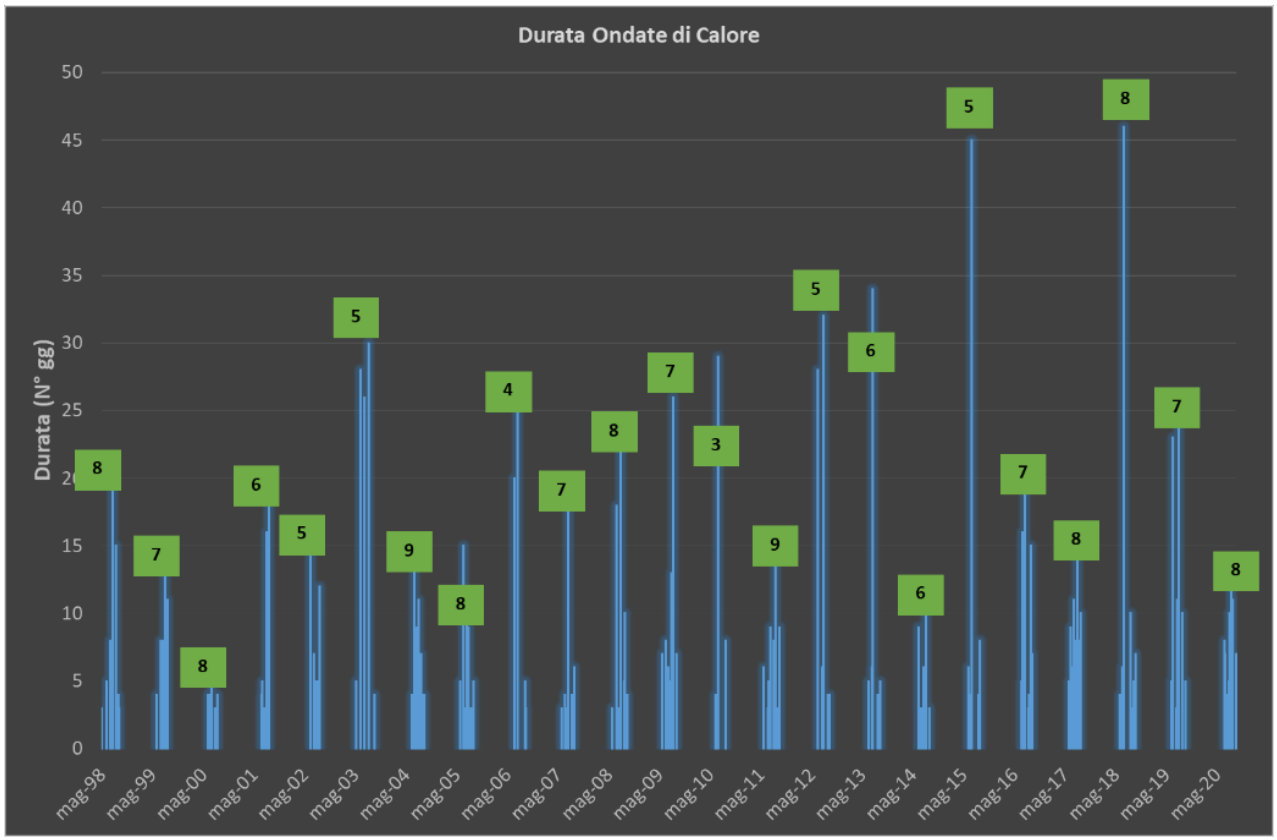


Figura 5. Numero di ondate di calore dal 1998 al 2020 per la città di Prato in funzione della durata espressa in numeri di giorni consecutivi con temperature massime maggiori di 30 °C.



Figura 6. Numero delle ondate di calore durante i singoli anni in funzione della durata espressa in giorni consecutivi con temperature massime maggiori di 30°C.

La durata in termini di giorni di un'ondata di calore raggiunge anche valori di 45 giorni (nel 2018) oppure si hanno tre eventi di durata di 30 giorni come è accaduto nel 2003: questo fa sì che le patologie legate alla presenza di un'ondata di calore si siano negli anni aggravate in quanto la persistenza di clima torrido e molto umido per un periodo di tempo prolungato porta sicuramente a effetti più gravi sulla salute umana. Vista questa tendenza, e visto che è in aumento, diventa di fondamentale

importanza uno studio degli ambienti urbani durante questi eventi per comprendere sia i processi fisici che si innescano, sia come le possibili soluzioni di rigenerazione urbana possano tenerne in conto e dare migliorie. In meteorologia gli eventi precipitativi sono classificati in base all'intensità:

- meno di 1mm/hr → pioviggine;
- 1-2 mm/hr → pioggia debole;
- 2-6 mm/hr → pioggia moderata;
- 6-10 mm/hr → pioggia forte;
- 10-30 mm/hr → rovescio;
- oltre 30mm/hr → nubifragio.

In meteorologia un nubifragio è quindi una precipitazione piovosa particolarmente intensa, durante la quale il tasso di pioggia caduta (rain rate) è uguale o superiore a 30 mm per ora [Giuliacci et al., 2019]. Nonostante solitamente abbia una breve durata, data la sua intensità, questo fenomeno è in grado di creare condizioni di allagamento e inondazioni, specie in zone predisposte. Si tratta di fenomeni associati tipicamente a temporali particolarmente violenti e duraturi, spesso con forte vento, in genere legati a celle temporalesche o a veri e propri violenti cicloni extratropicali. La serie storica di precipitazioni per il sito Prato_urban ha permesso di effettuare un'analisi sulla quantità delle precipitazioni intense avvenute a Prato dal 1997 al 2020. (Tabella 1). Possiamo notare come gli eventi di rovesci (precipitazioni intense) aumenta la sua frequenza con il passare degli anni e che nel 2010 si è verificato un evento vicino a essere definito nubifragio. L'attenzione deve essere posta sull'adattamento della rete idrica comunale a questi eventi estremi insieme al monitoraggio e a soluzioni adatte per l'intercettazione dell'acqua piovana (NBS: Nature Based Solutions).

DATA	Precipitazione (mm)	Durata (ore)	tasso prec. (mm/hr)
27/08/1997	43.4	3	14.47
18/11/1999	93.6	6	15.60
09/05/2006	53.6	5	10.72
08/08/2007	64.4	5	12.88
05/10/2010	69.4	3	23.13
26/10/2011	41.2	4	10.30
19/09/2016	65	5	13.00

Tabella 1. Eventi di precipitazioni intense registrate dalla stazione Prato_urban dal 1997 al 2020.

Dai dati storici giornalieri è possibile calcolare indici in grado di dare informazioni sul sistema climatico e gli effetti sui sistemi naturali con una particolare enfasi sugli eventi estremi. Questi indici ci indicano la durata e l'ampiezza delle ondate di calore, l'intensità e la frequenza delle precipitazioni, la misura di periodi estremamente umidi o secchi e caldi o freddi. Negli ultimi anni le procedure per il calcolo di questi indici sono state implementate e lo sviluppo e l'analisi di questi indici ha dato un contributo importante ai report di valutazione dell'IPCC. Per la finalità di questo studio sono stati selezionati gli indici più rappresentativi ai fini della valutazione climatica in ambiente urbano. Il rapporto ISPRA "Variazioni e tendenze degli estremi di temperatura e precipitazione in Italia" ha definito un insieme di 27 indici, idonei a descrivere gli estremi di temperatura e precipitazione in termini di frequenza, intensità e durata. Avendo a disposizione dati meteorologici della temperatura massima, minima e media giornaliera e delle precipitazioni giornaliere per la stazione Prato_urban dal 1955 al 2019 si può effettuare un'analisi delle serie storiche presenti e andare a determinare, per il Comune di Prato, l'andamento delle ondate di calore e degli eventi estremi precipitativi sia in termini di numero di eventi che di durata ed intensità. I dati sono stati processati con il software ClimPACT2, update del software RClimDEX sviluppato da WMO CCl/WCRP/JCOMM Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) (https://epic.awi.de/id/eprint/49274/1/ClimPACTv2_manual.pdf).

In Figura 7 sono riportati gli indici relativi all'aumento di giorni caldi e alle ondate di calore: possiamo notare come la tendenza di tutti gli indici è un aumento sia delle notti tropicali (T minima > 20 °C) che dei giorni estremamente caldi (T massima > 35°C). Le ondate di calore in questo caso sono state calcolate tenendo conto della climatologia media della città di Prato quindi ovviamente si ottiene un numero diverso rispetto all'analisi precedente che utilizzava la definizione del Ministero della Salute. Il risultato comunque mostra che sia il numero che la frequenza delle ondate di calore è in aumento soprattutto negli ultimi 20 anni. In particolare, si nota come emerge l'atipicità del 2003 dove all'ondata di calore hanno contributo 60 giorni consecutivi con temperature elevate.

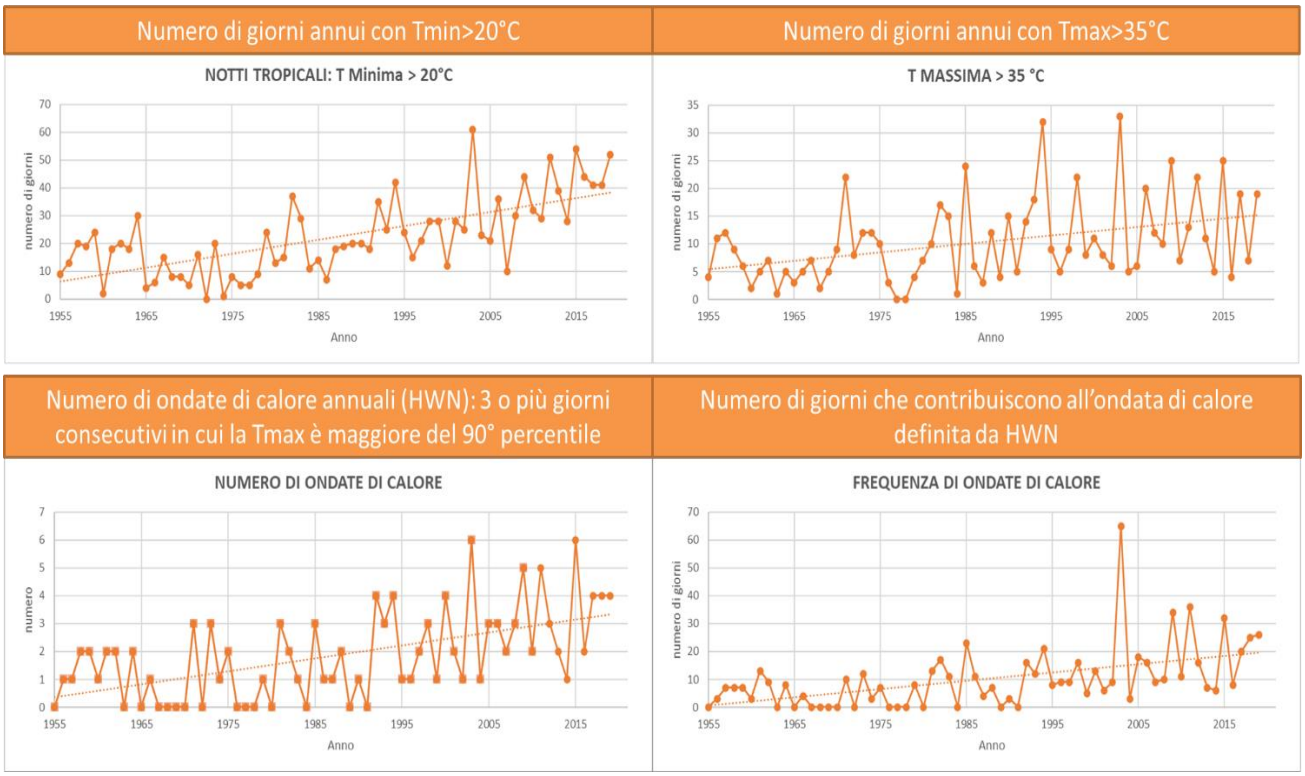


Figura 7. *Andamento degli indici climatici notti tropicali, numero di giorni annui con temperatura massima > 35°C, numero di ondate di calore annuale e frequenza delle ondate di calore dal 1955 al 2019 per la stazione Prato_Urban.*

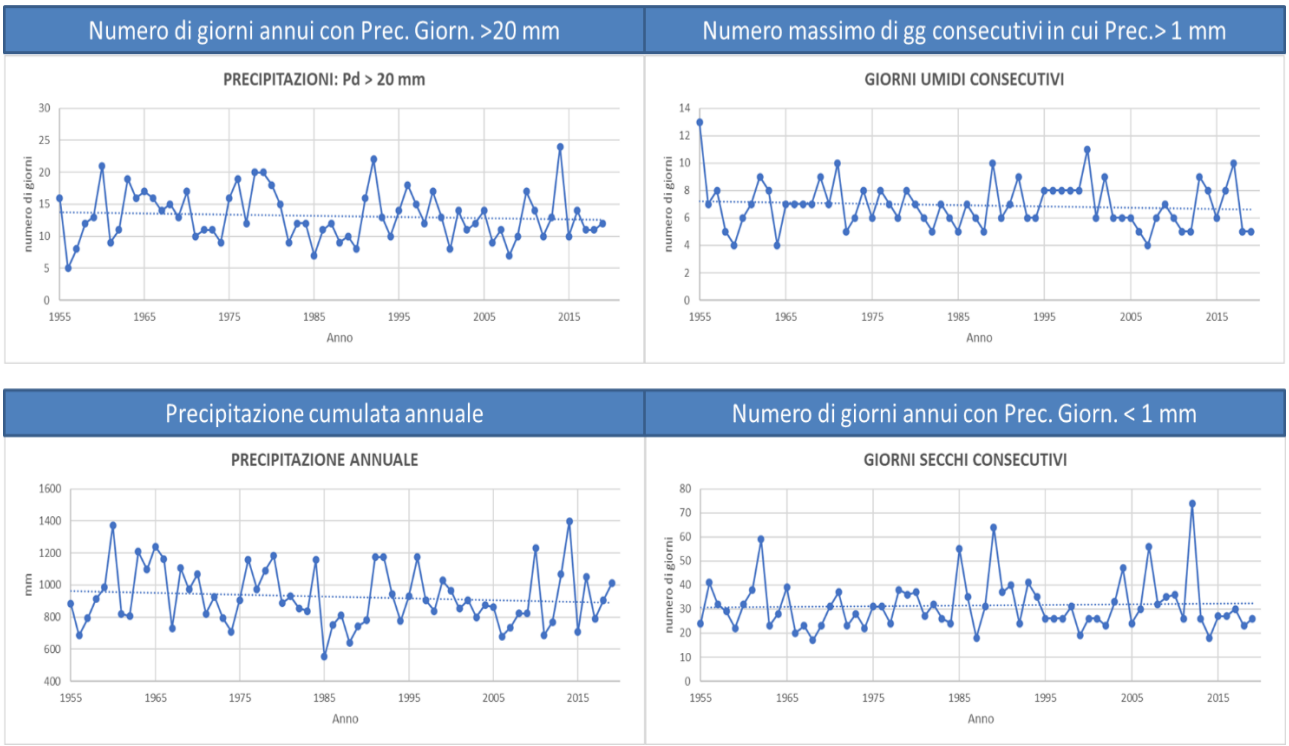


Figura 8. *Andamento degli indici climatici numero di giorni annui con precipitazione > 20mm, numero di giorni umidi consecutivi, precipitazione annuale e giorni secchi consecutivi dal 1955 al 2019 per la stazione Prato_Urban.*

Per quanto riguarda le precipitazioni gli indici climatici relativi sono riportati in Figura 8: non si nota un trend (le linee di tendenza sono piatte) né nella piovosità né nell'aumento di giorni secchi consecutivi (precipitazione giornaliera < 1 mm) questo perché gli eventi estremi da considerare per quanto riguarda le precipitazioni avvengono in poche ore e quindi non si possono evincere dai dati giornalieri. Questa tendenza negli indici climatici delle precipitazioni è piuttosto comune per diverse aree nell'Europa continentale mentre si hanno sostanziali variazioni nelle aree del Mediterraneo.

3.1.3. Definizione della fragilità microclimatica a scala comunale

La determinazione della fragilità microclimatica del costruito, degli effetti sulla città e sul benessere umano, nonché le implicazioni sulla regolamentazione urbanistica ed edilizia per garantirne il miglioramento può essere definita attraverso una serie di parametri. All'interno della valutazione ad ampio spettro della vulnerabilità climatica, la fragilità climatica a scala comunale è stata qui valutata in accordo a 7 parametri riportati in tabella 2.

Elaborato cartografico	Periodo analizzato	Risoluzione spaziale	Fonte
a. Temperatura superficiale estiva	2015-2021	30 m	Immagini satellitari Landsat 8
b. Intensità dell'isola di calore urbana superficiale	2015-2021	30 m	Immagini satellitari Landsat 8
c. Anomalie termiche estive	2015-2021	30 m	Immagini satellitari Landsat 8
d. Indice vegetazionale NDVI estivo	2015-2021	10 m	Immagini satellitari Sentinel-2
e. Albedo superficiale estivo	2015-2021	10 m	Immagini satellitari Sentinel-2
f. Consumo di suolo	2017	10 m	Dati ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e Ricerca Ambientale
g. Copertura arborea	2017	10 m	Dati ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e Ricerca Ambientale
h. Fattore di ombreggiamento Sky View Factor	2007-2010	1 m	Dati LIDAR

Tabella 2. *Descrizione dei 7 parametri utilizzati per analizzare la fragilità climatica a scala comunale*

a. Temperatura superficiale diurna estiva

La temperatura superficiale terrestre (Land Surface Temperature, LST) rappresenta un importante parametro geofisico del chhomportamento termico, impiegato in numerosi studi per la valutazione degli effetti dell'isola di calore urbana (Grigoras et al., 2019; Guha et al., 2018; Morabito et al., 2018). La mappa della temperatura superficiale terrestre è stata ottenuta dalle immagini satellitari Landsat 8 con risoluzione spaziale 30 m, disponibili sul sito dell'Agenzia U.S. Geological Survey (https://earthexplorer.usgs.gov). Sono state selezionate le scene della stagione estiva (Giugno, Luglio, Agosto) del periodo 2015-2021 in orario diurno (circa 10:00 UTCI), con una copertura nuvolosa inferiore al 10% (Tab.3).

Data di acquisizione	Elevazione solare (°)	Azimuth solare (°)	Copertura nuvolosa (%)
2015-06-06	64.12	136.49	0.28
2015-07-24	60.86	136.50	1.16
2015-08-09	57.53	140.89	1.76
2016-06-24	64.33	134.08	0.17
2016-07-10	62.93	134.46	2.12
2016-08-27	52.59	147.30	0.32
2017-06-11	64.44	135.63	0.13
2017-07-29	59.85	137.98	1.88
2017-08-30	51.76	148.20	0.07
2018-06-30	63.89	133.58	1.47
2018-08-17	55.44	143.48	3.41
2019-06-17	64.52	134.82	2.43
2019-07-19	61.75	135.67	1.75
2019-08-20	54.77	144.67	0.04
2020-07-21	61.28	136.16	0.47
2020-08-22	54.00	145.57	0.21
2021-06-22	64.41	134.21	6.46

Tabella 3. *Caratteristiche delle scene Landsat 8 del periodo 2015-2019.*

Il calcolo della LST ha adottato la metodologia ufficiale sviluppata dall'Agenzia U.S. Geological Survey (2020) e impiegata in numerose ricerche in ambito internazionale (Sobrino, Rassouni, Li, 2001; Sobrino, Jiménez-Muñoz, Paolini, 2004; Mallick et al., 2012; Guha et al., 2018).

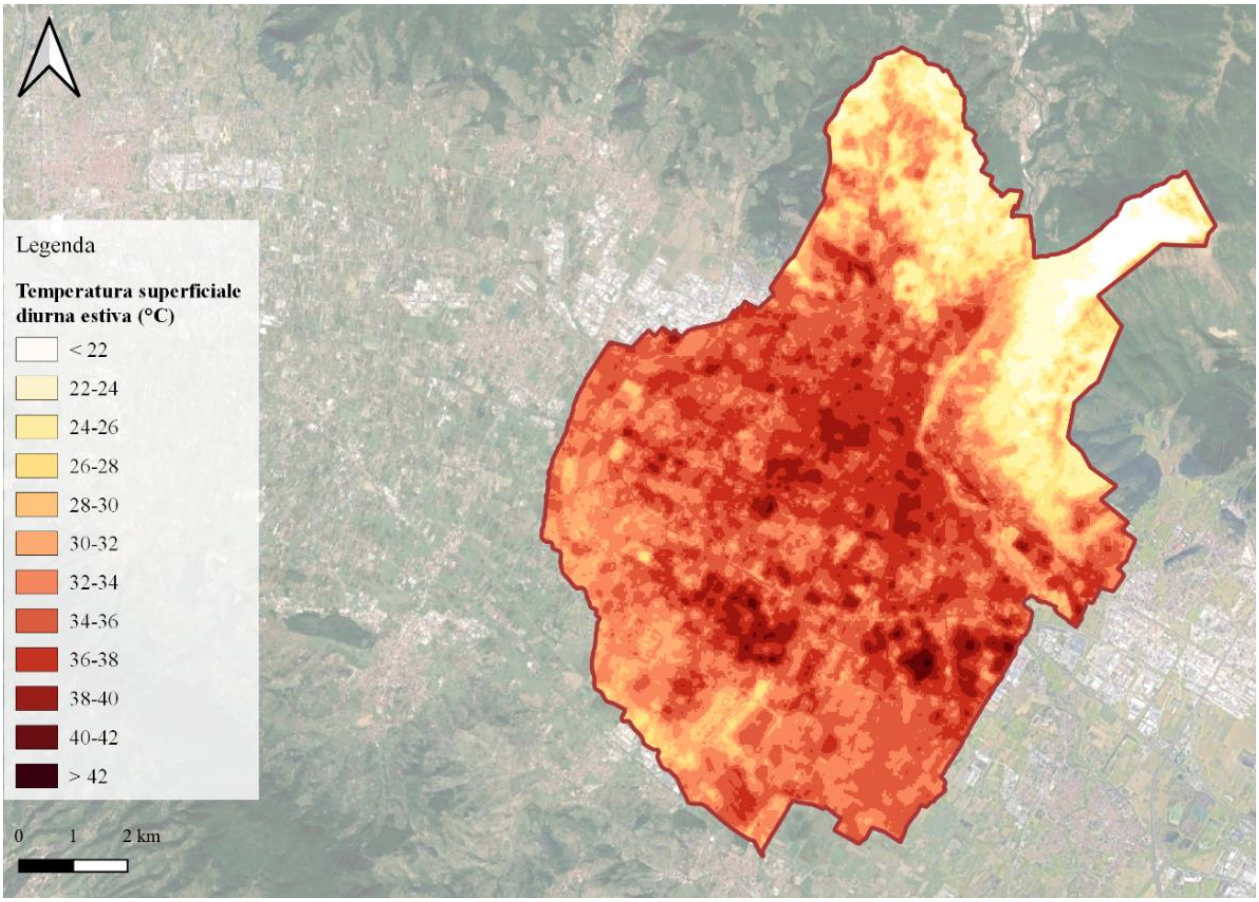


Figura 9. *Mappa del comune di Prato in riferimento alla temperatura superficiale diurna estiva*

b. Intensità dell'isola di calore urbana superficiale

L'intensità di calore urbana superficiale è stata valutata tramite *Urban Thermal Field Variance Index* (UTFVI). Tale indice è stato selezionato per quantificare l'impatto della temperatura superficiale sulla qualità della vita, con il fine di procedere alla valutazione ecologica delle condizioni termiche urbane estive (Guha et al, 2018). L'indice UTFVI è stato determinato dalla seguente formula:

$$UTFVI = (LST - LST_{media}) / LST_{media}$$

dove *LST* è la temperatura superficiale registrata in ciascun pixel e LST_{media} è il valore medio dell'area di studio relativo al periodo 2015-2019. Tale indice distingue 6 classi di valutazione ecologica e di intensità del fenomeno dell'isola di calore urbano superficiale (Surface Urban Heat Island, SUHI) (Renard et al., 2019) (Tab. 4).

Classi UTFVI	Valutazione ecologica	Intensità SUHI
< 0	Eccellente	Nessuna
0-0.005	Buona	Debole
0.005-0.010	Normale	Moderata
0.010-0.015	Negativa	Forte

Classi UTFVI	Valutazione ecologica	Intensità SUHI
0.015-0.020	Molto negativa	Molto forte
> 0.020	Gravemente negativa	Estrema

Tabella 4. *Classi di UTFVI.*

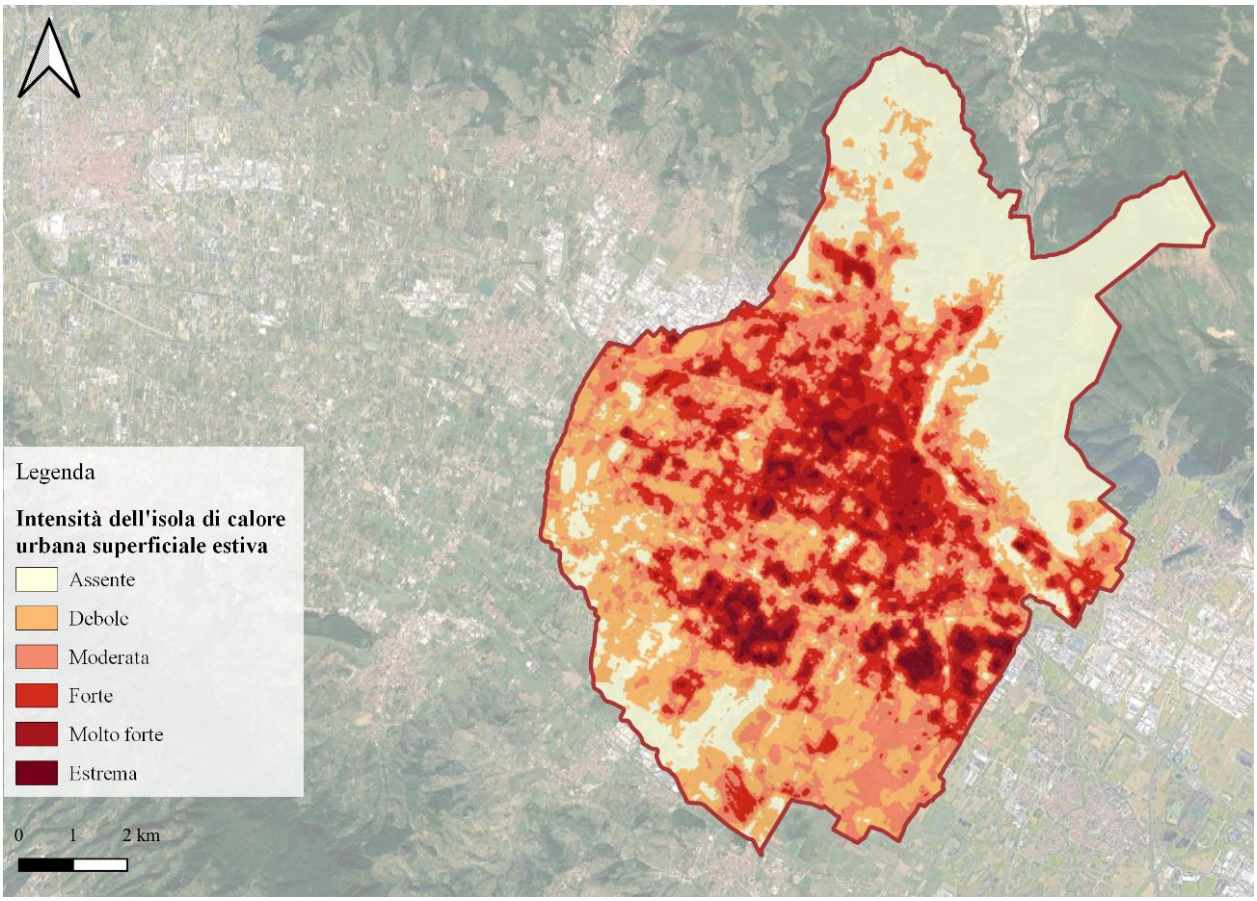


Figura 10. *Mappa del comune di Prato in riferimento all'intensità dell'isola di calore urbana superficiale*

c. Anomalie termiche superficiali estive

Le anomalie termiche superficiali sono state definite tramite l'applicazione di un metodo statistico di autocorrelazione spaziale di tipo locale (Getis-Ord Gi*) al dataset di LST del periodo 2015-2021. Attraverso questo metodo, sono stati individuati spazialmente i *clusters* di punti caldi (*hot-spots*) e freddi (*cool-spots*) statisticamente significativi, intesi come punti caratterizzati da valori elevati (o bassi) e circondati da punti con valori simili, entro un raggio di ricerca definito dalla risoluzione spaziale del dato di input (Mavrakou et al., 2018). L'applicazione dell'algoritmo Getis-Ord Gi* ha previsto una categorizzazione in 6 classi di *hot-* e *cool-spot* su 6 livelli in funzione di livelli di confidenza del 99%, 95% e 90%, in cui si registrano differenti soglie di LST media diurna estiva (tab. 3).

Classi	Livello di confidenza	LST media diurna (°C)	Area (ha) [%]*
Cool-spot, livello 3	99%	28.0	1872.3 [19.2]
Cool-spot, livello 2	95%	29.3	223.6 [2.3]
Cool-spot, livello 1	90%	30.0	134.6 [1.4]
Aree termicamente neutre	-	33.4	4346.3 [44.5]
Hot-spot, livello 1	90%	35.4	583.8 [6.0]
Hot-spot, livello 2	95%	36.1	1013.3 [10.4]
Hot-spot, livello 3	99%	37.0	1588.6 [16.3]

Tabella 5. *Classi di hot- e cool- spot termico estivo. *L'area % è riferita alla superficie comunale.*

Il territorio di Prato è interessato dal 55.5% (ha) di anomalie termiche: 32.6% (3185.7 ha) da hot-spot e 22.8 % (2230.4 ha) da cool-spot, rispettivamente con temperature superficiali medie di 36.2 °C e 29.1 °C. Inoltre, considerando il livello estremo (livello 3) di hot- e cool-spot, viene registrata una variazione di temperatura superficiale media pari a 9 °C.

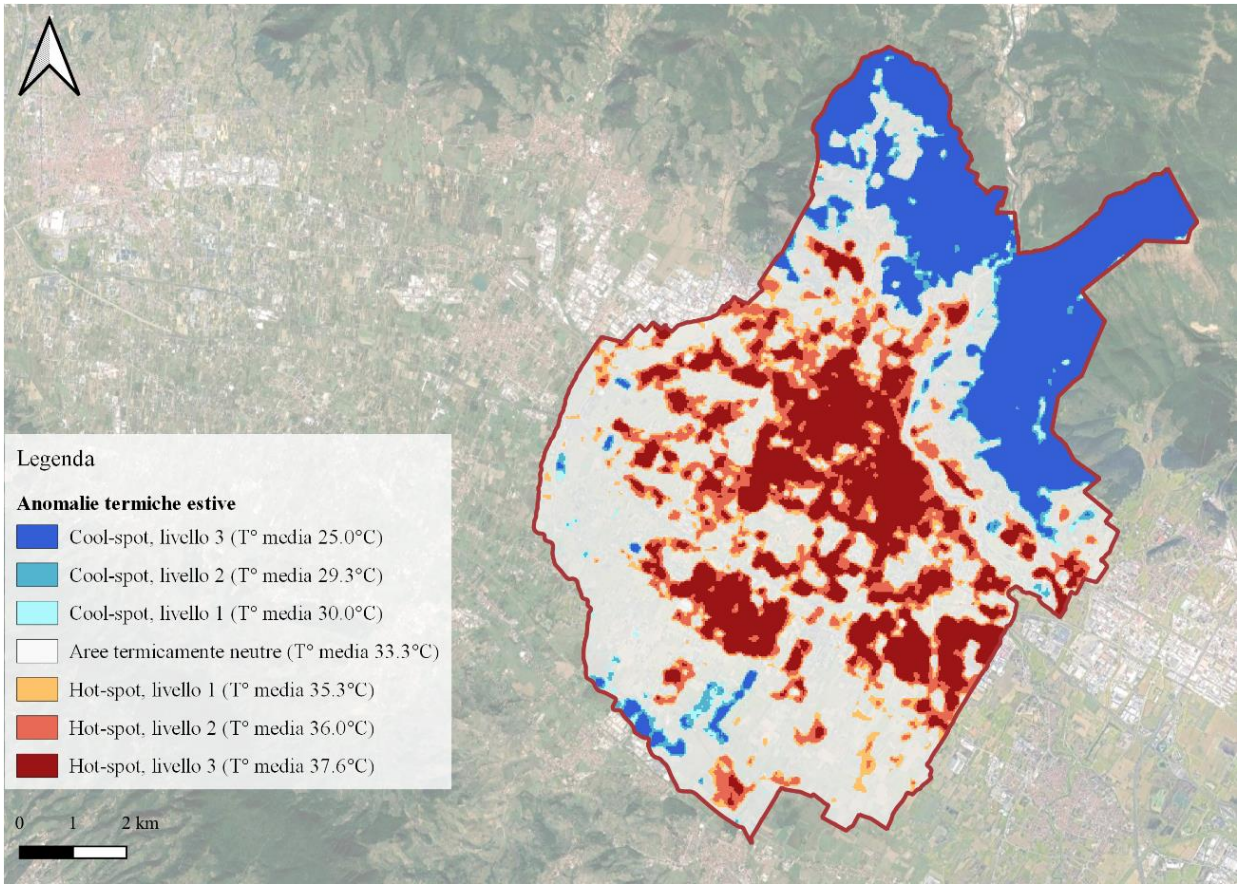


Figura 11. *Mappa del comune di Prato in riferimento alle anomalie termiche superficiali estive*

d. Indice vegetazionale NDVI estivo

L'indice vegetazionale NDVI (*Normalized Difference Vegetation* Index) rappresenta un importante indicatore negli studi volti a indagare gli effetti della vegetazione sul microclima urbano e il fenomeno SUHI (Ma et al., 2016; Guha et al., 2018). NDVI è un indice adimensionale che descrive la differenza tra la riflettanza visibile (RED) e vicina infrarossa (NIR) della copertura vegetale: i calcoli per ciascun pixel restituiscono valori compresi tra -1 e 1, in cui 0 significa assenza di vegetazione e vicino a +1 indica la massima densità possibile di foglie verdi.

La mappa di NDVI è stata ottenuta dalle immagini acquisite dal satellite Sentinel-2A del programma europeo Copernicus (*level-2A*) nel periodo estivo 2015-2021, dotate di una copertura nuvolosa inferiore al 10% e una risoluzione spaziale di 10 m. La formula applicata a ciascun dataset di immagini satellitari è la seguente: NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)

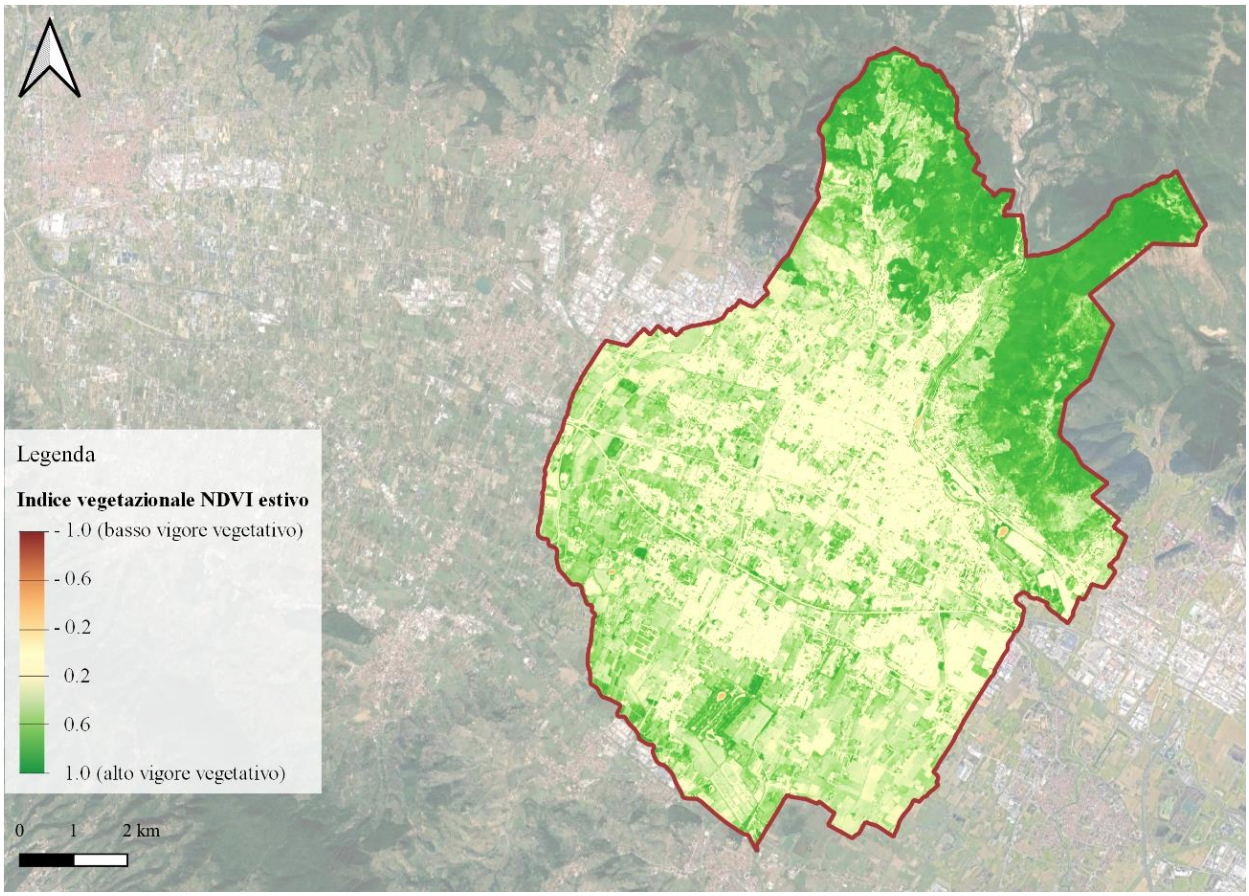


Figura 12. *Mappa del comune di Prato in riferimento all'indice vegetazionale NDVI estivo*

e. Consumo di suolo

L'indice di consumo di suolo ha evidenziato la concentrazione dell'area urbana, e nello specifico la presenza di costruzioni ed edifici, all'interno del comune di Prato. Il layer di suolo consumato è stato fornito dall'Istituto

Nazionale per la Protezione Ambientale e la Ricerca (ISPRA, ww.isprambiente.gov.it), elaborato da dati aperti relativi all'anno 2017 con una risoluzione spaziale di 10 m. È stato ottenuto convertendo il grado di impermeabilità in un prodotto binario tramite la soglia del 30%, secondo una regola specifica: la soglia 0-29% corrisponde alle superfici permeabili (valore = 0), mentre quella compresa tra 30% e 100% rappresenta le superfici impermeabili (valore = 1) (Maucha, Büttner, Kosztra, 2011). Con questo dataset viene indicata la presenza di volumi edilizi, infrastrutture stradali e ferroviarie, aree industriali e commerciali, aree ricreative, cantieri, serre permanenti, aree minerarie, discariche e altre infrastrutture. Ulteriori informazioni sulla metodologia di elaborazione sono disponibili nel report "Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici" di ISPRA (Munafò, 2020) e in recenti pubblicazioni (Morabito et al., 2016; 2018; 2021).

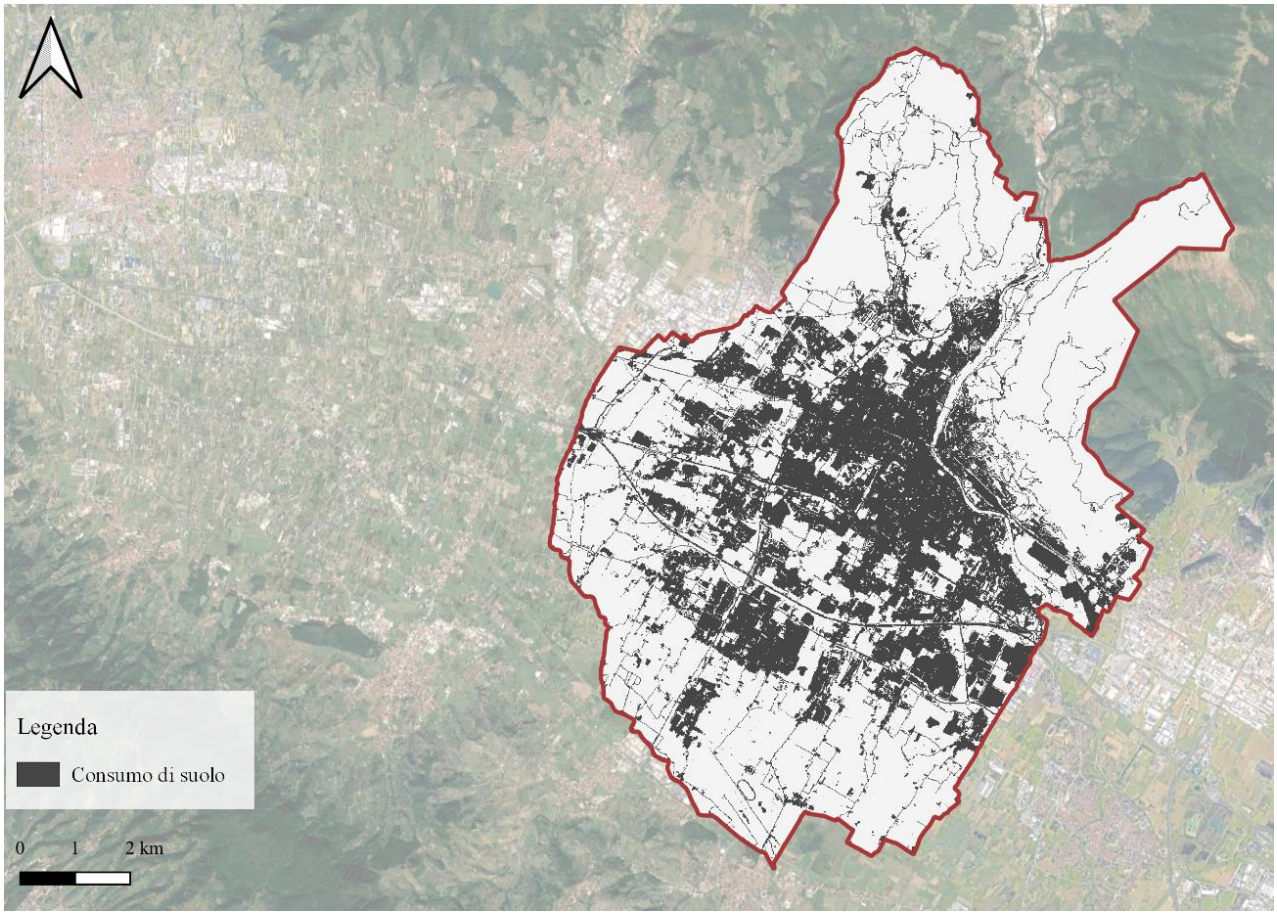


Figura 13. *Mappa del comune di Prato in riferimento al consumo di suolo*

f. Copertura arborea

Il layer della copertura arborea è stato fornito da ISPRA e sviluppato nell'ambito del progetto in corso "ASI Habitat Mapping" che si è occupato di redigere una mappa di copertura del suolo italiano ad alta risoluzione. La copertura arborea è stata mappata dalle immagini acquisite nell'estate del 2017 dai satelliti delle missioni Sentinel-1 e Sentinel-2 del programma europeo Copernicus, elaborate

all'interno della piattaforma Google Earth Engine (Morabito et al., 2021). Il layer finale è un file raster binario in cui i valori 0 e 1 indicano rispettivamente le aree non coperte e coperte da alberature con una risoluzione spaziale di 10 m. Ulteriori specifiche informazioni sulla modalità di elaborazione del dato sono disponibili sulla piattaforma Zenodo (https://zenodo.org/record/3898707#.Xux1vGgzZPY, doi:10.5281/zenodo.3898707).

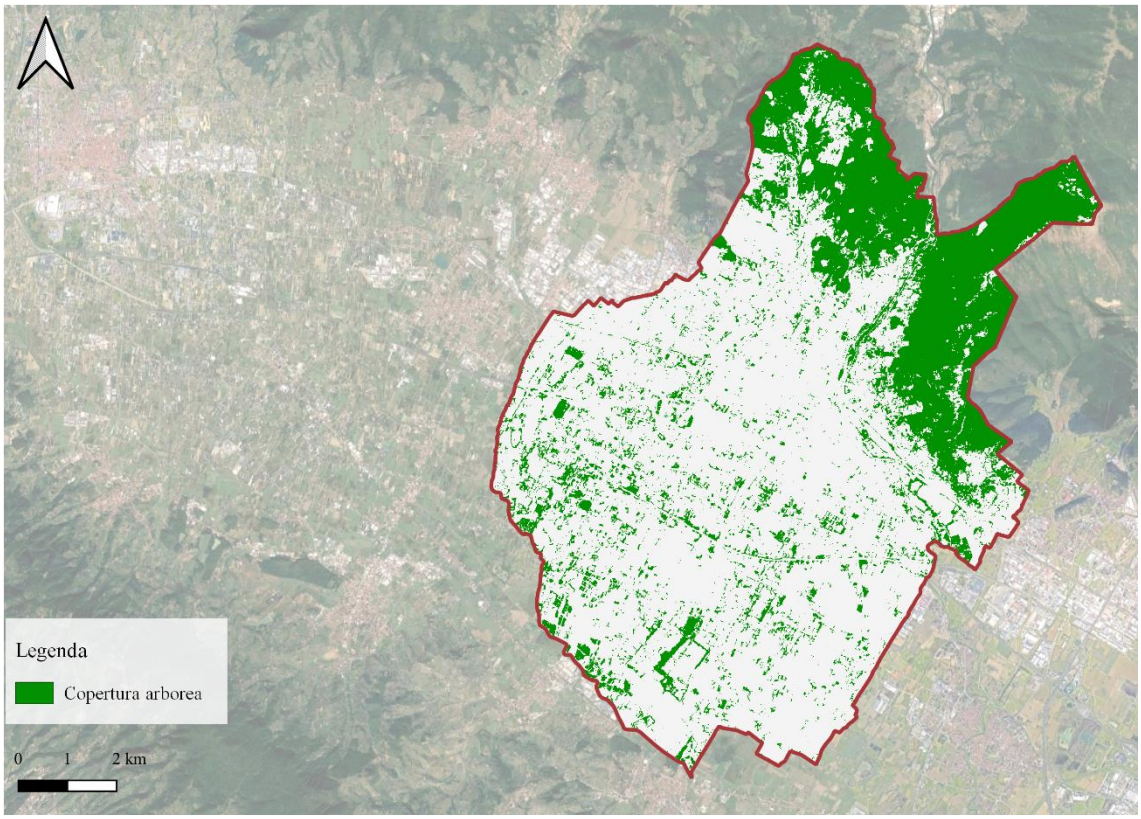


Figura 14. *Mappa del comune di Prato in riferimento alla copertura arborea*

g. Albedo superficiale estivo

L'albedo superficiale quantifica la frazione di luce solare riflessa della superficie terrestre e rappresenta il potere riflettente della stessa. I valori di albedo dipendono da vari parametri, quali il materiale e il colore della superficie, il tipo di suolo e il suo contenuto di acqua (Hatfield et al., 2005).

L'albedo superficiale può rappresentare un importante descrittore del microclima urbano ed è considerato tra i parametri più influenti sul bilancio radiativo della superficie terrestre (Bonafoni e Sekertekin, 2020). L'albedo viene generalmente espresso in un intervallo compreso tra 0 (nessuna riflessione) e 1 (massima riflessione, propria delle superfici bianche). La mappa di albedo è stata ottenuta con una risoluzione spaziale di 10 m dalle scene Sentinel-2 del periodo estivo 2015-2021, utilizzando le bande VNIR (B2, B3, B4, e B8) e SWIR (B11 e B12), seguendo la metodologia applicata in studi recenti (Bonafoni e Sekertekin, 2020; Toscano, 2020).

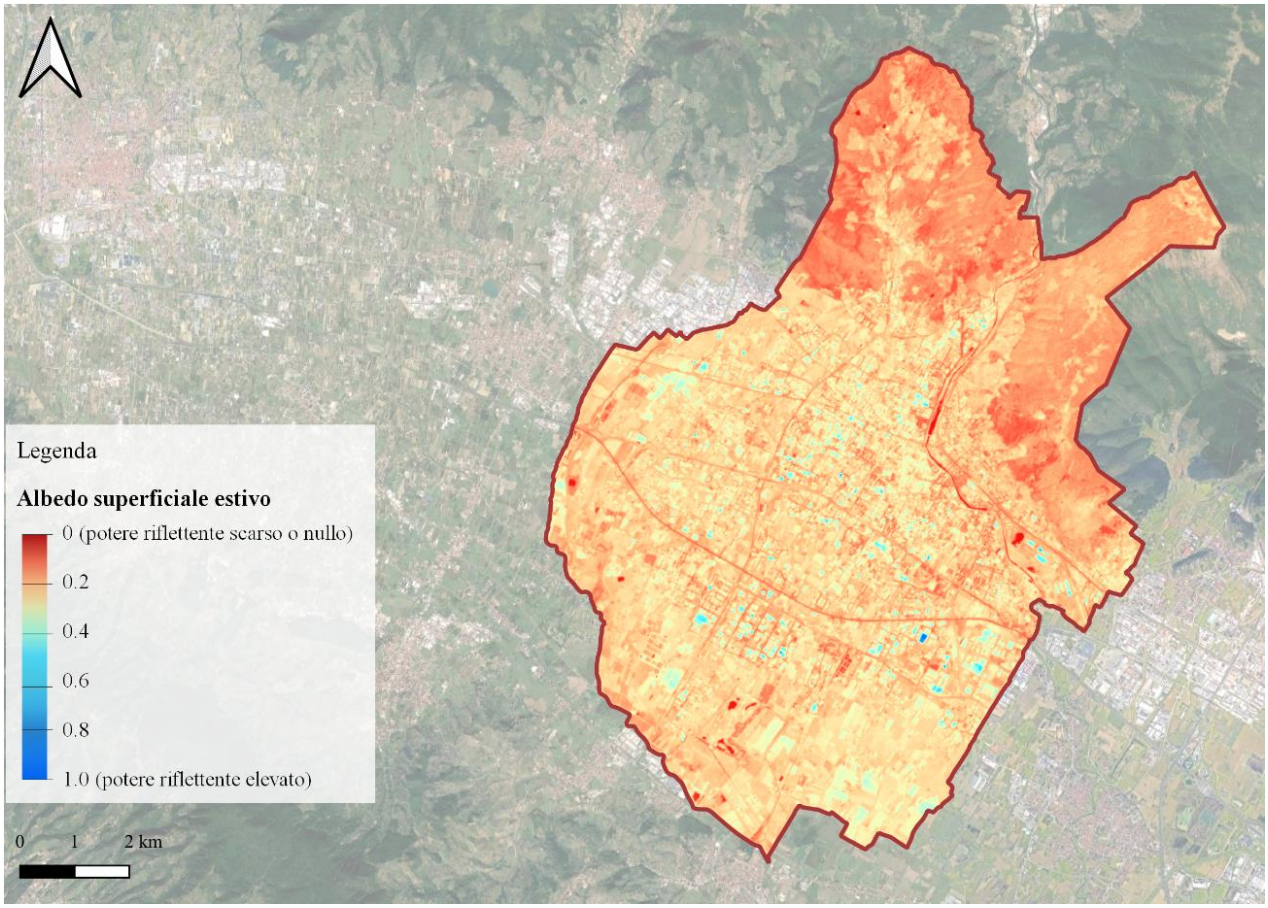


Figura 15. *Mappa del comune di Prato in riferimento all'albedo superficiale estivo*

h. Fattore di ombreggiamento Sky View Factor

Il fattore di vista del cielo o *Sky View Factor* (SVF) è un parametro adimensionale che restituisce, con valori compresi tra 0 e 1, il grado di esposizione di una superficie alla volta celeste, ovvero la porzione di cielo visibile da un determinato punto localizzato al livello del terreno (Oke, 1981).

Tale fattore è influenzato dalle componenti del tessuto urbano, dagli elementi di arredo stradale e dalla presenza o meno di alberi: valori prossimi a 1 corrispondono ad un'ampia porzione visibile, mentre valori vicini allo 0 indicano una visione del cielo limitata. SVF svolge un ruolo importante nella descrizione delle proprietà radiative urbane: quanto maggiore è il suo valore, tanto maggiore è l'incidenza della radiazione solare diretta (Jiao et al., 2019). SVF è stato calcolato dal *Digital Surface Model* (DSM), ottenuti dai rilievi LIDAR della Regione Toscana (degli anni 2007 e 2017) con risoluzione spaziale 1 m.

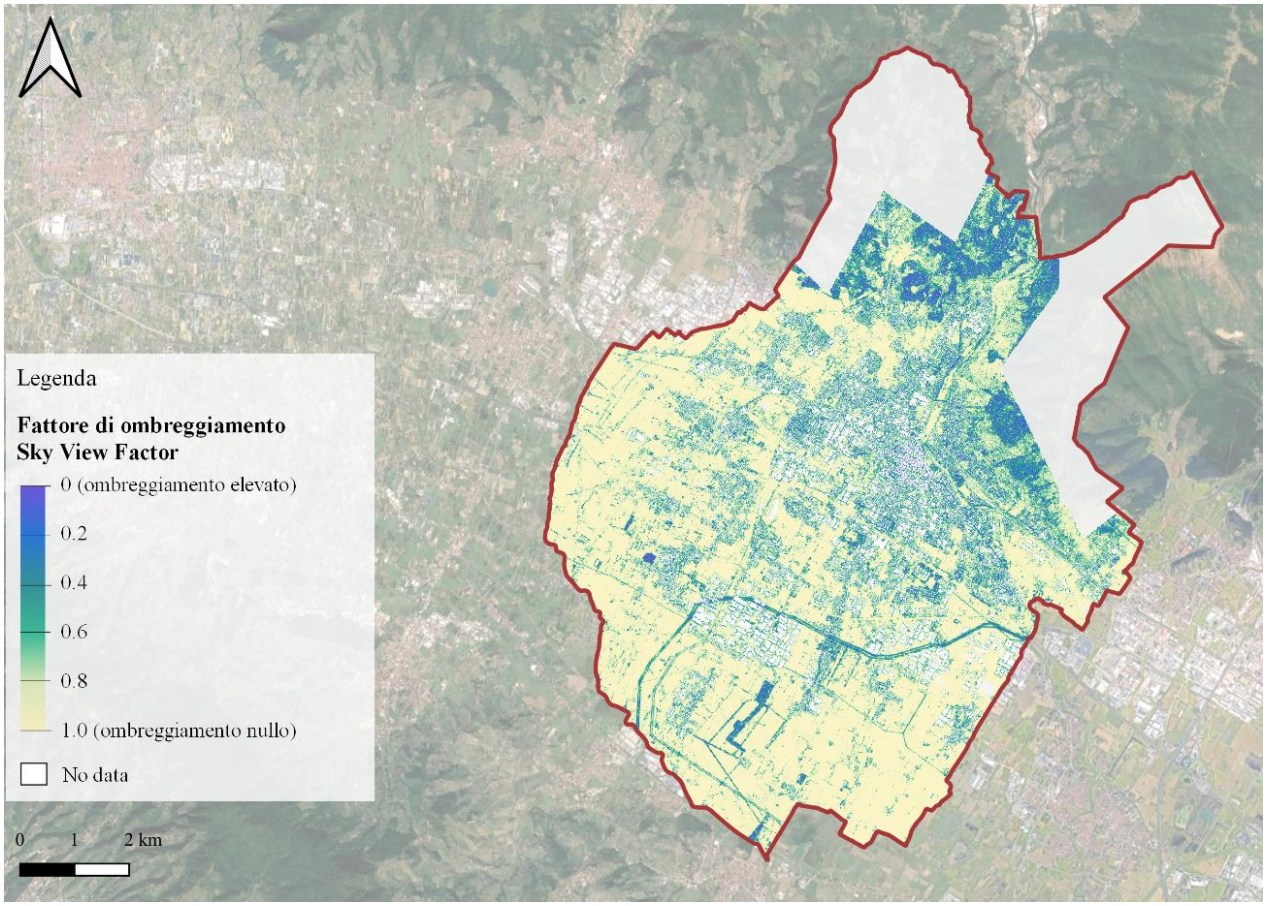


Figura 16. *Mappa del comune di Prato in riferimento al fattore di ombreggiamento Sky View Factor*

Estrazione delle caratteristiche urbane in ciascuna area di hot- e cool-spot.

Classi	Suolo consumato (ha) [%]*	Copertura arborea (ha) [%]*	NDVI medio	Albedo medio	SVF medio
Cool-spot, livello 3	65.6 [3.5]	1750.7 [93.5]	0.66	0.16	-
Cool-spot, livello 2	17.0 [7.6]	113.6 [50.8]	0.59	0.18	-
Cool-spot, livello 1	13.3 [9.9]	55.5 [41.2]	0.56	0.18	-
Aree termicamente neutre	857.5 [19.7]	702.8 [16.2]	0.45	0.21	0.82
Hot-spot, livello 1	263.1 [45.1]	29.7 [5.1]	0.33	0.22	0.77
Hot-spot, livello 2	653.8 [64.5]	32.5 [3.2]	0.28	0.23	0.76
Hot-spot, livello 3	1388.5 [87.4]	14.1 [0.9]	0.16	0.25	0.72

Tabella 6. *Caratteristiche urbane in ciascuna area di hot- e cool-spot. *L'area % è riferita alla superficie del layer (suolo consumato o copertura arborea) rispetto all'area del relativo livello di hot- o cool-spot.*

Il livello estremo di hot-spot (livello 3) è caratterizzato dalle distribuzioni più elevate di consumo di suolo (87.4%) e più basse di copertura arborea (0.9%), bassi valori di indice vegetazionale NDVI (0.16) e albedo superficiale (0.25), caratteristici delle aree impermeabili con alta capacità di accumulo termico (Bartesaghi et

al., 2019). Il livello estremo di cool-spot (livello 3) risulta interessato da elevate soglie di copertura arborea (93.5%), di indice vegetazionale NDVI (0.66) e da basse concentrazioni di suolo consumato (3.5%). Il fattore di ombreggiamento non può essere considerato in relazione alle aree di cool-spot in quanto il layer non assicura una copertura completa per tali aree (dato Lidar mancante). Considerando le aree hot-spot, valori medi di SVF compresi tra 0.72 e 0.77 indicano la prevalenza di spazi aperti e semi-aperti, risultando quindi particolarmente esposti alla radiazione solare (Svenson, 2004; Baghaeipoor and Nashrollani, 2019).

3.1.4. Mappa di vulnerabilità termica durante un'ondata di calore

Come definito e riportato nell'analisi effettuata nel capitolo 3.1.2 le ondate di calore sono sempre più frequenti e sta incrementando la loro durata. Diventa quindi necessario ottenere informazioni non solo sulla temperatura superficiale della città, ma anche sulla temperatura dell'aria che è quella che contribuisce principalmente al disagio termico e che può provocare danni specialmente alle fasce più fragili della popolazione. In questo paragrafo verrà definito l'indice UHTI (Urban Heatwave Thermal Index), ovvero un indice in grado di quantificare e mappare la variabilità termica dell'aria in ambiente urbano durante un'ondata di calore. Lo scopo è quindi quello di dare informazioni sul microclima in termini termici (di temperatura dell'aria e non di temperatura superficiale) dell'intera area comunale al fine di identificare quali sono le zone più esposte durante un'ondata di calore. Questo servirà poi a definire la fragilità, in termini di indice di comfort termico, per valutare in quali aree la popolazione risente maggiormente un disagio termico.

Il LST è uno dei prodotti satellitari oggigiorno più comunemente utilizzati per monitorare la temperatura superficiale e ricavare indicatori di benessere per la popolazione. L'indice LST registra la temperatura superficiale del terreno e può differire in maniera più o meno sostanziale da quella effettivamente percepita dalle persone. La temperatura percepita dipende d'altro canto in larga misura dalla temperatura dell'aria e l'indice UHTI fornisce, a partire da dati telerilevati integrati con misure di centraline termiche e output del modello ENVI-met, una misura più vicina, rispetto a quella dell'LST, riguardo alla percezione fisiologica dell'ondata di calore.

Gli strati satellitari descritti nel paragrafo precedente sono stati utilizzati come input per avere una caratterizzazione termica dell'intera area comunale attraverso una metodologia calibrata in sito che tiene conto delle caratteristiche del tessuto urbano, dei materiali e della vegetazione presenti nella città di Prato. Il modello utilizzato utilizza in input i tre seguenti strati informativi telerilevati:

- LST estivo 2015-2021 (riportato in figura 9) (ris. spaziale = 30 m)
- NDVI estivo 2015-2021 (riportato in figura 12) (ris. spaziale = 10 m)
- Sky View Factor (riportato in figura 15) (ris. spaziale = 1 m)

Gli strati di input sono stati ricampionati a una risoluzione spaziale di 10 m e alcune zone all'interno dei limiti amministrativi comunali sono state escluse in quanto non sono disponibili i dati Lidar utilizzati per la determinazione dello Sky View Factor; si tratta comunque di area collinare impervia scarsamente abitata che non influenza l'analisi a scala urbana (Figura 17).

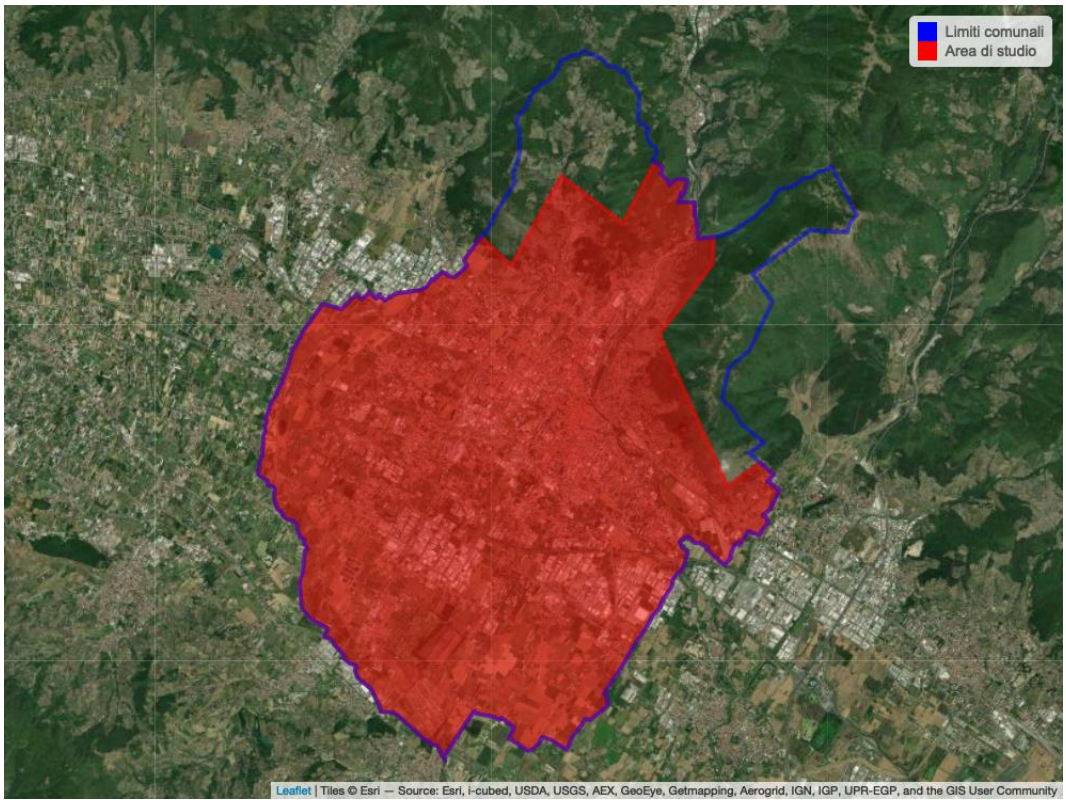


Figura 17. *Area di studio relativa al comune di Prato.*

L'indice NDVI è stato utilizzato per ricavare la mappa di copertura vegetale del territorio (Figura 17). La copertura vegetale, espressa in percentuale, è stata calcolata a partire dall'NDVI medio del 2017 ricavato da immagini Sentinel 2 utilizzando l'indice Vegetation Fraction Cover (VFC, Gao et al. 2020). Il VFC è un parametro biofisico significativo degli ecosistemi terrestri ed è comunemente utilizzato come indicatore per il monitoraggio e la valutazione delle variazioni della vegetazione (Li et al., 2014). Tale indice è stato calcolato usando la seguente equazione:

$$VFC = \frac{NDVI - NDVI_S}{NDVI_v - NDVI_S} \qquad [1]$$

Dove $NDVI_s$ e $NDVI_v$ sono rispettivamente il valore di riferimento di NDVI di suolo nudo (0.1) e vegetazione verde (0.9).

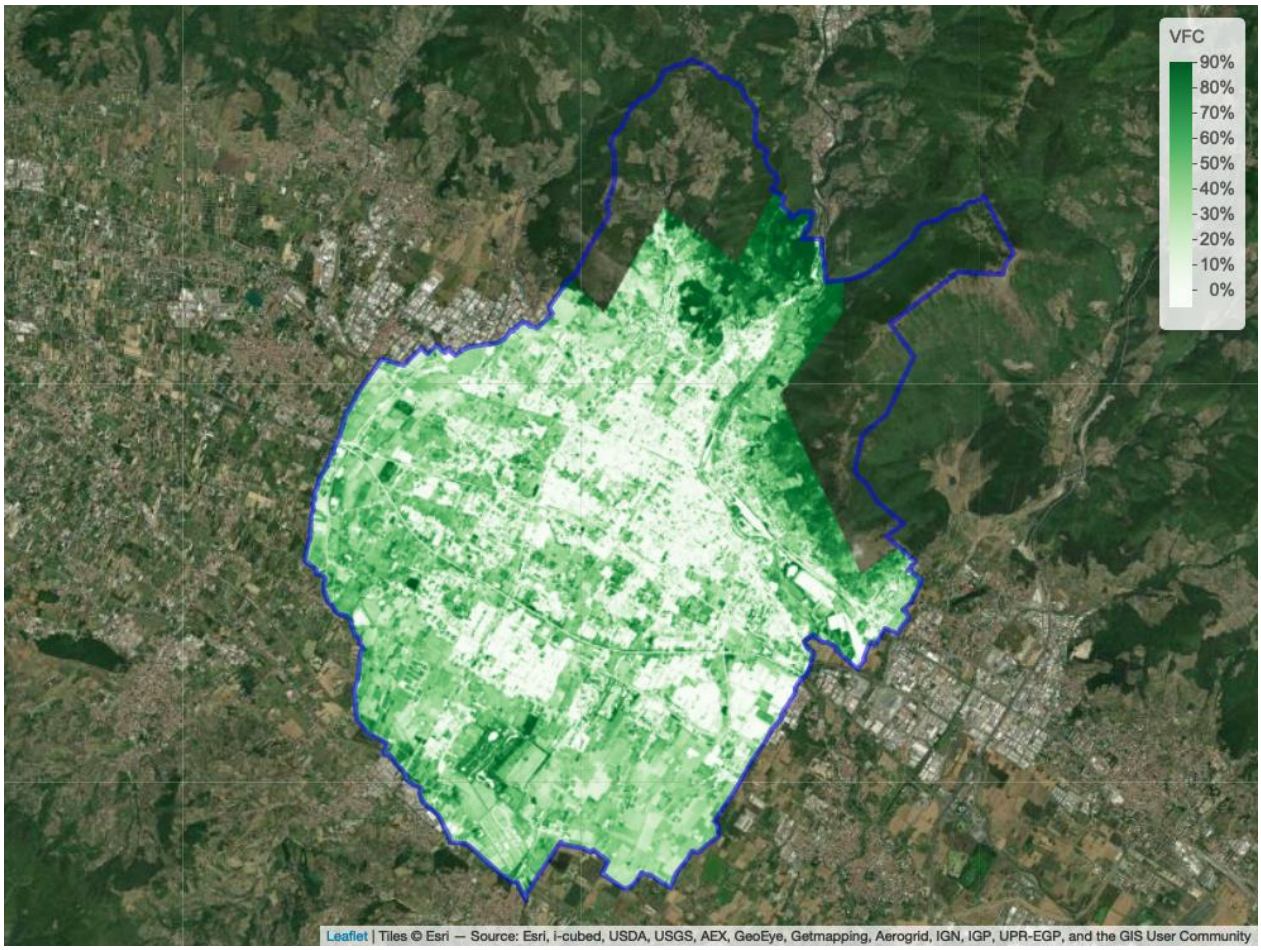


Figura 18. *Mappa di copertura vegetale del territorio (espressa in percentuale) calcolata tramite l'indice VFC.*

La disposizione ed il numero di stazioni meteorologiche sul territorio di Prato non sono adeguati per la determinazione della relazione fra temperatura dell'aria e indice VFC; è stata quindi utilizzata la relazione ottenuta in uno studio analogo per il Comune di Bologna (Figura 19). Considerato che la relazione fra LST e temperatura dell'aria è praticamente analoga per i due Comuni (equazione 3), tale assunzione è ritenuta accettabile.

$$T_{VFC} = -2.49VFC + 25.79 \qquad [2]$$

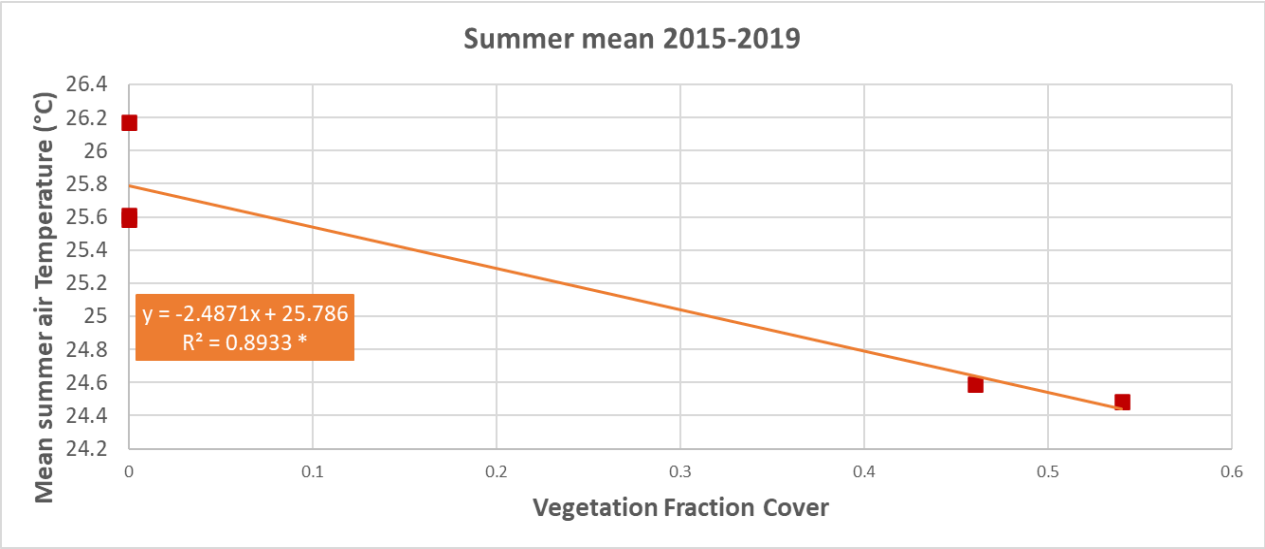


Figura 19. *Relazione tra la temperatura dell'aria media estiva in diversi punti della città di Bologna e l'indice VFC ottenuto dall'equazione [1] (*pvalue<0.05).*

Applicando quindi l'equazione 2 è stata ricavata una mappa con i valori della temperatura dell'aria ottenuti dai valori dell'indice di frazione di vegetazione (Figura 20).

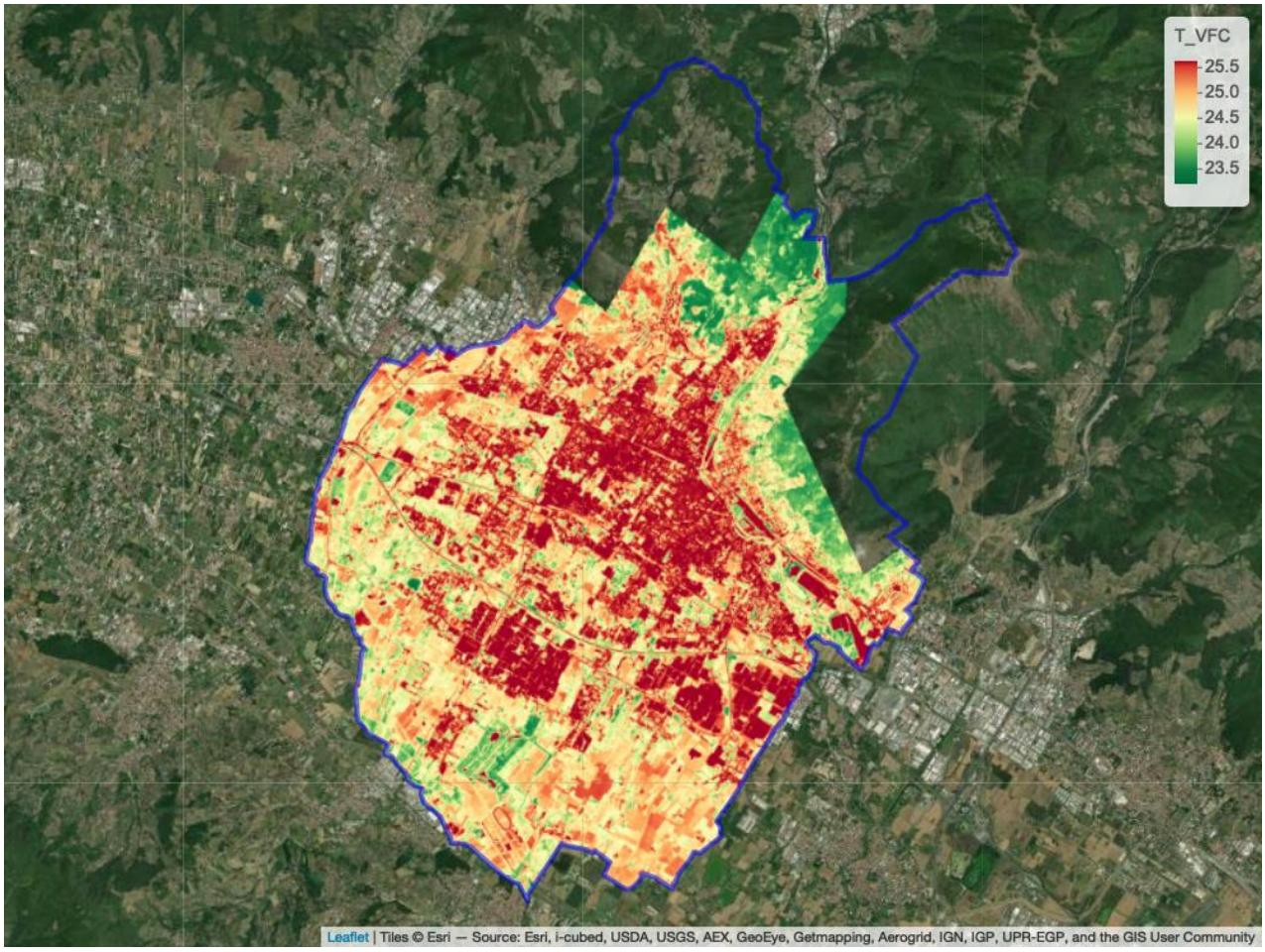


Figura 20. *T_{VFC} per l'area di studio.*

La mappa mostra chiaramente come i valori di temperatura dell'aria maggiori si ottengano nelle zone prive di vegetazione: questa relazione mette in evidenza non solo l'influenza della presenza di vegetazione sulla temperatura dell'aria, ma anche della sua stessa composizione. L'effetto mitigatore della vegetazione, come auspicato, è infatti maggiore in zone caratterizzate da copertura arborea (boschi e parchi) e più contenuta per aree a copertura erbacea (coltivazioni e prati).

Per la relazione fra LST e temperatura dell'aria, sono stati utilizzati i dati di temperatura dell'aria corrispondenti allo stesso giorno e ora delle singole scene Landsat 8 del periodo 2015-2020 (elencate in tabella 3) utilizzate per il calcolo dell'LST. Questi dati di temperatura dell'aria sono stati poi messi in relazione con i valori di LST estratti per i pixel corrispondenti alla posizione della stazione meteorologica. La relazione ottenuta è riportata in Figura 21: il coefficiente di determinazione non è particolarmente alto (R^2=0.43) a causa della dispersione dei dati, ma risulta comunque significativo (pvalue<0.05) ed accettabile per i fini di questa parametrizzazione.

In generale la temperatura dell'aria non è direttamente calcolabile dalla temperatura superficiale a causa dei moti di avvezione che si creano nel primo strato di atmosfera e che già dai primi metri di altezza influenzano il valore della temperatura dell'aria. Questa analisi però è effettuata durante un'ondata di calore meteorologica, quando la temperatura dell'aria registrata è maggiore di 30 °C: questo fa sì che il moto convettivo verticale predomini rispetto all'influenza del vento trasversale, che in questi casi è comunque basso.

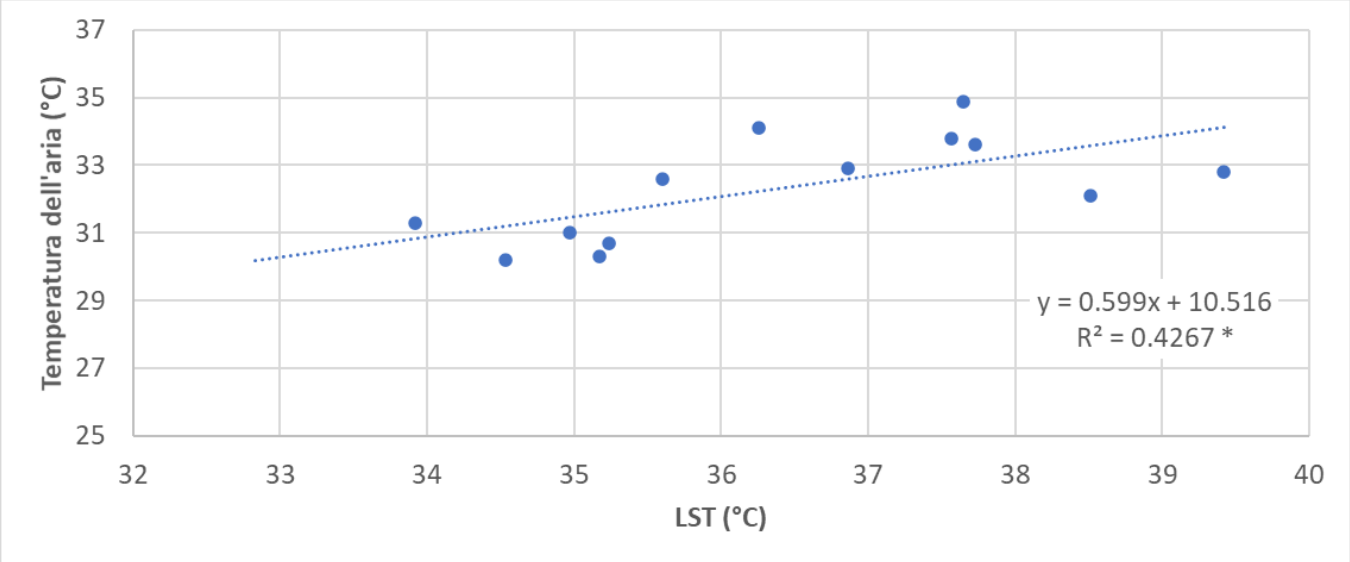


Figura 21. *relazione tra la temperatura dell'aria della stazione meteorologica Prato_Urban e i valori di LST ottenuti dalle immagini Landsat 8 (*pvalue<0.05).*

Si ottiene quindi la seguente relazione:

$$T_{LST}=0.599\ (LST)+10.516 \qquad [3]$$

Tale relazione è stata utilizzata per la determinazione della temperatura dell'aria ottenuta dai valori della temperatura superficiale rilevati da satellite (Figura 22).

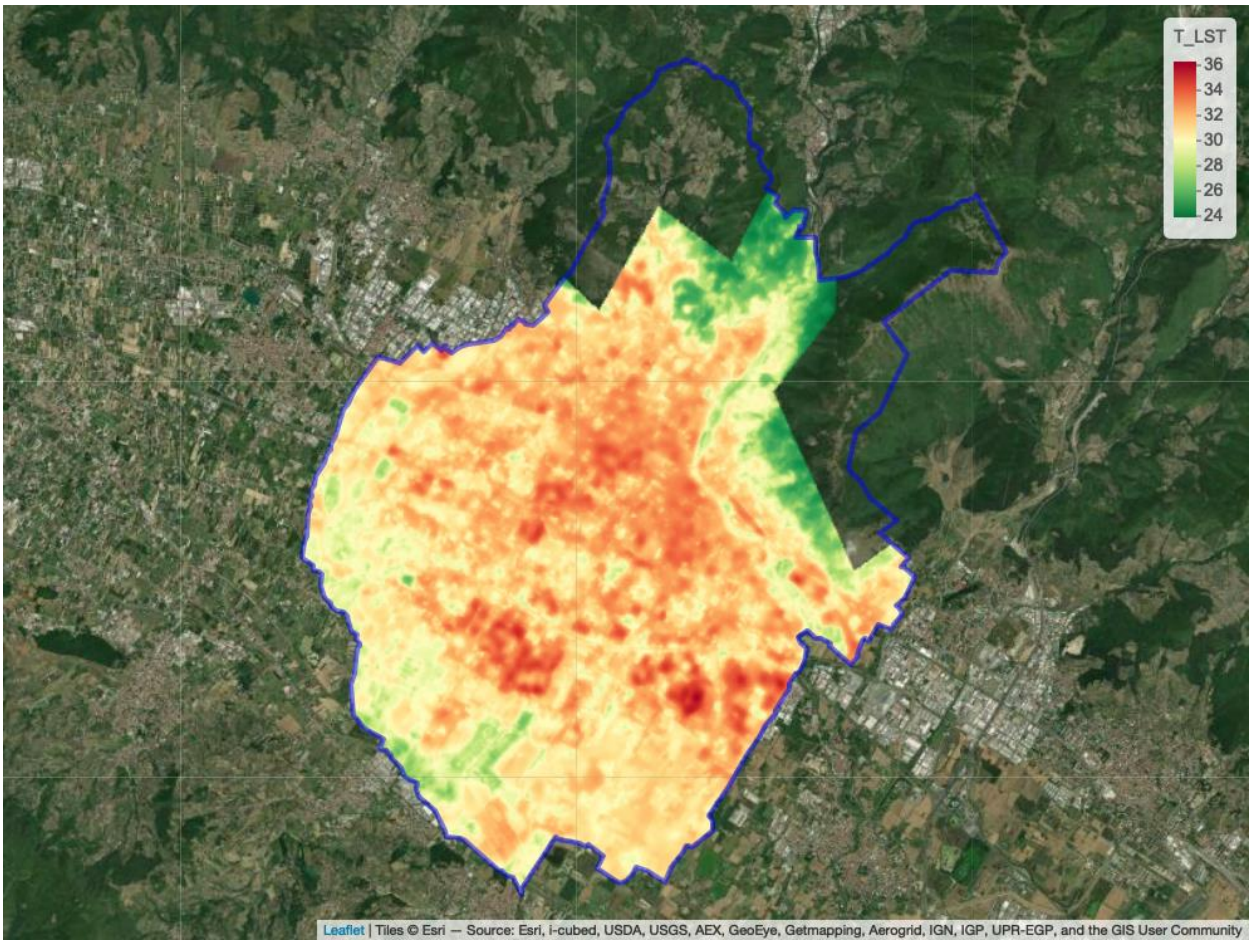


Figura 22. *T_{LST} per l'area di studio.*

In questo caso la temperatura dell'aria risente fortemente della tipologia dei materiali (dei tetti e delle superfici) che il satellite registra da remoto dando valori maggiori di LST sulle superfici di asfalto o cemento che, essendo caratterizzati da un basso albedo superficiale, riflettono solo una bassa percentuale della radiazione solare che li colpisce.

Per quanto riguarda lo Sky View Factor (SVF) esistono diverse parametrizzazioni che riportano come la temperatura dell'aria varia al variare di questo parametro: Oke (1981) ha parametrizzato con una relazione inversa il variare della temperatura dell'aria notturna in funzione dello SVF. Durante il giorno, al contrario, l'effetto di ombreggiamento che hanno gli edifici in un canyon urbano stretto

(SVF basso) causa una diminuzione della temperatura dell'aria. Attraverso le simulazioni fluidodinamiche effettuate con il modello ENVI-met (Par. 3.3) sulle tre aree della città di Prato è stato estratto il valore di SVF calcolato dal modello e messo in relazione con la temperatura dell'aria a 1.8 m di altezza alle ore 12:00.

In Figura 23 è riportato il valore medio di temperatura dell'aria per intervalli di 0.1 di SVF: la relazione tra le due variabili è di proporzionalità diretta e la relazione ottenuta è stata quindi utilizzata per calcolare la temperatura dell'aria per tutto il comune di Prato partendo dallo strato inziale SVF (Lidar):

$$T_{SVF} = 2.33(SVF)+35.09 \qquad [4]$$



Figura 23. *Relazione tra la media della temperatura dell'aria a 1.8 m alle ore 12:00 ottenuta dal modello ENVI-met per intervalli di 0.1 dello SVF (**pvalue<0.01)*

L'equazione 4 è stata quindi utilizzata per ricavare lo strato informativo T_{SVF} (Figura 24).

In questo caso le aree i cui valori di temperatura dell'aria sono maggiormente influenzati dall'SVF sono quelle aperte, ovvero campi agricoli o parchi, in quanto nella parte urbana altamente densa di edifici si ha un effetto ombra che provoca un abbassamento della temperatura dell'aria.

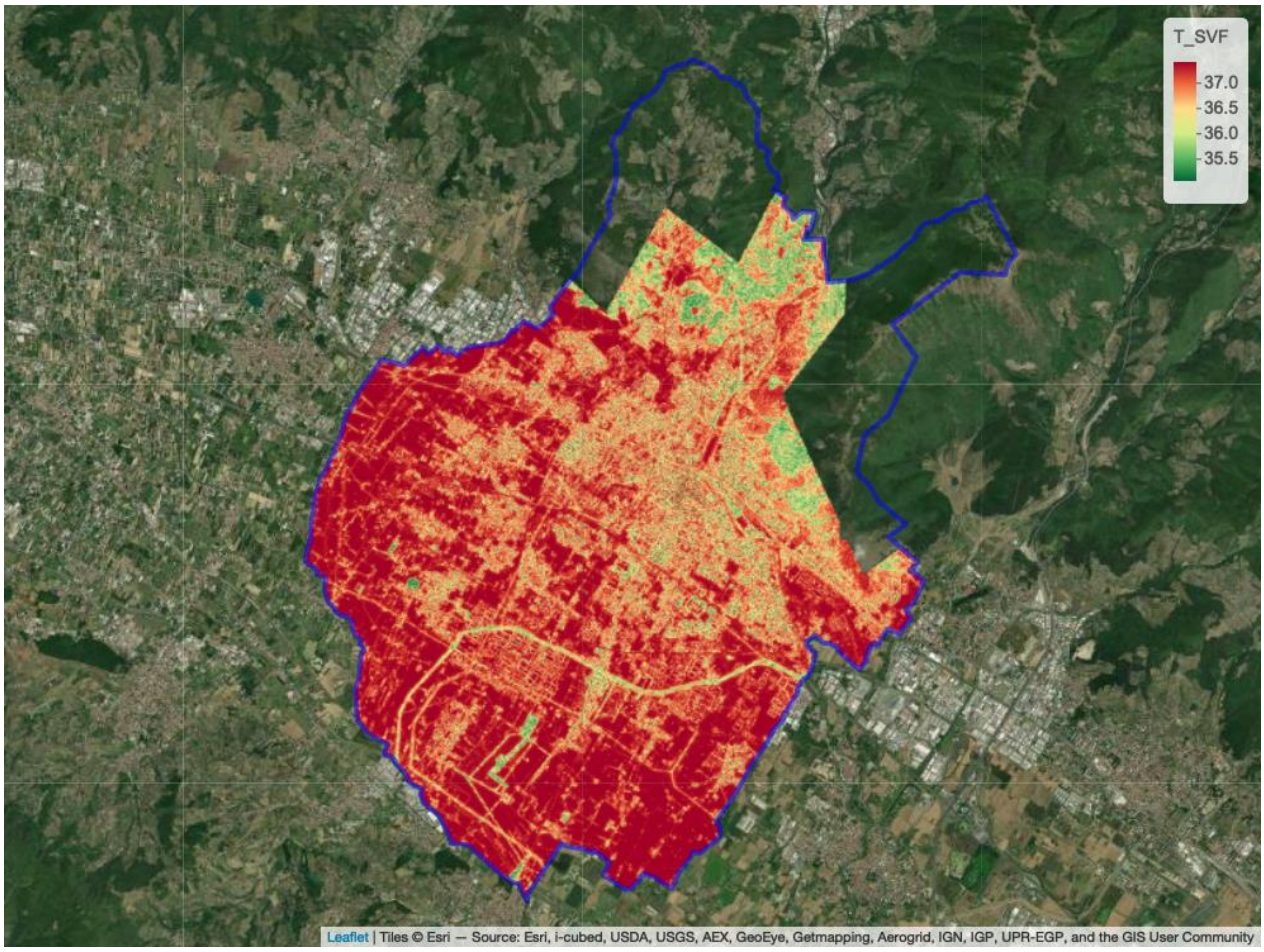


Figura 24. *T_{SVF} per l'area di studio.*

Indice UHTI (Urban Heatwave Thermal Index)

Il peso di ogni variabile di input, al fine di ottenere una mappa termica relativa alla temperatura dell'aria sul territorio comunale, è stato preso in considerazione sommando tramite combinazione lineare i layer precedentemente ottenuti (T_{LST}, T_{VFC}, T_{SVF}) e successiva normalizzazione a valori compresi tra 0 e 1 tramite trasformazione lineare crescente.

La mappa dell'indice UHTI è riportata in Figura 25: si può immediatamente notare che il tessuto urbano in termini di densità dell'edificato viene ben rappresentato, anche se l'influenza dei materiali evidenzia zone di maggior criticità nelle aree produttive e industriali del Comune. Il centro storico, seppur altamente esposto, risulta comunque meno "caldo" durante il giorno grazie all'effetto ombreggiamento che è stato rappresentato introducendo la parametrizzazione dello sky view factor.

In figura 26 è riportata la stessa mappa UHTI discretizzata tramite classificazione "equal-interval" al fine di fornire una lettura facilitata delle aree con valore di indice termico (alto, medio alto, medio, medio basso e basso).

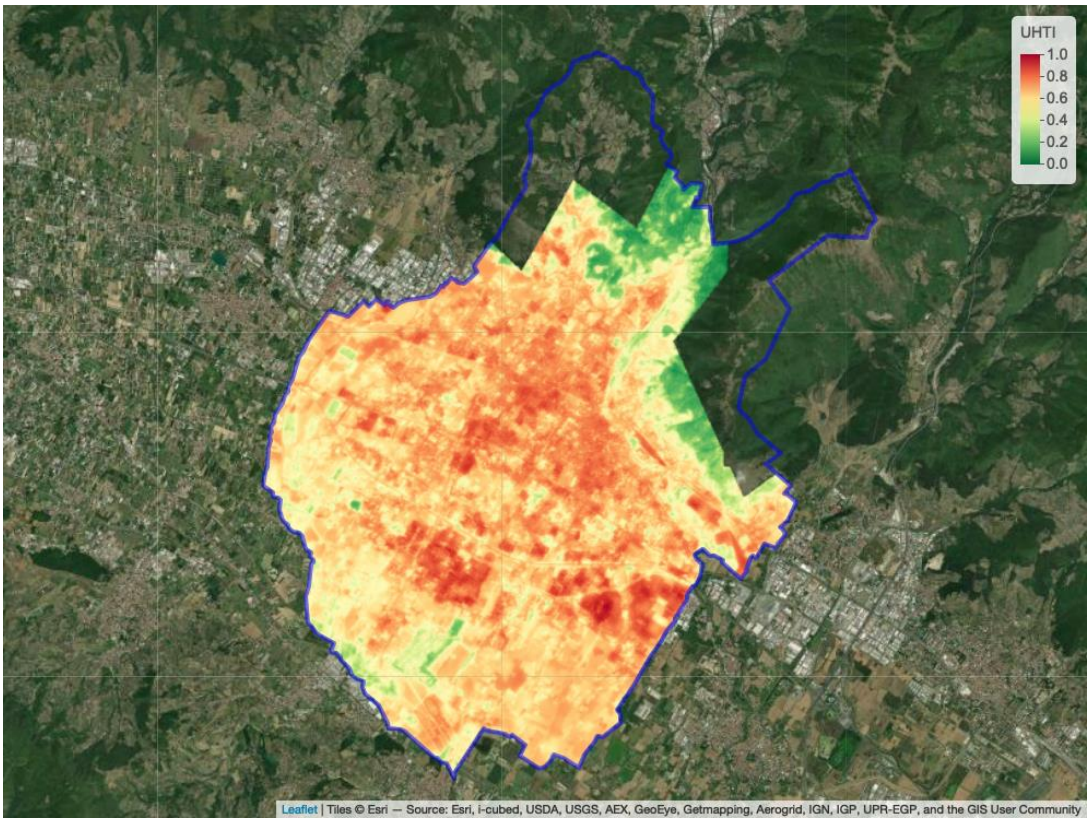


Figura 25. *Mappa UHTI dell'area di studio.*

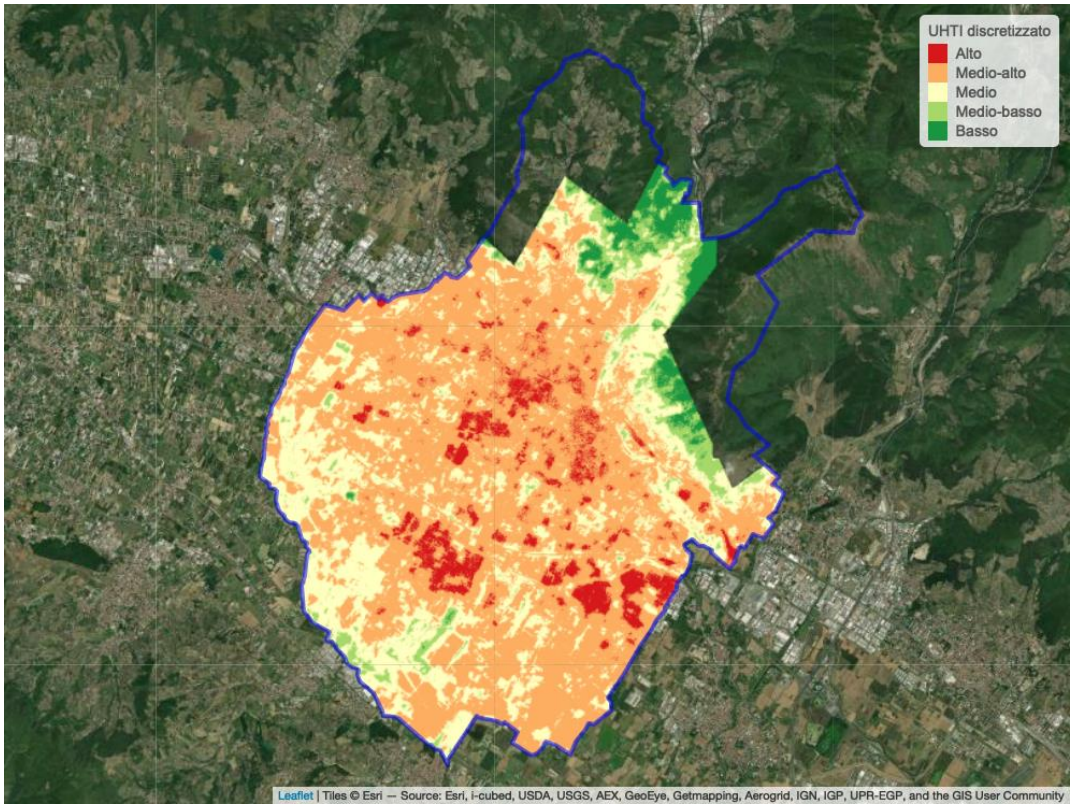


Figura 26. *Mappa UHTI dell'area di studio discretizzata.*

Per comprendere meglio come ogni singola variabile pesa sul calcolo finale di questo indice, il contributo percentuale dei tre layer T_{LST}, T_{VFC}, T_{SVF} per l'indice UHTI è indicato in Figura 27.

Il contributo maggiore è dato dal parametro SVF (40-45%) a dimostrazione di come sia fondamentale la morfologia dell'ambiente urbano (in termini di densità, altezza degli edifici e larghezze strade) per la determinazione del microclima locale. La copertura vegetale pesa per un 25% anche per la sua scarsa presenza in ambiente urbano, da tenerne conto se si vuole intervenire per mitigare l'effetto di un'ondata di calore. Le superfici in termini di LST pesano intorno al 30-35% e indicano altre strategie di intervento al fine di farlo pesare meno in questo caso.

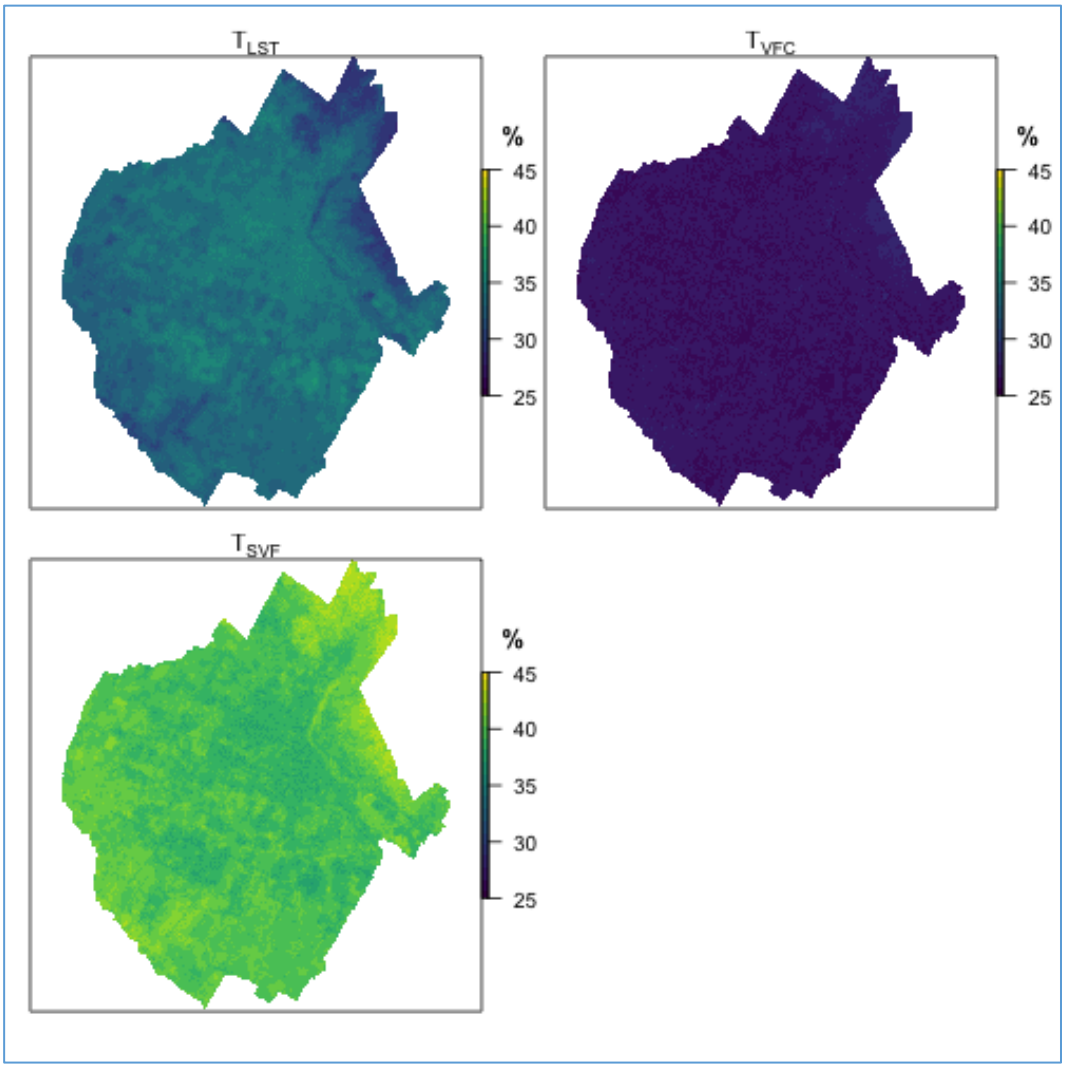


Figura 27. *Contributo percentuale dei layer T_{LST} e T_{VFC} e T_{SVF} al calcolo dell'indice UHTI.*

Correlazione fra UHTI e cool/hot spot

Come già evidenziato, il LST è uno dei prodotti satellitari più comunemente utilizzati per monitorare la temperatura superficiale ma l'indice UHTI fornisce, a partire da dati telerilevati, una misura più vicina, rispetto a quella dell'LST, riguardo alla percezione dell'ondata di calore.

Risulta quindi interessante andare a investigare quale è il grado di relazione fra UHTI e LST e dove questa relazione, a livello spaziale, è più o meno marcata. La relazione fra UHTI e LST è stata studiata per le aree di cool/hotspot (44648 pixel, corrispondenti al 49.6 % dell'area di studio) precedentemente individuate usando la metodologia di Guerri et al. (2021). Lo scopo dell'analisi è quello di verificare il grado di correlazione fra i due strati informativi e di individuare le aree dove tali correlazioni sono più deboli in quanto è lì che l'indice UHTI ha un vero valore aggiunto al fine della caratterizzazione della temperatura dell'aria in una ottica di benessere umano. A questo scopo sono stati usati due approcci, uno tramite regressione lineare, l'altro tramite una correlazione locale utilizzando tecniche a finestra mobile. Viste le differenti risoluzioni geometriche, l'indice UHTI è stato prima ricampionato a 30m come lo strato informativo LST.

Il modello di regressione lineare (Figura 28) è caratterizzato da un coefficiente di determinazione (R^2=0.96) molto alto ed altamente significativo; risultato analogo si è ottenuto per il coefficiente di correlazione di Pearson (0.978***). Va considerato che, lavorando solo sulle aree di cool/hot spot, i valori intermedi di LST non sono stati considerati nella relazione. La correlazione fra i due layer è abbastanza prevedibile visto che LST è uno dei tre layer di partenza da cui si ricava l'indice UHTI anche se non l'unico.

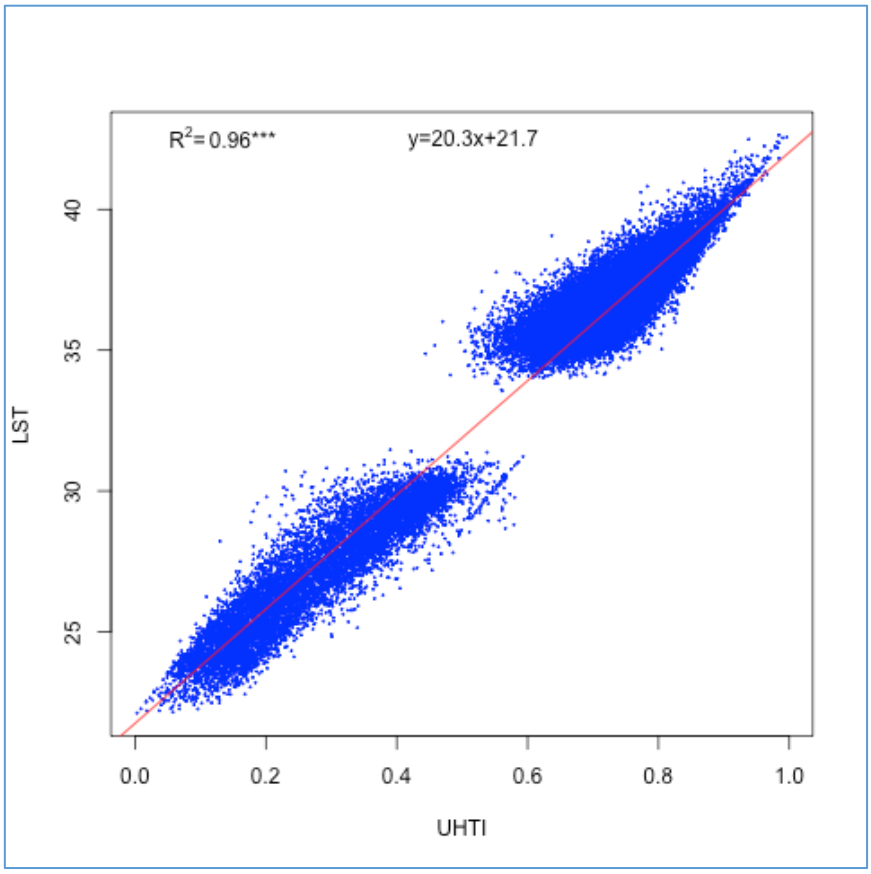


Figura 28. *Relazione lineare fra UHTI e LST.*

Si è quindi cercato di individuare dove la relazione fra LST e UHTI fosse meno marcata; queste aree rappresentano le zone dove vi è una differenza fra la temperatura superficiale telerilevata e quella dell'aria predetta tramite l'indice UHTI. A tal fine sono stati mappati i residui del modello di regressione lineare semplice; essi sono la differenza tra i dati osservati della variabile dipendente y ed i valori previsti dal modello ($\bar{y}$) secondo la seguente equazione:

$$\text{Residuals} = y - \bar{y} \qquad [5]$$

Successivamente sono stati identificati gli outlayer (figura 29), cioè i pixel dove i residui standardizzati sono fuori dall'intervallo di confidenza al 95% e che quindi non vengono adeguatamente spiegati dal modello di regressione lineare. Nella mappa di figura 28 gli outlayer sono rappresentati in rosso; è interessante notare come gli outlayer si trovano prevalentemente nell'area del centro, ciò è presumibilmente dovuto al fatto che LST registra i valori dei tetti (che ovviamente scaldano molto) mentre invece nei canyon delle vie strette del centro in realtà la temperatura è più bassa a causa dello SVF che di giorno abbassa la temperatura grazie all'effetto ombreggiamento. Questo fa si che in quelle aree la relazione fra UHTI e LST risulta essere più debole.

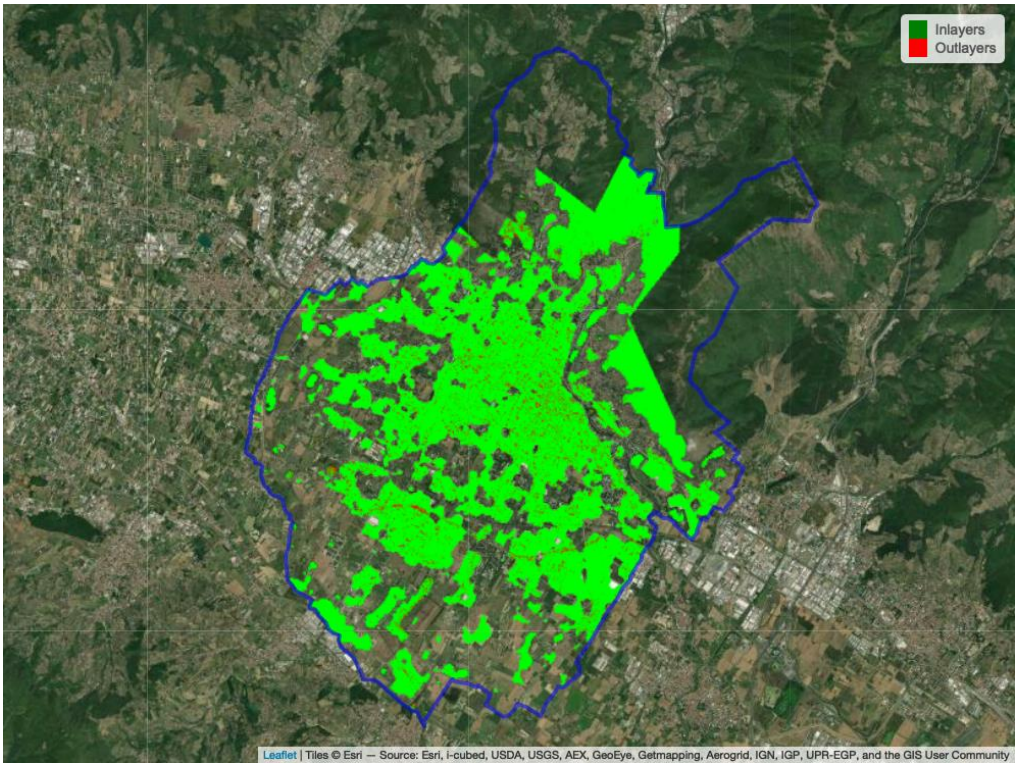


***Figura 29**. Mappa delle aree che presentano residui standardizzati entro il livello di confidenza (verdi) e fuori (rossi).*

Il secondo approccio utilizzato è consistito nell'implementazione di un'analisi di correlazione di Pearson localizzata tramite uso di una finestra mobile di dimensione 9*9 pixel. In figura 30 viene mostrata la mappa ricavata da tale analisi. Ciò che è più interessante notare sono i pixel blu, che rappresentano i pixel per i quali non vi è una correlazione statisticamente significativa (pvalue>0.05) fra i layer LST e UHTI; si può apprezzare come essi siano particolarmente presenti nelle aree del centro e in altre aree del centro abitato caratterizzate da un fitto tessuto urbano, confermando quindi quanto emerso con il primo approccio utilizzato.

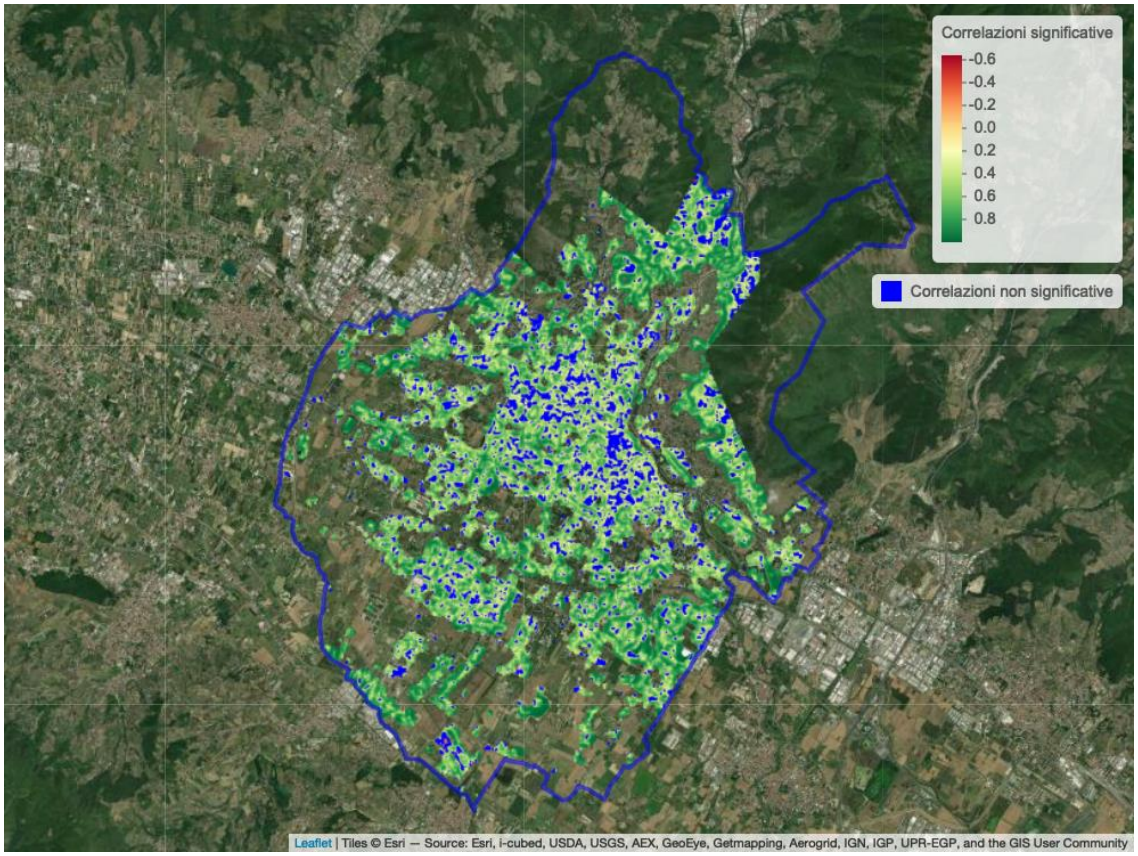


Figura 30. *Mappa delle correlazioni localizzate tramite uso di finestra mobile di 9*9 pixel.*

I risultati ottenuti mostrano, che in prima analisi, per ottenere le aree di hot e cool spot di un'area urbana, può essere sufficiente considerare la temperatura superficiale (LST) al fine di fornire informazioni alle pubbliche amministrazioni di quali sono le aree che maggiormente si scaldano durante un'ondata di calore; l'indice UHTI, d'altra parte, offre un contributo più completo in quanto considera tutti i parametri che condizionano la temperatura dell'aria durante un'ondata di calore e in assenza di movimento di masse d'aria. Inoltre, grazie a questo indice, verrà realizzata una mappa di fragilità microclimatica dando informazioni sull'indice di comfort nell'intero territorio comunale al fine di individuare le aree dove è maggiormente necessario intervenire per il benessere delle fasce deboli della popolazione maggiormente esposte alle ondate di calore.

3.1.5. Individuazione di un set di strategie percorribili per l'adattamento e la mitigazione agli eventi estremi e ai cambiamenti climatici / Selezione delle strategie operative per la definizione di un percorso di adattamento

Le strategie percorribili per l'adattamento e la mitigazione agli eventi estremi ed ai cambiamenti climatici, nonché la selezione delle strategie operative per la definizione di un percorso di adattamento verranno identificate durante il secondo anno di lavoro. Tale analisi sarà infatti basata sui dati provenienti dalle analisi di fragilità condotte seguendo sia l'approccio statistico sopra riportato, che quello deterministico ancora in corso di svolgimento. Sulla base delle differenze tra i due metodi e sull'affidabilità e robustezza del dato ottenuto saranno difatti identificate le strategie più idonee.

3.2. Assorbimento di carbonio

Per la valutazione della capacità di assorbimento del carbonio, l'analisi ha tenuto di un approccio integrato tra i dati inventariali (3.2.1), analisi da sistemi informativi geografici (GIS) (3.2.2) e modellistica (3.2.3). L'obiettivo finale era infatti quello di applicare una metodologia integrata (modelli di simulazione, telerilevamento e dati ausiliari) in grado di fornire stime di NEE (Net Ecosystem Exchange) nell'ambito del territorio comunale.

3.2.1. Dati inventariali ed analisi GIS

Per poter stimare il carbonio immagazzinato dal verde urbano di Prato si è scelta una metodologia inventariale già validata in un altro lavoro sul Parco delle Cascine (Brilli et al., 2019). L'implementazione del modello ha richiesto specifiche informazioni relative a ciascun albero che insiste sul territorio urbano: specie, circonferenza o diametro, altezza (se presente), coordinate geografiche. Tali informazioni sono state estrapolate dalla banca dati geografica delle "alberature pubbliche dell'area urbana", messa a disposizione da CONSIAG (Fig. 31) la quale tuttavia esclude le aree rurali e forestali extra-urbane.

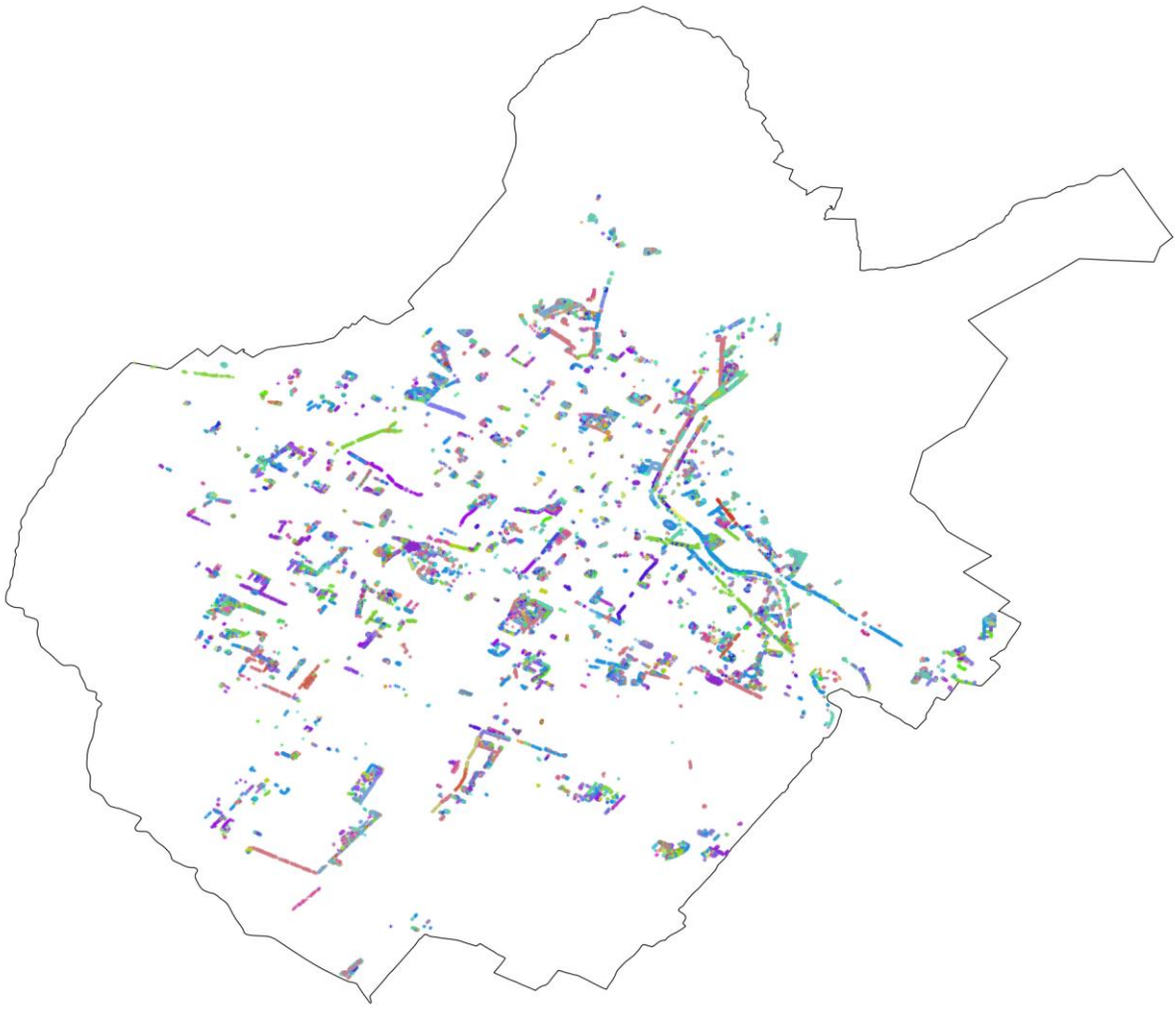


Figura 31. Visualizzazione delle alberature pubbliche urbane del Comune di Prato (Fonte del dato: CONSIAG).

Dei quasi 29.500 alberi presenti nel database ne sono stati selezionati 26.356 (pari a l'92,7% del totale), relativi a 28 generi diversi con specie per cui è nota o è stato possibile ottenere la curva ipsometrica (Tab. 7). Tale possibilità è inoltre garantita dall'anno di rilevazione il quale, essendo lo stesso per tutte le piante prese in analisi, ha permesso di ottenere dei valori dendrometrici (nello specifico la circonferenza) temporalmente confrontabili. Inoltre, grazie alla conoscenza delle coordinate geografiche di ogni singola pianta, le stime di carbonio stoccato calcolate per classi diametriche sono state estese a ciascuna pianta e poi rapportate all'unità di superficie per un calcolo spaziale più dettagliato.

ID number	ID color	Genere	Specie	N° alberi	Circ. media	Diam. Medio
1		Acero	Campestre, Ginnala, Negundo, Freemani, Platanoide (riccio), Pseudoplatano (montano), Saccarino	2134	67.0	21.3
2		Aesculus	Ippocastano, Indica, Carnea	218	133.0	42.4
3		Alnus	Cordata, glutinosa, Incana	15	40.0	40.0

4		Betula	Pendula	20	52.0	40.0
5		Carpino	Betulus (bianco), Carpinifolia (nero)	783	53.0	16.9
6		Catalpa	Bignonoides	55	95.0	30.3
7		Cedrus	Atlantica, deodara, libano, calocedro	782	162.0	51.6
8		Celtis	Australis, Levigata	1345	68.0	21.7
9		Conifere	Picea, Abies	51	75.0	23.9
10		Corylus	Avellana, Colurna	114	19.0	6.1
11		Cupressus	Sempervirens, Leylandi, Arizonica, Glabra	1447	83.0	26.4
12		Farnia	Quercus Robur	534	76.0	24.2
13		Frassino	Americana, Angustifolia, Excelsior, Ornus, Oxicarpa	1618	54.0	17.2
14		Gleditsia	Spino di Giuda	113	86.0	27.4
15		Juglans	Regia, Nigra	98	78.0	24.8
16		Leccio	Quercus ilex	1467	96.0	30.6
16		Liquidambar	Liquidambar S.	88	57.0	18.2
17		Magnolia	Grandiflora, Lilflora, Solanganea	260	64.0	20.4
18		Olea	Olea Eu.	1622	75.0	23.9
19		Olmo	Pumila, Laevis, Minore	272	93.0	29.6
20		Pinus	Pinea, Nero, Pinaster, Silvestre, Strobo, Wallichiana, Halepensis	3491	166.0	52.9
21		Pioppo	Italica, Nigra, Alba, Canescens, Tremulo	598	123.0	39.2
22		Platano	Orientalis, Acerifolia	1578	145.0	46.2
23		Prunus	Avium, Cerasifera, Domestica, Dulce, Laurocesaro, Persica, Serrulata, Armeniaca, Lusitanica, Amygdalus	433	57.0	18.2
24		Pyrus	Calleriana, Communis	679	43.0	13.7
25		Quercus	Pubescens, Cerris, Petrae, Palustris, Rubra, Robur, Suber	904	88.0	28.0
26		Robinia	Robinia pseudoacacia	446	91.0	29.0
27		Sophora	S. Japonica	44	99.0	31.5
28		Tiglio	Americana, Europea, Tomentosa, Ibrida argentea, Cordata, Platifoglia,	5147	102.0	32.5
TOT calcolate				26356	84.1	28.5
TOT Dataset				28431		
% copertura				**92.7**		

Tabella 7. *Tabella delle "alberature pubbliche dell'area urbana"raggruppata per genere, includendo specie X genere, numerdo di piante/alberi, valore medio della circonferenza e ddel diametro per specie presente.*

Per poter valutare il contributo in termini di accumulo di carbonio della vegetazione extra-urbana è stato necessario individuare le aree forestali che ricadono nel territorio comunale e la diversa tipologia. Tali aree sono state estrapolate utilizzando informazioni ottenute dalla banca dati geografica di uso suolo della Regione Toscana del 2016. I modelli utilizzati per le stime sono stati implementati sulle due tipologie forestali che ricadono nella porzione nord-orientale del Comune: il querceto misto, che copre una superficie di circa 5000 ha, e le conifere, che invece occupano una superficie di circa 340 ha (Fig. 32).

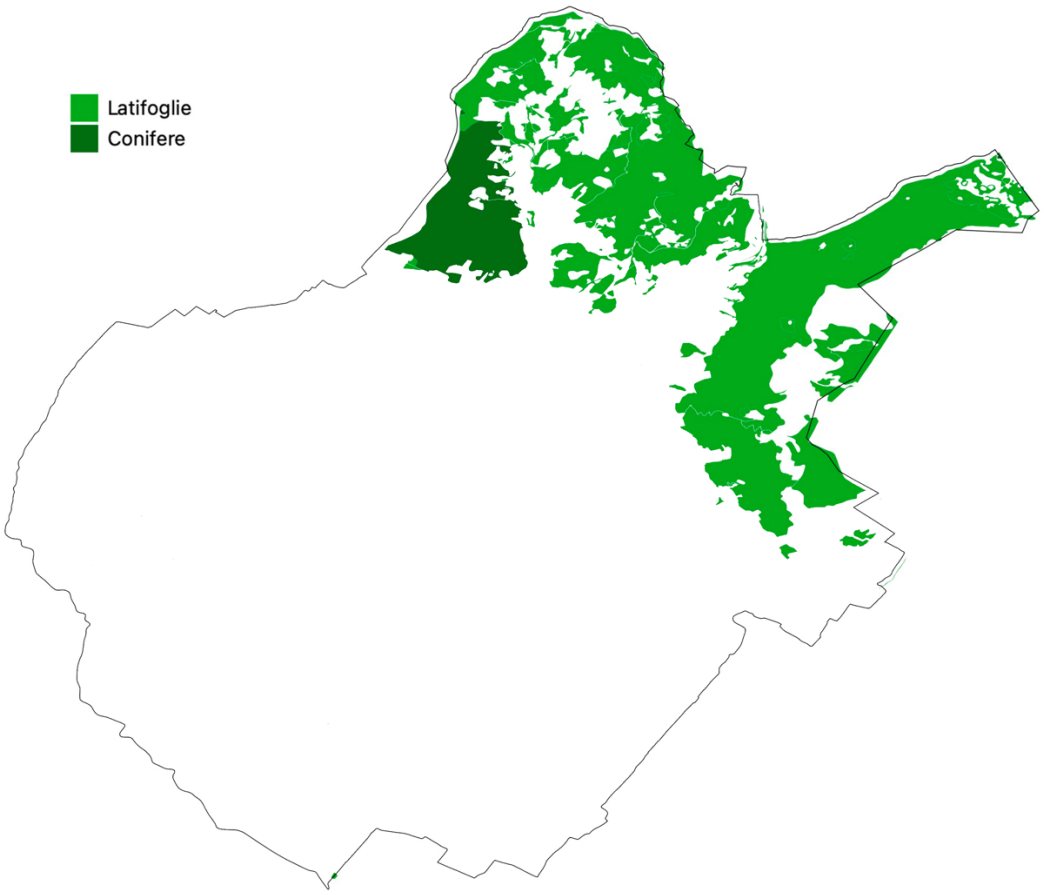


Figura 32. Aree forestali (querceto misto e conifere) extra-urbane del Comune di Prato (Fonte del dato: Uso Suolo 2016, Regione Toscana).

3.2.2. Approccio modellistico

L'approccio modellistico è stato effettuato mediante l'integrazione tra modelli e dati osservati. Innanzitutto, è stata effettuata una spazializzazione a scala territoriale, con 250 m di risoluzione spaziale, dei dati meteorologici giornalieri mediante il modello DAYMET e stima della radiazione solare mediante MT-Clim. Poi è stata calcolata la produttività (GPP) a partire da immagini da satellite ad alta risoluzione (Sentinel 2; 10 m di risoluzione spaziale) utilizzando il modello C-Fix attraverso dati di FAPAR (Fraction of Photosythetically Active Radiation Absorbed) derivati da telerilevamento integrati con dati di radiazione. Poi è stata calcolata la capacità di immagazzinamento degli ecosistemi in termini di NEE mediante il modello BIOME-BGC; un modello capace di riprodurre i principali processi degli ecosistemi forestali validato in diversi ecosistemi. Le stime ottenute sono state poi corrette sulla base del volume reale ottenuto da una mappa ad alta risoluzione spaziale (pixel di 23 m). Queste mappe tenevano conto di volume legnoso (per le respirazioni autotrofe) e di SOC (per respirazione eterotrofa, i.e. decomposizione). Inoltre, la mappa di contenuto di carbonio organico nel

suol (Soil Organic Carbon, SOC) con risoluzione di 250 m è stata utilizzata per correggere le stime di respirazione eterotrofa (decomposizione) fornite da BIOME-BGC.

Il territorio comunale è stato suddiviso considerando sia le diverse classi di uso suolo individuate mediante interpretazione di ortofoto, che le alberature urbane inventariate dal Comune di Prato. La mappa risultante riporta i boschi di conifere, i boschi di latifoglie, gli oliveti, le alberature urbane, le zone caratterizzate da specie erbacee (i.e. prati, pascoli e seminativi) e le zone urbane e residenziali dove la copertura vegetale è inferiore al 10% (Figura 33, Tabella 8). Per ciascuna delle diverse categorie sono state ottenute mappe di GPP e NEE che vengono mostrate in Figure 34-35. In Tabella 8 si riportano, oltre all'estensione delle diverse classi di uso suolo, i valori medi annui in termini sia di GPP che di NEE.

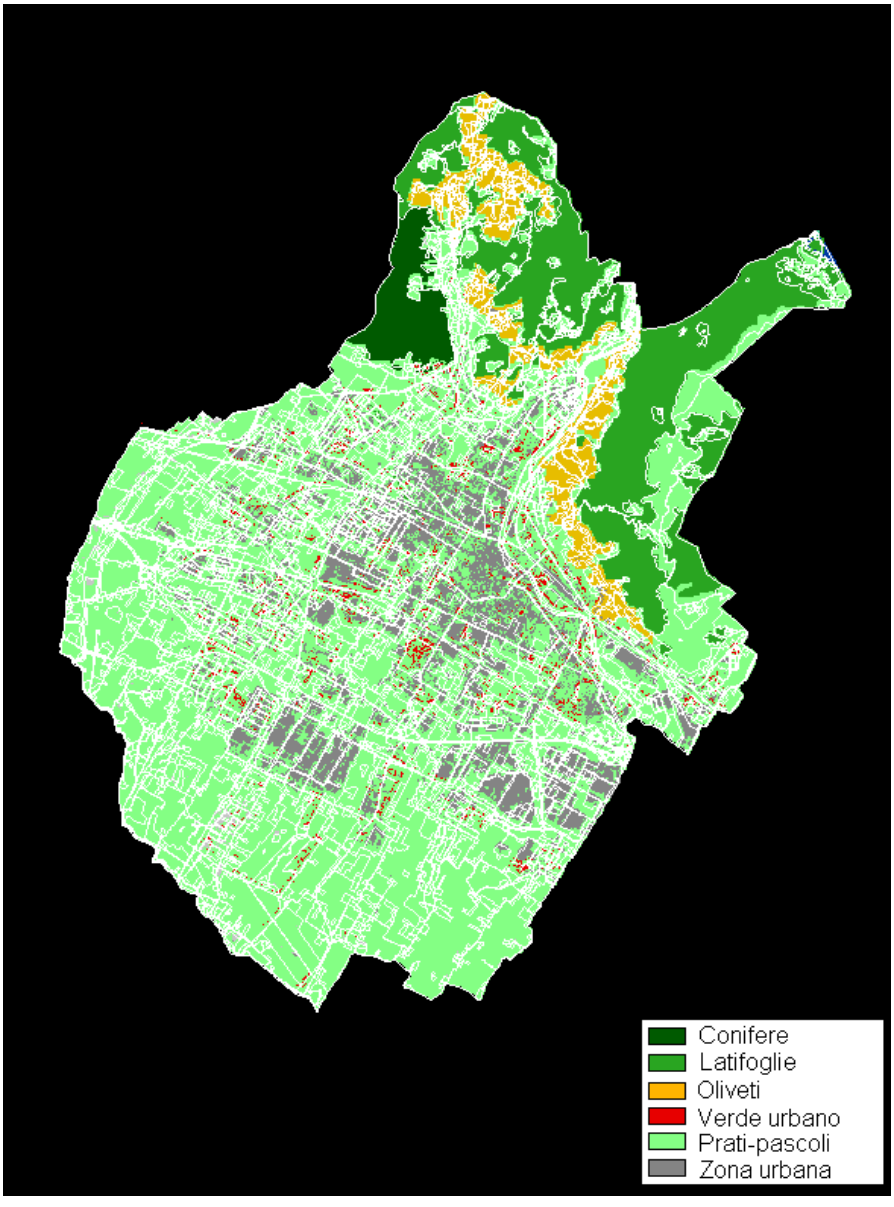


Figura 33. *Distribuzione delle diverse categorie di uso suolo presenti all'interno del territorio comunale.*

Tipo di vegetazione	Superficie (ha)	GPP (g C m^{-2} a^{-1})	NEE (g C m^{-2} a^{-1})
Conifere	210	1228	403
Latifoglie	1300	1931	640
Oliveto	500	1658	350
Alberature urbane	190	1305	161
Prati-pascoli-seminativi	6310	1328	50
Zona urbana (FVC < 0.1)	1260	69	5

Tabella 8. *Valori di GPP e NEE media annua per le diverse classi di vegetazione presenti all'interno del territorio comunale.*

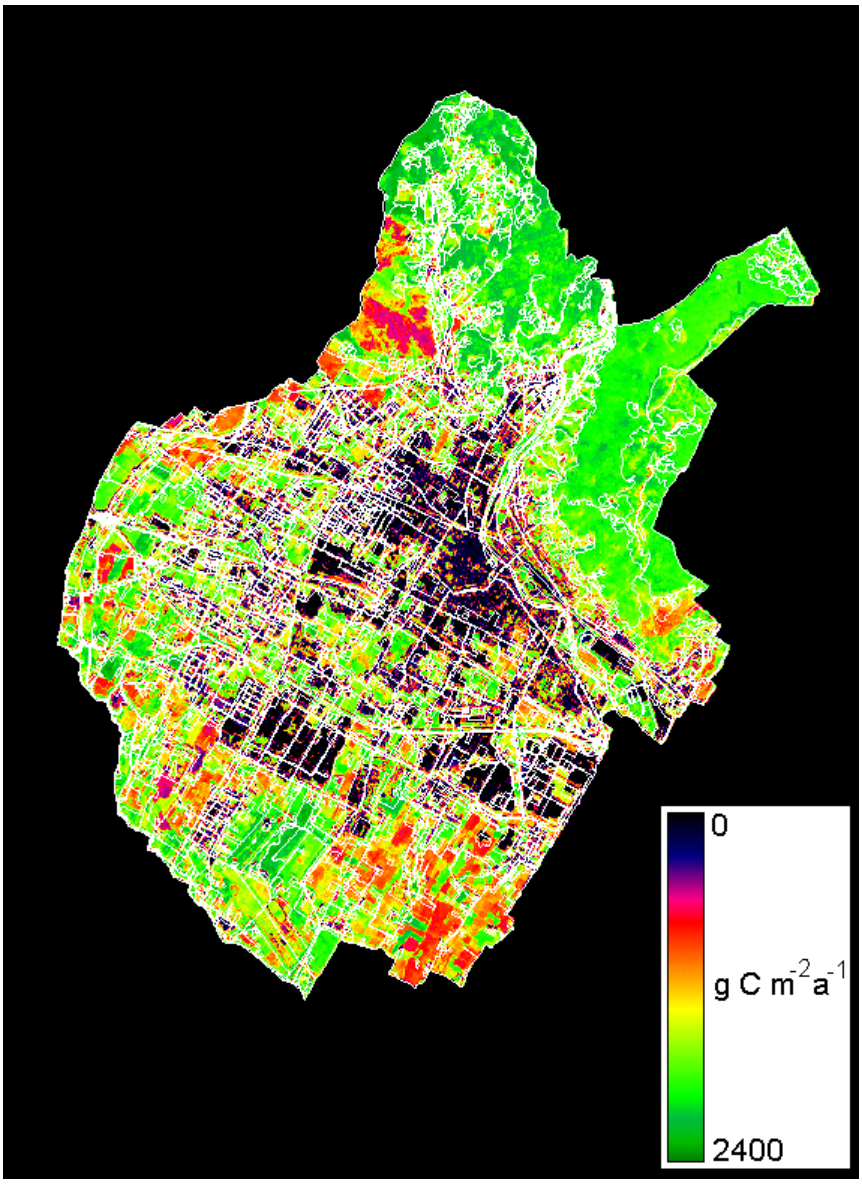
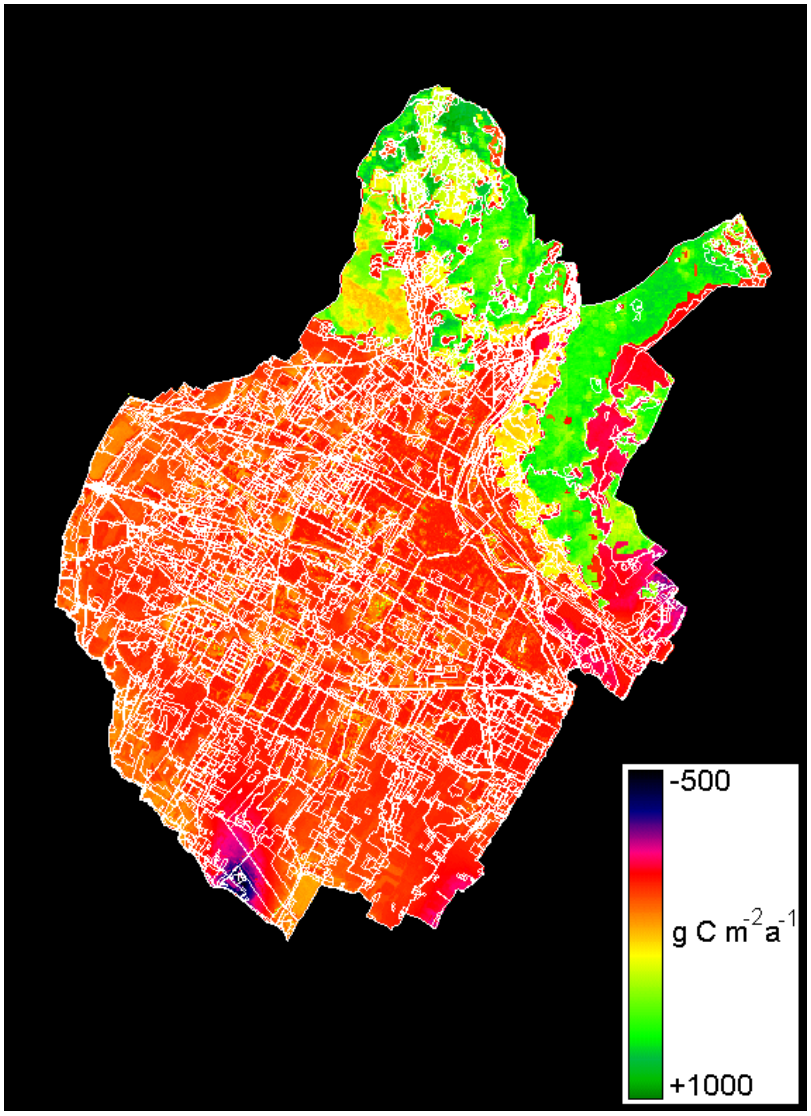


Figura 34. *Mappa di GPP del Comune di Prato.*



B

Figura 35. *Mappa di NEE del Comune di Prato.*

Complessivamente il territorio comunale ha una GPP media pari a 1260 g C m^{-2} $anno^{-1}$ ed una NEE di circa 147 g C m^{-2} $anno^{-1}$. La distribuzione della GPP è uniformemente elevata laddove la copertura vegetale (sia essa erbacea che arborea) è elevata mentre i valori più ridotti corrispondono a zone in cui Per quanto riguarda infine la distribuzione della NEE, le foreste (ed in particolare quelle a latifoglie che hanno una copertura vegetale più alta) sono la categoria capace di sottrarre dall'atmosfera la maggior quantità di carbonio. Seguono poi gli oliveti, caratterizzati dalla presenza alternata di specie erbacee ed arboree che hanno una NEE pari a 350 g C m^{-2} $anno^{-1}$, le alberature urbane che coprono una ridotta porzione del territorio e contribuiscono a sottrarre carbonio, e le specie erbacee che hanno un bilancio annuo prossimo a zero. La zona in cui si ha maggiore emissione di carbonio corrisponde ad una porzione

783 di territorio in cui risulta esserci un forte accumulo di carbonio organico nel suolo e quindi molta
784 decomposizione (cfr. zona in blu in Figura 2 B).

785

786 ### *3.3. Modello Digital-Twin*

787 Il comportamento bio-fisico del tessuto urbano, a partire dalla interazione ambientale superfici-
788 edifici-vegetazione-irraggiamento-sorgenti emissive-atmosfera è di difficile comprensione ma di
789 fondamentale importanza per l'implementazione di scenari e politiche di governance. Lo sviluppo di
790 uno strumento di simulazione in logica digital-twin, cioè un insieme di modelli in grado di simulare
791 tutti i processi, si rende necessario per la comprensione e l'analisi di tutti gli effetti bio-fisici e
792 morfologici di un ambiente urbano. A tal fine si è scelto di operare con la modellistica ENVI-met a
793 scala urbanistica facendo un'analisi di aree rappresentative di tre diversi tessuti urbani (centro storico,
794 residenziale e industriale) e dimensioni di circa 1 Km^2 (con una griglia di 5 m di risoluzione), ed i cui
795 risultati possano essere trasposti a zone morfologicamente simili. La simulazione dell'intera città
796 richiede risorse di calcolo al momento non disponibili. Il modello a questa scala permette di simulare
797 l'interazione tra edificato, vegetazione urbana, reticolo stradale ed atmosfera, andando quindi a
798 costituire uno strumento di pianificazione e governance. Le aree di studio su cui è stata effettuata la
799 simulazione con il software ENVI-met sono state selezionate in coordinamento con l'Ufficio Tecnico
800 del Comune di Prato, assumendole come indicative dei tessuti urbani esistenti, al fine di ottenere la
801 rappresentazione "tipo" del comportamento microclimatico di ciascun tessuto rispetto alla struttura e
802 morfologia delle rispettive componenti urbane espresse tramite: la densità dell'edificato, larghezza
803 delle strade, i materiali che costituiscono tali componenti, la vegetazione presente. Le aree identificate
804 sono riportate in Figura 36.

805

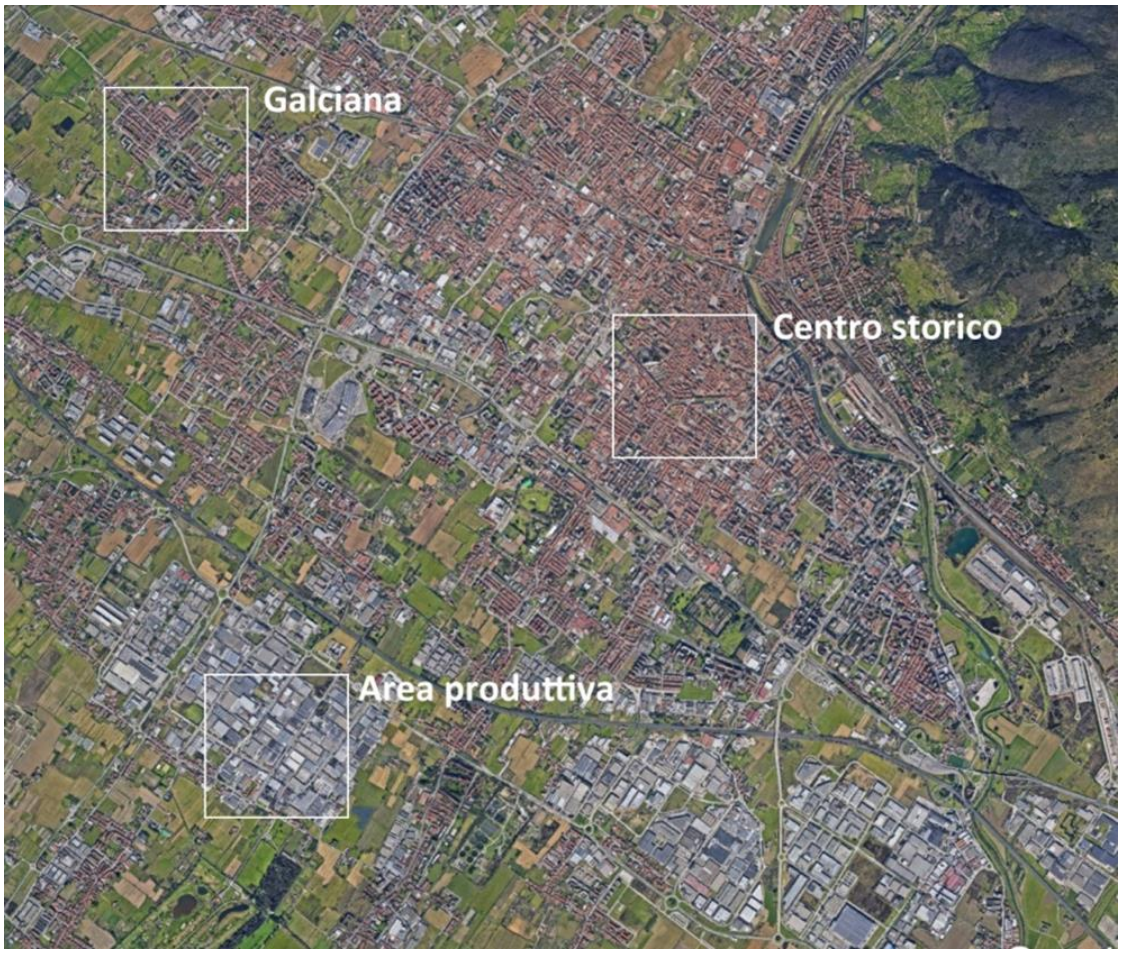


Figura 36. *Geolocalizzazione delle tre aree di studio del comune di Prato simulate con il modello ENVI-met.*

L'area centro storico nell'ambito della Tavola ES4 - Sistemi e Subsistemi territoriali del Piano Strutturale online ricade nel "Sistema 3 – Il centro storico", ed è caratterizzata nella sua estensione da due tipi di tessuti: il primo tessuto denso e compatto, costituito da slarghi e piazze principali, prevalentemente mineralizzato, che rappresenta la parte più storica; il secondo tipo di tessuto, verso sud, che comprende un tessuto più misto con una morfologia meno densa rispetto al centro. L'area produttiva selezionata ricade nel "Sistema 7 – I Macrolotti" della Tavola ES4 - Sistemi e Subsistemi territoriali e, confrontando il suo tessuto produttivo con gli altri presenti sul territorio, si può ritenere descrittiva sia a livello di morfologia, di tessitura e di rapporto fra le componenti urbane. Per rappresentare un borgo tipico è stata selezionata l'area Galciana, che ricade nel "Sistema 5 – I borghi" per l'appunto. Tale area infatti contiene al suo interno diversi tessuti tipologici fra quelli descritti e analizzati nel dettaglio nella relazione del Piano relativa alla "Metodologia di individuazione puntuale dei morfotipi urbani nel territorio pratese", descrittrice dei morfotipi delle urbanizzazioni contemporanee esistenti. Nello specifico tali tessuti sono: tessuto ad isolato compatto, tessuto produttivo commerciale o direzionale, tessuto storico con mix di funzioni a bassa densità, tessuto di

origine storica con funzione produttiva, tessuto lineare lungo strada di formazione prevalentemente recente a bassa-media densità.

Queste tre aree sono state simulate con il modello fluidodinamico ENVI-met al fine di avere un'analisi microclimatica fluidodinamica di tre differenti aree per poter ottenere la mappa a scala comunale. ENVI-met (http://www.envi-met.com/) è un modello microclimatico tridimensionale non idrostatico (Bruse and Fleer, 1998) in grado di simulare le interazioni superficie-pianta-aria in ambiente urbano con una risoluzione spaziali di 0.5-10 m e una risoluzione temporale di 10 sec. È un modello fluidodinamico in grado di simulare diverse variabili, tra cui il flusso intorno e tra gli edifici, i processi di scambio di calore e vapore sia alla superficie del suolo che dei muri, gli scambi turbolenti, alcuni parametri della vegetazione, la bioclimatologia e la dispersione di particelle. Il modello ENVI-met può essere utilizzato per diversi scopi al fine di studiare e comprendere diversi aspetti dei canyon urbani come gli effetti di orientamento e rapporto edifici/verde sul comfort urbano outdoor, il ruolo della vegetazione per la mitigazione dell'isola di calore urbana, ecc.… I dati di input necessari per far girare ENVI-met sono costituiti dalla descrizione dettagliata del suolo (asfalto, erba, terreno nudo, acqua, etc..), degli edifici (localizzazione, dimensioni), vegetazione (presenza di alberi, altezza e specie) e delle condizioni atmosferiche iniziali. Attraverso l'interfaccia grafica si inserisce l'orografia e le condizioni meteo iniziali in termini di velocità e direzione del vento a 10 m, temperatura dell'aria e umidità relativa (valori massimo e minimo). I risultati delle simulazioni possono mostrare gli effetti di come le soluzioni architettoniche, le tecnologie sostenibili, l'uso del verde e dell'acqua, consentono di migliorare le condizioni microclimatiche outdoor. È stato scelto di simulare le condizioni microclimatiche per la giornata con la temperatura massima registrata durante l'ondata di calore dell'estate 2019. A tal fine è stata effettuata un'analisi dei dati di velocità e direzione del vento disponibili (2018-2019) al fine di caratterizzare la città da un punto di vista anemologico e ad andare a considerare il vento tipico medio dell'area urbana (Figura 37). La direzione prevalente del vento durante il periodo estivo risulta essere Est-Nord-Est con velocità del vento comprese tra 1 e 2 m/s.

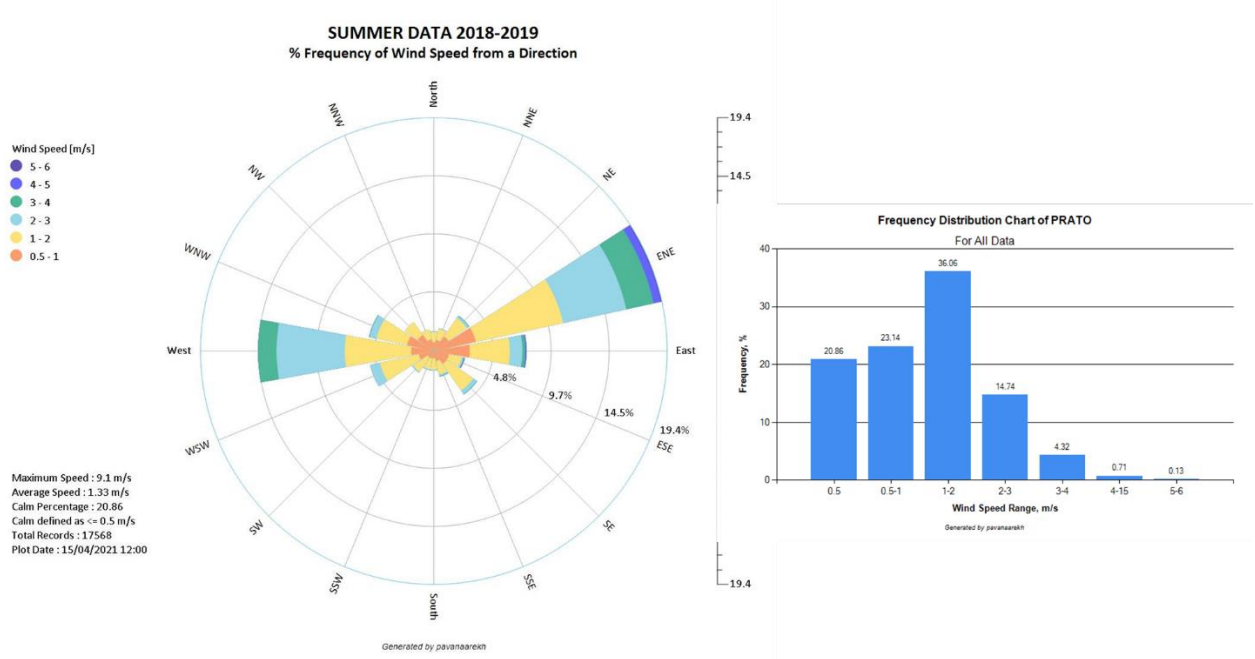
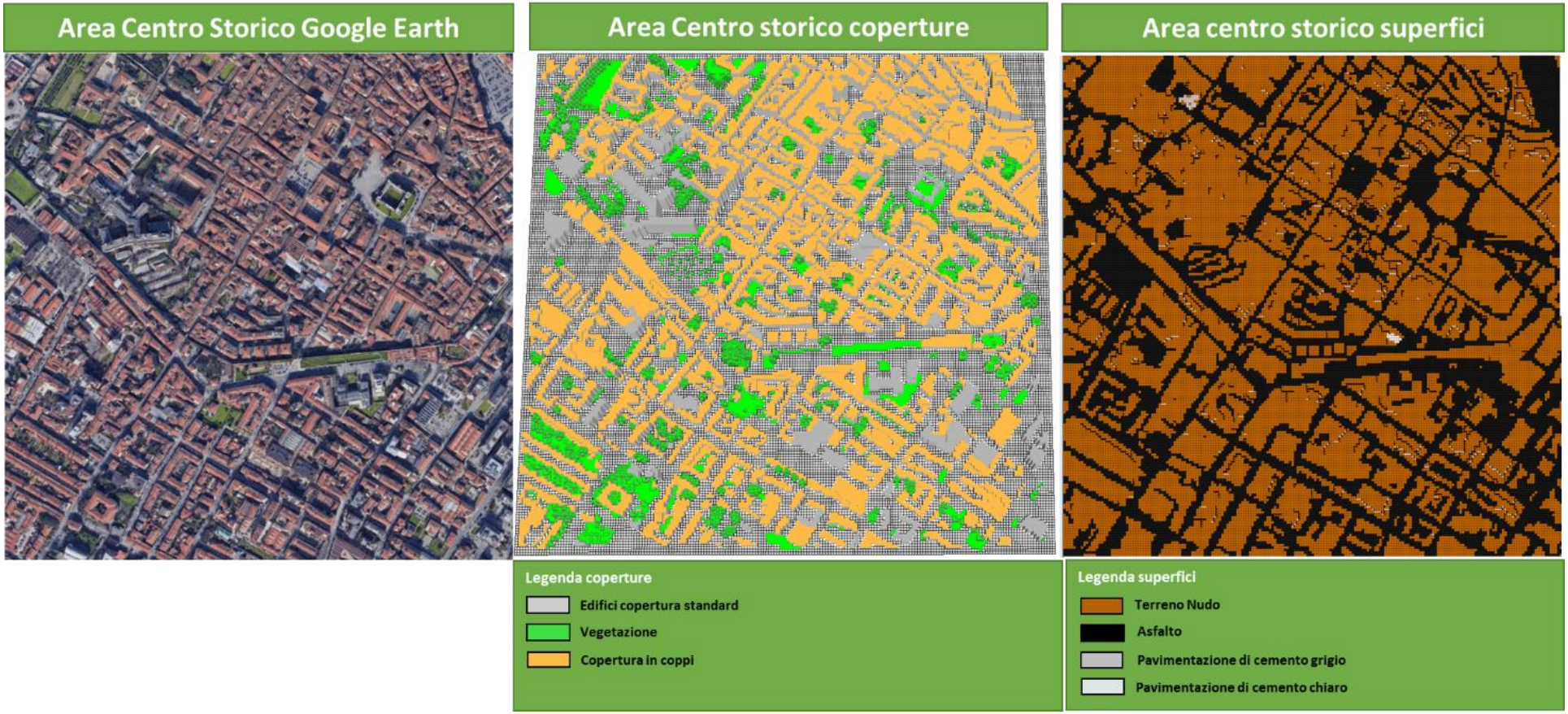


Figura 37. *Rosa dei venti per la città di Prato durante il periodo estivo (2018-2019) e relativa frequenza delle velocità del vento per ogni settore.*

Per la giornata del 25 luglio 2019 si è quindi inizializzato il modello con i seguenti dati meteorologici:

- velocità vento: 2.0 m/s;
- direzione del vento:70 ° da Nord;
- Temperatura massima: 39.75 °C alle ore 14:00;
- Temperatura minima: 24.07 °C alle ora 4:00;
- Umidità relativa massima: 58% alle ore 04:00;
- Umidità relativa minima: 15% alle ore 14:00.

L'orografia delle varie aree comprendente palazzi, vegetazione e uso del suolo è stata inserita nel modello ENVI-met per tutte le tre aree considerate e nelle Figure 38, 39 e 40 sono riportate l'immagine di Google Earth, le coperture degli edifici e i materiali utilizzati per le superfici.



862

863 ***Figura 38.*** *Immagine Google Earth, coperture degli edifici e materiali alla superficie per l'area centro storico.*

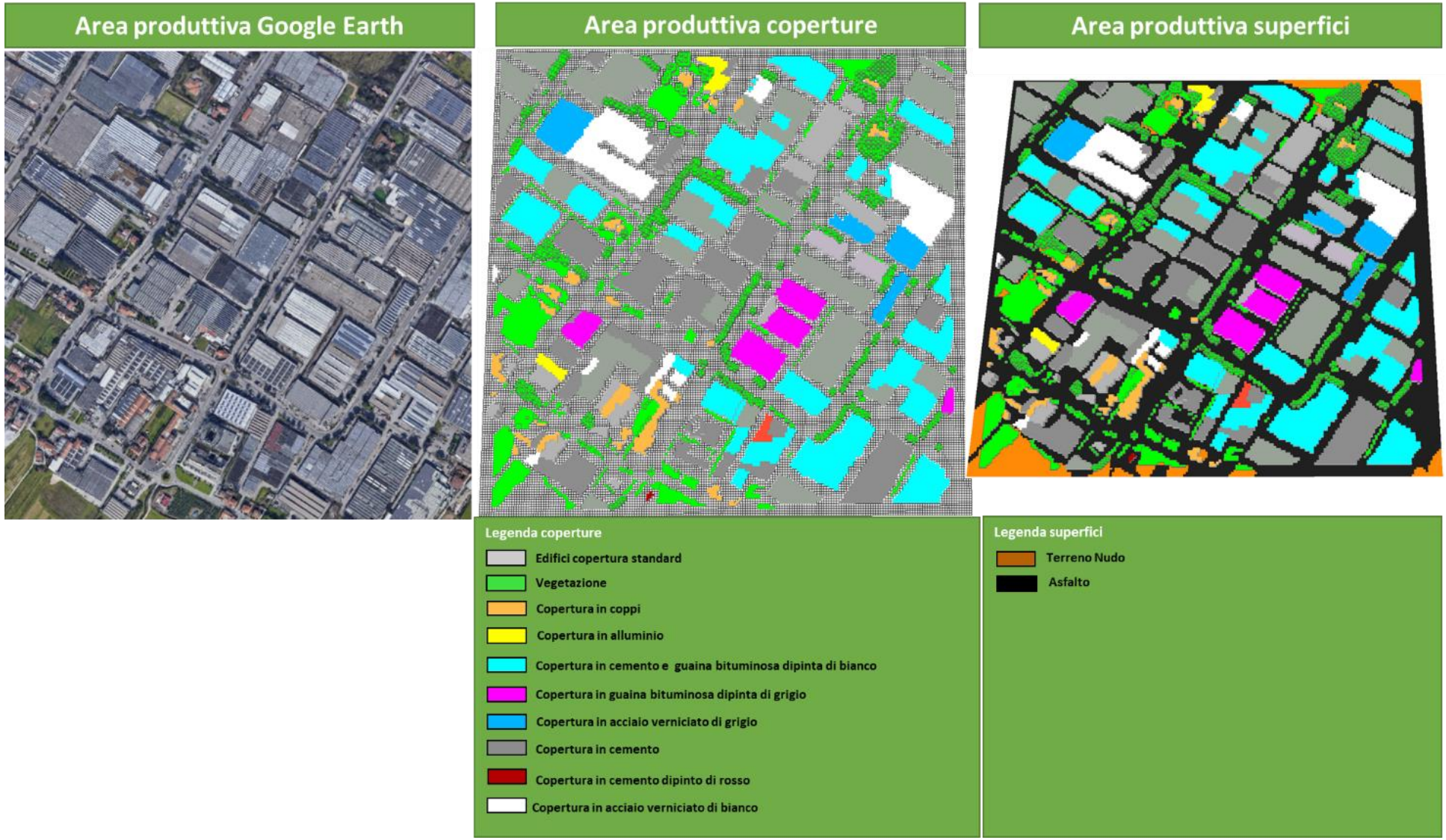
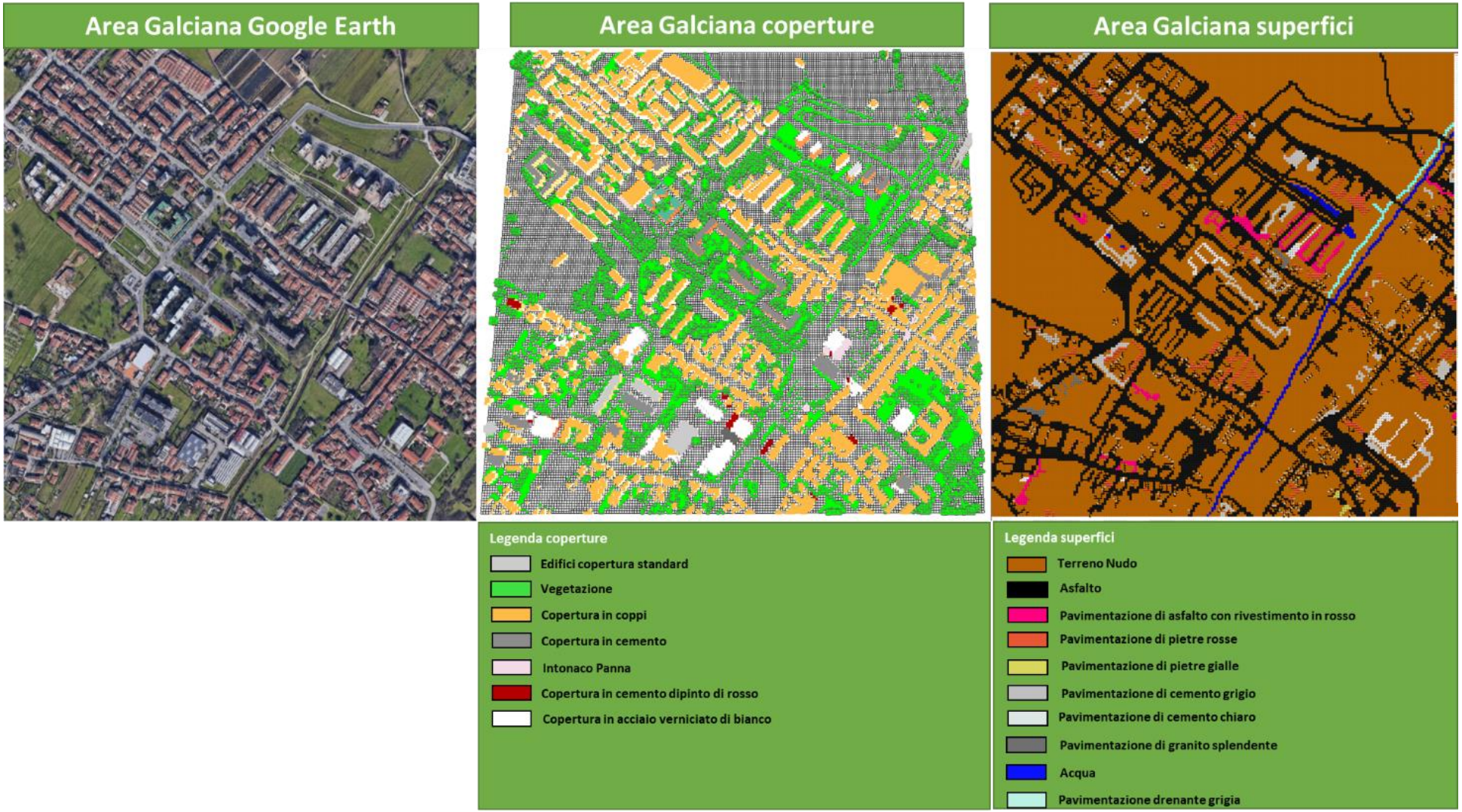


Figura 39. *Immagine Google Earth, coperture degli edifici e materiali alla superficie per l'area produttiva.*



866

867 ***Figura 40***. *Immagine Google Earth, coperture degli edifici e materiali alla superficie per l'area centro Galciana.*

La modellizzazione 3D di vegetazione e edifici è riportata nella Figura 41. Il modello ha girato per 36 ore al fine di avere l'evoluzione della fluidodinamica per una giornata considerando le ore iniziali poco stabili dal punto di vista numerico.

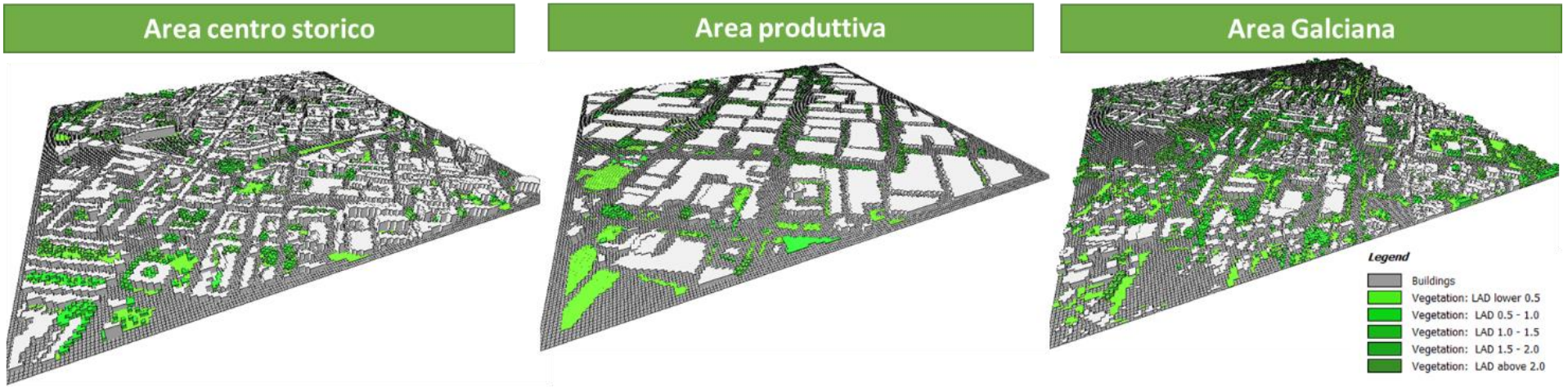


Figura 41. *Modellizzazione 3D con vegetazione ed edifici delle tre aree inserite nel modello ENVI-met.*

3.4. Super-sito per la misura degli scambi di CO_2.

Il super-sito per la misura degli scambi di CO_2 in area urbana è stato installato nel centro di prato, più specificatamente sul tetto di palazzo Pretorio (43°52’50’’N, 11°05’47’’ E; fig. 41a). Il sito consta di una stazione eddy covariance (Fig. 41b) necessaria per misurare sia i livelli di CO_2 che gli scambi gassosi a scala stagionale all’interno del sistema urbano



Figura 41. *Installazione della stazione Eddy Covariance su Palazzo Pretorio (a) nel centro della città di Prato. A destra (b) dettaglio della strumentazione utilizzata comprensiva di analizzatore di gas ad infrarosso e anemometro triassiale*.

La stazione, installata nel Giugno del 2021, raccoglie dati ad alta frequenza sulle misure di flussi in ambiente urbano, e permetterà di valutarne le dinamiche in relazione sia alla stagionalità che ad eventuali azioni mitigative implementate nel contesto comunale. Data la ridotta disponibilità di dati attualmente collezionati, analisi di dettaglio verranno effettuate durante il secondo anno di lavoro.

4. Sviluppi futuri

Le attività di ricerca effettuate nel primo anno di lavoro e finalizzate allo sviluppo del Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile ed il Clima (PAESC) per il Comune di Prato sono state effettuate utilizzando molteplici approcci, i quali hanno previsto sia l'impiego di misure di campo e database territoriali che l'utilizzo di modelli matematici. Gli approcci utilizzati hanno fornito le basi per uno studio, tutt'ora in corso, che si traduce in uno strumento fondamentale non solamente per la pianificazione degli abbattimenti emissivi e della riforestazione urbana nel comune di Prato, ma anche per la creazione di ipotesi di scenari alternativi. In tale contesto, possibili sviluppi futuri legati alle correnti attività di ricerca potranno riguardare due aspetti fondamentali per contrastare l'impatto del cambiamento climatico nel comune di Prato.

1) Ipotesi di scenari mitigativi insieme a target di "Carbon neutrality"

In questo contesto l'approccio modellistico potrà essere sviluppato per tenere conto di ipotesi addizionali di mitigazione mediante scenari che potrebbero prevedere:

a. Incrementi in termini percentuali delle superfici verde. Ciò permetterebbe di valutare l'incremento della capacità mitigativa apportata da un aumento delle superfici verdi all'interno del comune di Prato.
b. Incrementi del volume legnoso. Ipotesi di aumenti volumetrici sulla stessa superficie o su superfici diverse (incrementate o ridotte) permetteranno di valutare la capacità di stoccaggio del carbonio in relazione alle piante utilizzate ed alla loro dimensione/età.
c. Tipologia di specie. L'approccio modellistico potrebbe stimare il diverso contributo mitigativo sulla base delle modifiche della dimensione e della presenza delle diverse macrocategorie individuate, ovvero cambiamenti nella capacità mitigativa sulla base della maggiore o minore presenza di sistemi caratterizzati da latifoglia sempreverde, latifoglia decidua, conifere, oliveto, etc.
d. Utilizzo di diversi scenari climatici. L'applicazione di scenari climatici fornirà un idea dell'impatto delle modifiche climatiche sulle ipotesi di riforestazione, oltre a fornire in termini quantitativi possibili confronti tra i diversi land-use (attuale contro quello ipotizzabile in futuro)

2) Ipotesi di scenari emissivi

Tale ipotesi potrebbe prevedere la contabilizzazione delle emissioni su base comunale, utilizzando i dati IRSE. Attualmente, a causa del mancato aggiornamento del dato, il riferimento più prossimo è al

1990. Al 2030 dovrebbero essere previsti abbattimenti delle emissioni al 55%, con il raggiungimento della neutralità completa al 2050. Il dataset dovrebbe considerare tutti processi emissivi, la densità abitativa, l'attività industriale e le reti viarie, presentando per ognuno di questi parametri un fattore di emissione che ha una stima valida della CO_2 emessa. La complessità nello sviluppo di questo approccio rispetto a quello identificato nel punto 1 potrebbe ricondursi alla mancanza della componente elettrica, poiché essendo spesso prodotta da un'altra parte risulterebbe di difficile quantificazione.

Bibliografia

1. Baghaeipoor, G.; Nashrollani, N. The Effect of Sky View Factor on Air Temperature in High-Rise Urban Residential Environments. J. Daylighting **2019**, 6, 42–51, doi: http://dx.doi.org/10.15627/jd.2019.6.
2. Bonafoni, S.; Sekertekin, A. Albedo Retrieval From Sentinel-2 by New Narrow-to-Broadband Conversion Coefficients. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* **2020**, 17, pp. 1618–1622, 1013, doi: https://doi.org/10.1109/LGRS.2020.2967085.
3. Bruse, M.; Fleer, H. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. Environ. Model. Softw. 1998, 13, 372–384.
4. Chirici G., Giannetti F., McRoberts R.E., Travaglini D., Pecchi M., Maselli F., Chiesi M., Corona P. (2020). Wall-to-wall spatial prediction of growing stock volume based on Italian National Forest Inventory plots and remotely sensed data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 84, 101959.
5. Fu, P.; Rich, P.M. A Geometric Solar Radiation Model with Applications in Agriculture and Forestry. *Comput. Electron. Agric.* **2002**, 37, pp. 25–35, doi: https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00115-1.
6. Gao, L., Wang, X., Johnson, B. A., Tian, Q., Wang, Y., Verrelst, J., ... & Gu, X. (2020). Remote sensing algorithms for estimation of fractional vegetation cover using pure vegetation index values: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *159*, 364-377.
7. Gardin L., Chiesi M., Fibbi L., Maselli F. (2021). Mapping soil organic carbon in Tuscany through the statistical combination of ground observations with ancillary and remote sensing data. *Geoderma*, in revision.
8. Giuliacci, M., A. Giuliacci, P. Corazzon. Manuale di meteorologia. Guida alla comprensione dei fenomeni atmosferici e dei cambiamenti climatici. Alpha Test, 4° Edizione 2019, ISBN: 978-88-483-2185-3 , pp.688
9. 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), 538.
10. Guha, S.; Govil, H.; Dey, A.; Gill, N. Analytical Study of Land Surface Temperature with NDVI and NDBI Using Landsat 8 OLI and TIRS Data in Florence and Naples City, Italy. *European Journal Remote Sensing* **2018**, pp. 667–678, doi: https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1474494.
11. Hatfield J. L., Sauer T. J., Prueger J. H. *Radiation Balance.* In: Hillel, D. (ed). Encyclopedia of Soils in the Environment. Elsevier, Oxford, UK. p. 355-359.
12. Jiao Z., Ren H., Mu X., Zhao J., Wang T., Dong J. Evaluation of Four Sky View Factor Algorithms Using Digital Surface and Elevation Model Data. *Earth and Space Science* **2019**, 6, pp. 222-237, doi: https://doi.org/10.1029/2018EA000475.
13. Li, F., Chen, W., Zeng, Y., Zhao, Q., & Wu, B. (2014). Improving estimates of grassland fractional vegetation cover based on a pixel dichotomy model: A case study in Inner Mongolia, China. *Remote Sensing*, *6*(6), 4705-4722.
14. Ma Q., Wu J., He C..A hierarchical analysis of the relationship between urban impervious surfaces and land surface temperatures: spatial scale dependence, temporal variations, and bioclimatic modulation. *Landscape Ecology* **2016**, 31, pp. 1139-1153, doi: https://doi.org/10.1007/s10980-016-0356-z.
15. Mallick J., Singh C. K., Shashtri S., Rahman A., Mukherjee S. Land surface emissivity retrieval based on moisture index from LANDSAT TM satellite data over heterogeneous surfaces of Delhi city. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **2012**, 19, pp. 348-358, doi: https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.06.002.
16. Maselli F., Chiesi M., Moriondo M., Fibbi L., Bindi M., Running S.W. (2009). Modelling the forest carbon budget of a Mediterranean region through the integration of ground and satellite data. *Ecological Modelling*, 220 (3): 330-342.
17. Maselli, F., Papale, D., Puletti, N., Chirici, G., Corona, P., (2009). Combining remote sensing and ancillary data to monitor the gross productivity of water-limited forest ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 113, 657–667.
18. Maucha G., Büttner G., Kosztra B.. *European Validation of GMES FTS Soil Sealing Enhancement Data*. In Proceedings of the 31st European Association of Remote Sensing Laboratories Symposium (EARSeL 2011): Remote Sensing and Geoinformation not Only for Scientific Cooperation, Prague, Czech Republic, 30 May–2 June 2011; pp. 223-238.

19. Mavrakou, T.; Polydoros, A.; Cartalis, C.; Santamouris, M. Recognition of Thermal Hot and Cold Spots in Urban Areas in Support of Mitigation Plans to Counteract Overheating: Application for Athens. *Climate* **2018**, 6, 16, doi: https://doi.org/10.3390/cli6010016.
20. Morabito, M.; Crisci, A.; Georgiadis, T.; Orlandini, S.; Munafò, M.; Congedo, L.; Rota, P.; Zazzi, M. Urban Imperviousness Effects on Summer Surface Temperatures Nearby Residential Buildings in Different Urban Zones of Parma. *Remote Sensing* **2018**, 10, 17, doi: https://doi.org/10.3390/rs10010026.
21. Morabito, M.; Crisci, A.; Guerri, G.; Messeri, A.; Congedo, L.; Munafò, M. Surface Urban Heat Islands in Italian Metropolitan Cities: Tree Cover and Impervious Surface Influences. *Sci. Total Environ.* **2021**, 751, 142334, doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142334.
22. Morabito, M.; Crisci, A.; Messeri, A.; Orlandini, S.; Raschi, A.; Maracchi, G.; Munafò, M. The Impact of Built-up Surfaces on Land Surface Temperatures in Italian Urban Areas. *Sci. Total Environ.* **2016**, 551–552, pp. 317–326, doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.029.
23. Munafò, M. (Ed.). Land Consumption, Land Cover Changes, and Ecosystem Services. Report SNPA 15/20, 2020; ISBN 978-88-448-1013-9.
24. Oke, T.R. Canyon Geometry and the Nocturnal Urban Heat Island: Comparison of Scale Model and Field Observations. *J. Climatol.* **1981**, 1, pp. 237–254, doi: https://doi.org/10.1002/joc.3370010304.
25. Renard, F.; Alonso, L.; Fitts, Y.; Hadjiosif, A.; Comby, J. Evaluation of the Effect of Urban Redevelopment on Surface Urban Heat Islands. *Remote Sening* **2019**, 11, 299, doi: https://doi.org/10.3390/rs11030299.
26. Sobrino, J., Raissouni N., Li Z. L. A comparative study of land surface emissivity retrieval from NOAA data. *Remote Sensing of the Environment* **2001**, 75, pp. 256-266, doi: https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00171-1.
27. Sobrino J., Jiménez-Muñoz J. C., Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment* **2004**, 90, pp. 434-440, doi: https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.003
28. Toscano, P. (Ed.). Remote Sensing Applications for Agriculture and Crop Modelling. MDPI Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020; ISBN 978-3-03928-226-5.
29. U.S. Geological Survey Landsat 8 (L8). Data Users Handbook. Version 5.0. 2019. Available online: https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook.
30. Strategia europea per i cambiamenti climatici, 2003: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52013DC0216&from=IT
31. SNAC 2012. La Strategia Nazionale di Adattamento ai cambiamenti climatici: https://pdc.minambiente.it/sites/default/files/allegati/strategia_nazionale_adattamenti_climatici.pdf
32. Svenson, M.K. Sky View Factor Analysis—Implications for Urban Air Temperature Differences. Meteorol. Appl. **2004**, 11, 201–211, doi: https://doi.org/10.1017/S1350482704001288.
33. U.S. Geological Survey Landsat 8 (L8). Data Users Handbook. Version 5.0. 2019. Available online: https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook.
34. Variazioni e tendenze degli estremi di temperatura e precipitazione in Italia, 2013: https://www.isprambiente.gov.it/files/pubblicazioni/statoambiente/SA_37_2013_indici_estremi.pdf.

Consiglio Nazionale delle Ricerche

Istituto per la BioEconomia

Relazione delle attività di ricerca per lo sviluppo del Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile ed il Clima (PAESC) per il Comune di Prato

Piano di ricerca finalizzato alla valutazione dei rischi e delle vulnerabilità indotti dal cambiamento climatico e alla valutazione della potenzialità mitigativa del piano di azione sulla forestazione urbana della città di Prato

REPORT ATTIVITA' ANNO II

AUTORI

Lorenzo Brilli, Federico Carotenuto, Alice Cavaliere, Marta Chiesi, Letizia Cremonini, Edoardo Fiorillo, Tommaso Giordano, Giovanni Gualtieri, Giulia Guerri, Ramona Magno, Francesca Martelli, Fabio Maselli, Marco Morabito, Marianna Nardino, Carolina Vagnoli, Alessandro Zaldei.

RESPONSABILE SCIENTIFICO

Beniamino Gioli

Sommario

Introduzione 3
Tema 1: Vulnerabilità climatica 4
Tema 2: assorbimento di carbonio 9
Tema 3: Modello Digital-Twin 10
Sviluppi futuri 43
Allegati 43
Allegato 1 44
Allegato 2 57
Allegato 3 70

Introduzione

Le attività, come previsto dalla convenzione tra Comune di Prato e CNR-IBE si sono rivolte a quattro aree tematiche:

i. *vulnerabilità climatica*
ii. *assorbimento di carbonio*
iii. *modello Digital-Twin*
iv. *super-sito per la misura degli scambi di CO2*

Il presente documento relativo alle attività del 2° anno è organizzato in continuità con il documento precedente, di cui costituisce un aggiornamento relativo a ciascuna attività.

Il livello di completamento delle attività è il seguente:

vulnerabilità climatica	100%
assorbimento di carbonio	100%
modello Digital-Twin	90%
super-sito per la misura degli scambi di CO2	70%

Si riporta nel seguito una descrizione delle attività svolte nelle quattro aree tematiche ed un programma delle attività future previste a conclusione della collaborazione scientifica.

Tema 1: Vulnerabilità climatica

Individuazione di un set di strategie percorribili per l'adattamento e la mitigazione agli eventi estremi e ai cambiamenti climatici / Selezione delle strategie operative per la definizione di un percorso di adattamento

La mappa della vulnerabilità microclimatica (Figura 1), della quale è stata presentata la metodologia nella relazione intermedia consegnata precedentemente, mostra le aree più vulnerabili, in termini di indice UHTI (Urban Heatwave Thermal Index), sul sistema territoriale pratese durante una ondata di calore (in assenza di movimento di masse d'aria).

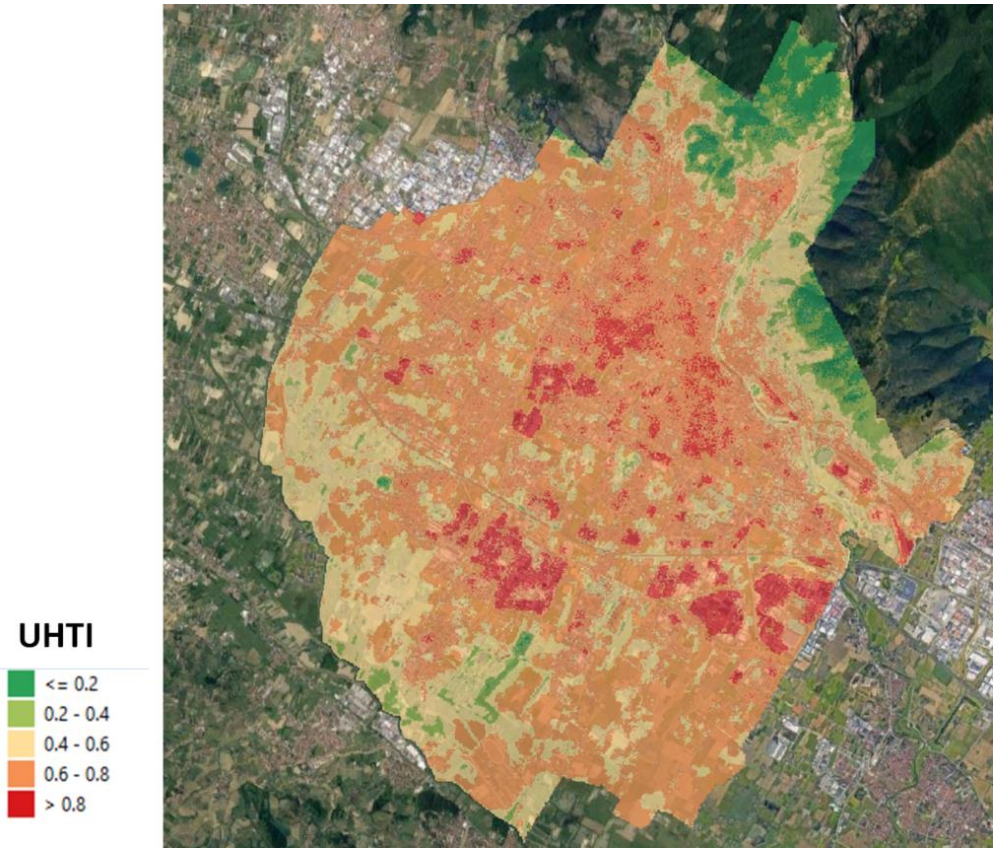


Figura 1. Mappa UHTI dell'area di studio discretizzata.

Si nota che i tessuti urbani fortemente densificati e impermeabilizzati, dove prevalgono superfici o facciate composte da materiali con valori di albedo molto basso (come, per esempio, l'asfalto e il cemento) sono quelli che restituiscono un indice UHTI più elevato. Fra questi tutte le aree industriali e commerciali, e i centri più densificati. Il centro storico della città restituisce un valore di UHTI inferiore rispetto alle aree industriali: questo è dovuto ai materiali più diffusi nel patrimonio edificato, che corrispondono prevalentemente a tetti con superfici in cotto, e tendenzialmente facciate con intonaci con un albedo leggermente superiore a quello del cemento. Contribuisce anche il rapporto fra le altezze degli edifici e la larghezza della strada, che garantisce un ombreggiamento delle superfici pavimentate. Quindi la forma e la composizione materica dei tessuti edilizi urbani diviene importante nella risposta radiativa dell'ambiente. Si nota inoltre che, nel tessuto urbano denso, le celle gialle e verdi corrispondono alle zone dove vi sono aree vegetate nelle

quali vi è il connubio fra prato e specie arboree. Dove queste ultime sono più dense l'indice UHTI assume valori inferiori.

Il processo di pianificazione del prossimo futuro vede quindi a disposizione molti elementi e strumenti da tenere in considerazione nell'atto di ripensare la città. Tutte le componenti urbane sono qui chiamate in causa, nella loro composizione formale e materica, e nella giustapposizione con gli elementi naturali quali il verde e l'acqua.

Gli strumenti urbanistici operativi e di pianificazione del Comune di Prato risultano già indirizzati ad assimilare al meglio le buone pratiche che possono far rispondere al meglio il territorio comunale ai fenomeni estremi che vi permangono.

Il Piano Operativo, con la *Relazione Generale* e la *Relazione sulle Strategie per la Forestazione Urbana*, ben delinea gli obiettivi per la nuova visione della Città, le strategie operative da perseguire contemporaneamente con la Città Resiliente, lo Spazio Pubblico e le Infrastrutture verdi (sistema del verde) blu (sistema delle acque) e rosse (sistema infrastrutturale antropico, quindi mobilità, sistema degli scarichi urbani, rete viaria e ferroviaria, etc..), che rispettivamente compongono il quadro economico sociale e ambientale, quindi paesaggistico (*Action Plan per la Forestazione Urbana*). Ciascun elemento compositivo territoriale viene caratterizzato nei rispettivi benefits, e diviene uno strumento operativo poi suddiviso in abachi di azioni e interventi già in parte sperimentati e in costante corso di aggiornamento.

L'Action plan per la Forestazione urbana (figura 2) identifica ***sei strategie*** tramite cui perseguire e attuare la vision integrate sulla città che mira a migliorare la qualità della vita e il benessere fisiologico e psico fisico dei cittadini:

1. Parco fluviale e delle Gore - Il parco del Bisenzio e il reticolo idrografico capillare delle Gore

2**. Verde di mitigazione delle infrastrutture** - I filari alberati e le fasce di mitigazione delle infrastrutture stradali e ferroviarie

3. Verde capillare - Le piccole aree verdi interstiziali e la micro-regolazione nell'ambiente urbano

4. Suoli agricoli peri urbani e grandi parchi - I suoli agricoli peri-urbani e la nuova sinergia tra aree urbane, agricoltura e ambiente

5. Demineralizzazione urbana - Riduzione delle aree impermeabili e della contaminazione urbana attraverso processi di demineralizzazione e di rinaturalizzazione

6. Parco agricolo di cintura - La valorizzazione delle produzioni e delle filiere locali.

Tutte le componenti urbane (le strade, le piazze, il sistema del verde e delle acque, gli edifici e i materiali presenti) divengono un'occasione operativa di intervento con questo fine.

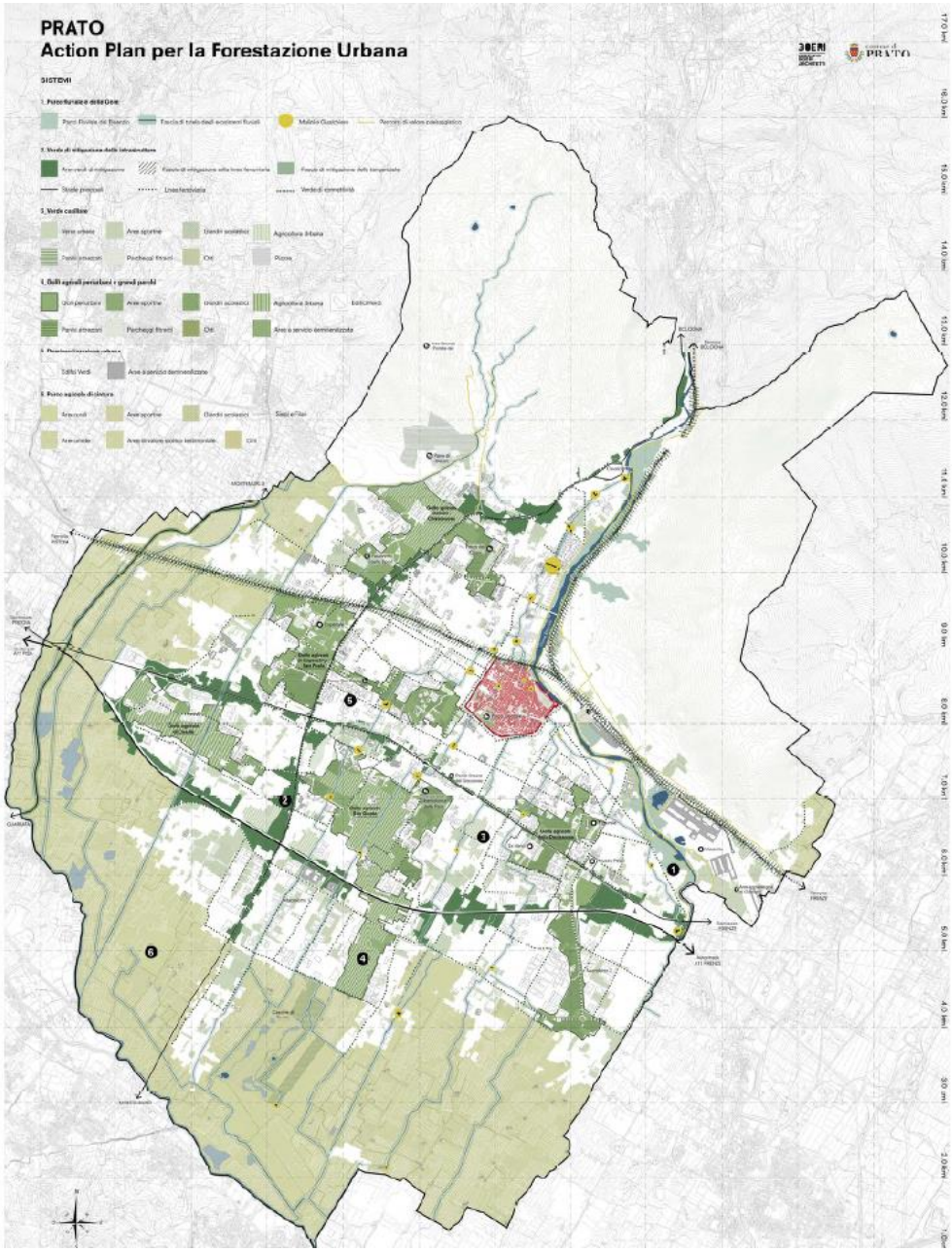


Figura 2. Tavola dell'Action Plan per la Forestazione Urbana, pag. 132 della *Relazione sulle Strategie per la Forestazione Urbana*.

Le varie strategie pensate con un approccio integrato arrivano a comporre una rete infrastrutturale "verde e blu" che amplifica e sistemizza le funzioni multiple del verde urbano e periurbano. Vengono individuati nodi strategici che compongono questa rete verde di percorsi e occasioni di comfort microclimatico che, con l'introduzione di soluzioni tecnologiche operative, influenzano gli scambi di temperatura e materia in prossimità delle superfici. Tali soluzioni, che prevedono il connubio fra una scelta di materiali con una riflessività alta, la vegetazione, e la permeabilità all'acqua delle superfici e dei materiali utilizzati (in modo da garantire i processi evaporativi ed evapotraspirativi delle superfici), prendono il nome di Nature Based Solution (NBS).

Le NBS risaltano per le loro specifiche peculiarità: la multifunzionalità, in quanto riescono a risolvere più problemi in un'unica soluzione, per un costo pari se non minore rispetto al costo che si sosterrebbe se si affrontasse ciascun problema singolarmente. Le NBS ci forniscono i servizi

ecosistemici, ovvero quei beni/servizi che sono prodotti dalla struttura o dalla funzione di un ecosistema, in combinazione con altri input, che contribuiscono al benessere nelle nostre città. Sono quindi strumenti nelle mani dei tecnici, dei progettisti e delle imprese, peraltro di base perfettamente in linea a livello concettuale con l'approccio integrato e multisettoriale su cui risulta importante impostare il Piano di Adattamento.

Le NBS sono normalmente composte da elementi naturali (alberi, arbusti, sistema delle acque) affiancati da tecnologie tradizionali e/o innovative finalizzate a integrarle al sistema territoriale antropico e naturale. Tali soluzioni sono in costante aggiornamento, tuttavia si possono sintetizzare nelle seguenti categorie:

1-Raccolta dell'acqua piovana

2-Tetti verdi

3-Sistemi di infiltrazione

4-Sistema di trattamento in proprietà privata

5-Dreni e trincee filtranti

6-Scarichi filtranti

7-Sistemi di bioritenzione (rain garden, pocket park)

8-Alberi

9-Pavimentazioni drenanti

10- Utilizzo di *cool material* su superfici orizzontali e verticali

11-Serbatoi di stoccaggio di attenuazione

12-Bacini di detenzione

13-Stagni e zone umide

Per la trattazione di dettaglio di queste categorie si rimanda ai manuali "**The SuDS Manual**" (Ballard et al., 2015) e "**Low Impact Development: a Design Manual for Urban Areas**" (Huber J., 2010).

Nel Piano Operativo si ritrovano queste soluzioni già declinate alle strategie operative selezionate. Inoltre, osservando la sintesi di Piano, si nota che le infrastrutture verdi divengono la trama trainante della rigenerazione della Città e del Territorio delineandosi in "Connessioni verdi", che vengono suddivise in ***Tipologie di forestazione***:

-**Foreste periurbane e boschi** (Foreste ripariali, Schermature lignee, Rinaturalizzazione agricola/urbana, Boschi produttivi, Oasi);

-**Parchi cittadini e foreste** (> 0.5 ha → Grandi parchi urbani, Parchi distrettuali parzialmente dotati di strutture per il tempo libero e ricreazione);

-**Piccoli parchi** (< 0.5 ha → Piccoli parchi distrettuali con aree attrezzate; Giardini privati; Spazi verdi);

-**Viali e piccole piazze** (Filari di alberi lineari; Piccoli gruppi di alberi; Singoli alberi in piazze; Alberi in aree parcheggio)

-**Altri spazi verdi alberati** (Terreni agricoli urbani; Terreni sportivi; Terreni vuoti; Prati; Aree ripariali; Aree aperte; Cimiteri; Giardini botanici)

-**Edifici verdi** (Tetti verdi; Tetti freddi; Facciate verdi)

Tale suddivisione tipologica della Forestazione Urbana viene guidata operativamente con tre Abachi: **l'Abaco delle Azioni**, **l'Abaco degli interventi sugli edifici** e **l'Abaco delle principali specie arboree**. Quest'ultimo suddivide le specie arboree e arbustive dettagliandole secondo le sei strategie dell'Action plan, in modo da indirizzare i tecnici e i professionisti che interverranno. Si elencano di seguito, senza definirle singolarmente, le azioni e gli interventi sugli edifici.

Abaco delle Azioni: 1.Bosco produttivo; 2. Area di protezione agro-ambientale; 3. Demineralizzazione dei suoli; 4.Compensazione per nuove edificazioni; 5. Mitigazione delle Infrastrutture; 6. Compensazione idraulica; 7. Corridoio Ecologico; 8. Fitodepurazione nelle zone agricole; 9. Densificazione in altezza e nuove aree verdi; 10. Utilizzo acqua di falda ad uso energetico; 11. Connessioni verdi.

Abaco degli interventi sugli edifici: 1. Bosco verticale; 2. Tetto verde praticabile (2.a. Tetto verde e pannelli fotovoltaici su edifici industriali; 2.b. Tetto verde e pannelli fotovoltaici su edifici residenziali); 3. Facciata continua verde (3.a. Griglia metallica e verde rampicante; 3.b. Doppia pelle metallica e verde); 4. Facciata vegetale.

Nei paragrafi successivi (Tema 3 modello Digital Twin) si approfondiranno tre aree al fine di analizzare nel dettaglio le tipologie urbane presenti nel territorio comunale, fino ad arrivare alla identificazione delle vulnerabilità presenti, e le possibili azioni di adattamento. Nel paragrafo degli hotspot si propone una metodologia che mira alla selezione della azioni di adattamento, che di fatto passa da una scelta politica, strettamente connessa alla vision della città.

Tema 2: assorbimento di carbonio

L' attività durante questo secondo anno si è concentrata sulla finalizzazione del sistema di calcolo descritto nella relazione precedente. Tutta la metodologia di calcolo ed i risultati relativi a diversi scenari di riforestazione urbana sono stati oggetto di una pubblicazione scientifica su rivista internazionale (Brilli et al. 2022. *An integrated approach to estimate how much urban afforestation can contribute to move towards carbon neutrality*, Science of the Total Environment) che viene allegata alla presente relazione (Allegato 1).

In sintesi i risultati principali sono stati:

- Le aree verdi dell'intero territorio comunale possono sequestrare 33.1 $ktCO_2\ yr^{-1}$. (migliaia di tonnellate CO_2 per anno)
- E' stata calcolata la capacità di sequestro di CO_2 derivante da 1911 diverse combinazioni di scenari di riforestazione, in termini di cambiamento di uso del suolo e di tipologia di specie arborea impiegata.
- I diversi scenari di riforestazione possono mitigare (offset capacity) le emissioni antropogeniche di CO_2 calcolate con metodi inventariali di una quantità da 8.1 a 11 %.
- Un Maggiore impiego di latifoglie aumenta la capacità di sequestro di CO_2.
- Le aree verdi urbane contribuiscono marginalmente a mitigare l'attuale impatto delle emissioni antropogeniche sul bilancio di CO_2 a scala urbana.

ABSTRACT:

Urban afforestation is considered a promising nature-climate solution that may contribute to achieve climate neutrality by 2050, since it can increase C-storage and C-sequestration, whilst providing further multiple ecosystem services for citizens. However, the quantification of the CO2 sequestration capacity that may be provided by an urban forest as well as the capacity to impact the city-level C-balance and offset anthropogenic emissions is a complex issue. Methodological approaches, quantity and quality of information contained in urban tree database, and the level of detail of the planned urban forest can strongly influence the estimation of C-sequestration potential offered by urban forests. In this work, an integrated framework based on emission inventory, tree species/morphology and ecosystem modelling has been proposed for the city of Prato, Italy, a representative medium size European city to: i) evaluate the current C-sequestration capacity of urban trees; ii) upscale such capacity with different afforestation scenarios, iii) compare the sink capacity offered by ecosystems with current and projected anthropogenic emissions. Results indicated that the green areas within the Municipality of Prato can sequester 33.1 ktCO2 yr−1 under actual conditions and 51.0 ktCO2 yr−1 under the afforestation scenario which maximize the CO2 sequestration capacity, offsetting the 7.1 % and 11 % of the total emissions (465.8 ktCO2 yr−1), respectively. This study proves that, in the various afforestation scenarios tested, the contribution of urban afforestation to the municipality carbon balance is negligible and that carbon neutrality can only be reached by the substantial decarbonization of emission sectors.

Tema 3: Modello Digital-Twin

Il comportamento bio-fisico del tessuto urbano, a partire dalla interazione ambientale superfici-edifici-vegetazione-irraggiamento-sorgenti emissive-atmosfera è di difficile comprensione ma di fondamentale importanza per l'implementazione di scenari e politiche di governance.
Lo sviluppo di uno strumento di simulazione in logica digital-twin, cioè un insieme di modelli in grado di simulare tutti i processi, si rende necessario per la comprensione e l'analisi di tutti gli effetti bio-fisici e morfologici di un ambiente urbano.
A tal fine si è scelto di operare con la modellistica Envi-met a scala urbanistica facendo un'analisi di aree rappresentative di tre diversi tessuti urbani (centro storico, residenziale e industriale) e dimensioni di circa 1 Km^2 (con una griglia di 5 m di risoluzione), ed i cui risultati possano essere trasposti a zone morfologicamente simili. La simulazione dell'intera città richiede risorse di calcolo al momento non disponibili. Il modello a questa scala permette di simulare l'interazione tra edificato, vegetazione urbana, reticolo stradale ed atmosfera, andando quindi a costituire uno strumento di pianificazione e governance.
Le aree di studio su cui è stata effettuata la simulazione con il software ENVI-met sono state selezionate in coordinamento con l'Ufficio Tecnico del Comune di Prato, assumendole come indicative dei tessuti urbani esistenti, al fine di ottenere la rappresentazione "tipo" del comportamento microclimatico di ciascun tessuto rispetto alla struttura e morfologia delle rispettive componenti urbane espresse tramite: la densità dell'edificato, larghezza delle strade, i materiali che costituiscono tali componenti, la vegetazione presente. Le aree identificate sono riportate in Figura 3.

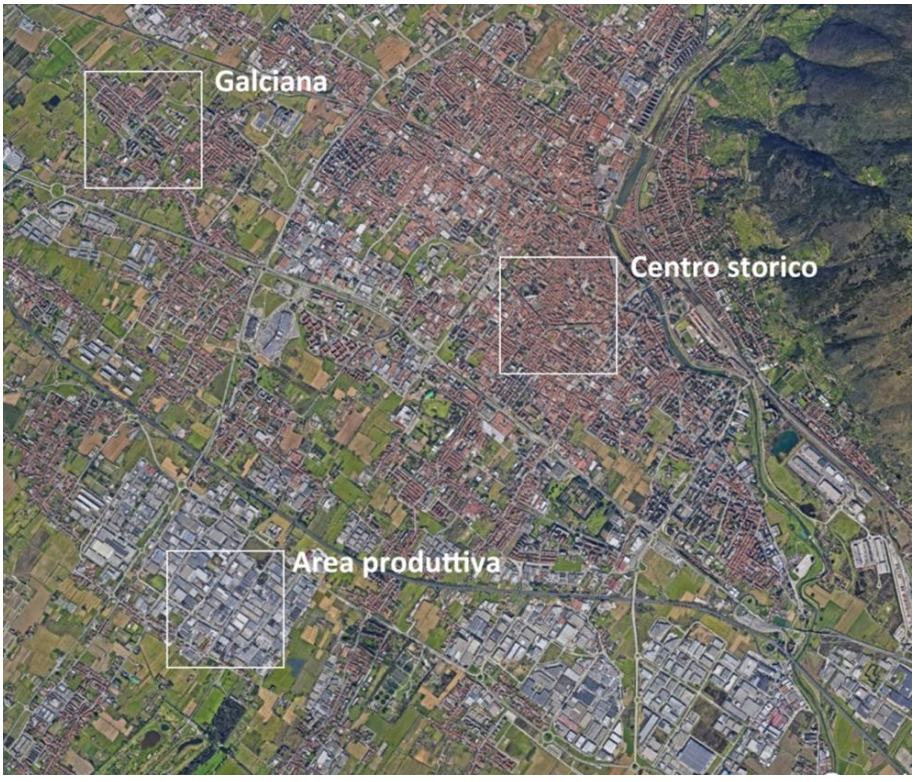


Figura 3. Geolocalizzazione delle tre aree di studio del comune di Prato simulate con il modello Envi-met

L'area centro storico nell'ambito della Tavola ES4 - Sistemi e Subsistemi territoriali del Piano Strutturale online ricade nel "Sistema 3 – Il centro storico", ed è caratterizzata nella sua estensione da due tipi di tessuti: il primo tessuto denso e compatto, costituito da slarghi e piazze principali, prevalentemente mineralizzato, che rappresenta la parte più storica; il secondo tipo di tessuto, verso sud, che comprende un tessuto più misto con una morfologia meno densa rispetto al centro. L'area produttiva selezionata ricade nel "Sistema 7 – I Macrolotti" della Tavola ES4 - Sistemi e Subsistemi territoriali e, confrontando il suo tessuto produttivo con gli altri presenti sul territorio, si può ritenere descrittiva sia a livello di morfologia, di tessitura e di rapporto fra le componenti urbane. Per rappresentare un borgo tipico è stata selezionata l'area Galciana, che ricade nel "Sistema 5 – I borghi" per l'appunto. Tale area infatti contiene al suo interno diversi tessuti tipologici fra quelli descritti e analizzati nel dettaglio nella relazione del Piano relativa alla "Metodologia di individuazione puntuale dei morfotipi urbani nel territorio pratese", descrittrice dei morfotipi delle urbanizzazioni contemporanee esistenti. Nello specifico tali tessuti sono: tessuto ad isolato compatto, tessuto produttivo commerciale o direzionale, tessuto storico con mix di funzioni a bassa densità, tessuto di origine storica con funzione produttiva, tessuto lineare lungo strada di formazione prevalentemente recente a bassa-media densità.

Queste tre aree sono state simulate con il modello fluidodinamico Envi-met al fine di avere un'analisi microclimatica fluidodinamica di tre differenti aree per poter ottenere la mappa a scala comunale. ENVI-met (http://www.envi-met.com/) è un modello microclimatico tridimensionale non idrostatico (Bruse and Fleer, 1998) in grado di simulare le interazioni superficie-pianta-aria in ambiente urbano con una risoluzione spaziali di 0.5-10 m e una risoluzione temporale di 10 sec. È un modello fluidodinamico in grado di simulare diverse variabili, tra cui il flusso intorno e tra gli edifici, i processi di scambio di calore e vapore sia alla superficie del suolo che dei muri, gli scambi turbolenti, alcuni parametri della vegetazione, la bioclimatologia e la dispersione di particelle. Il modello ENVI-met può essere utilizzato per diversi scopi al fine di studiare e comprendere diversi aspetti dei canyon urbani come gli effetti di orientamento e rapporto edifici/verde sul comfort urbano outdoor, il ruolo della vegetazione per la mitigazione dell'isola di calore urbana, ecc.

I dati di input necessari per far girare ENVI-met sono costituiti dalla descrizione dettagliata del suolo (asfalto, erba, terreno nudo, acqua, etc..), degli edifici (localizzazione, dimensioni), vegetazione (presenza di alberi, altezza e specie) e delle condizioni atmosferiche iniziali. Attraverso l'interfaccia grafica si inserisce l'orografia e le condizioni meteo iniziali in termini di velocità e direzione del vento a 10 m, temperatura dell'aria e umidità relativa (valori massimo e minimo).

I risultati delle simulazioni possono mostrare gli effetti di come le soluzioni architettoniche, le tecnologie sostenibili, l'uso del verde e dell'acqua, consentono di migliorare le condizioni microclimatiche outdoor.

È stato scelto di simulare le condizioni microclimatiche per la giornata con la temperatura massima registrata durante l'ondata di calore dell'estate 2019. A tal fine è stata effettuata un'analisi dei dati di velocità e direzione del vento disponibili (2018-2019) al fine di caratterizzare la città da un punto di vista anemologico e ad andare a considerare il vento tipico medio dell'area urbana (Figura 4). La direzione prevalente del vento durante il periodo estivo risulta essere Est-Nord-Est con velocità del vento comprese tra 1 e 2 m/s.

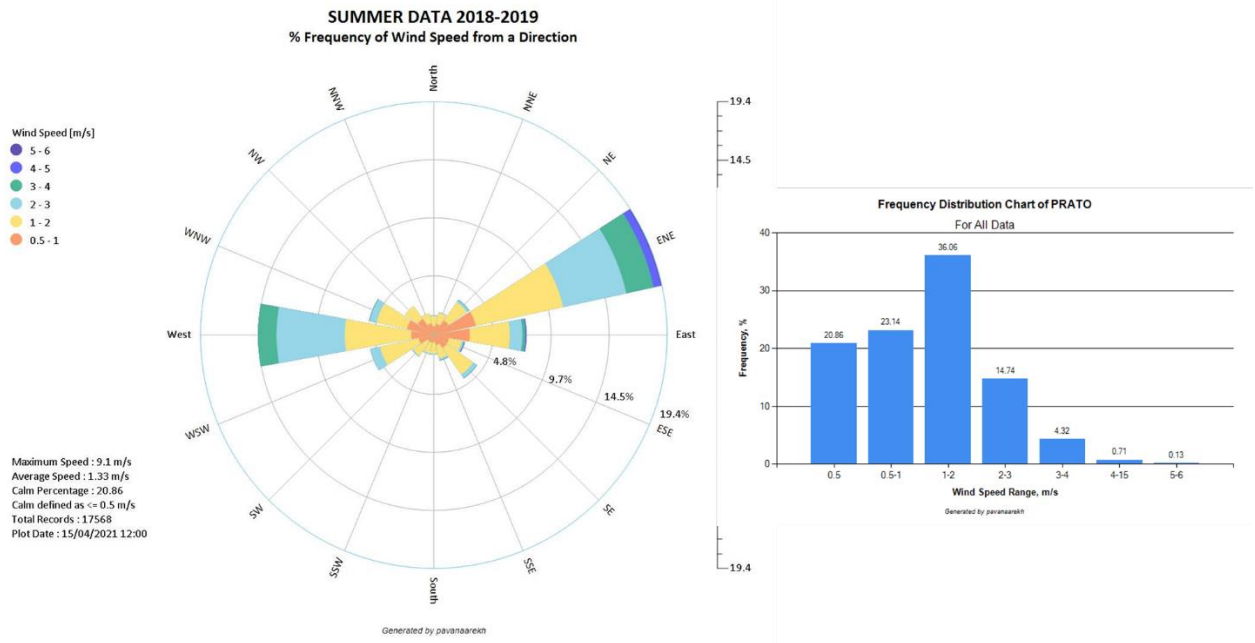


Figura 4. Rosa dei venti per la città di Prato durante il periodo estivo (2018-2019) e relativa frequenza delle velocità del vento per ogni settore.

Per la giornata del 25 luglio 2019 si è quindi inizializzato il modello con i seguenti dati meteorologici:

- velocità vento: 2.0 m/s;
- direzione del vento:70 ° da Nord;
- Temperatura massima: 39.75 °C alle ore 14:00;
- Temperatura minima: 24.07 °C alle ora 4:00;
- Umidità relativa massima: 58% alle ore 04:00;
- Umidità relativa minima: 15% alle ore 14:00.

L'orografia delle varie aree comprendente palazzi, vegetazione e uso del suolo è stata inserita nel modello Envi-met per tutte le tre aree considerate e nelle Figure 5-7 sono riportate l'immagine di Google Earth, le coperture degli edifici e i materiali utilizzati per le superfici.

La modellizzazione 3D di vegetazione e edifici è riportata nella Figura 8. Il modello ha girato per 36 ore al fine di avere l'evoluzione della fluidodinamica per una giornata considerando le ore iniziali poco stabili dal punto di vista numerico.

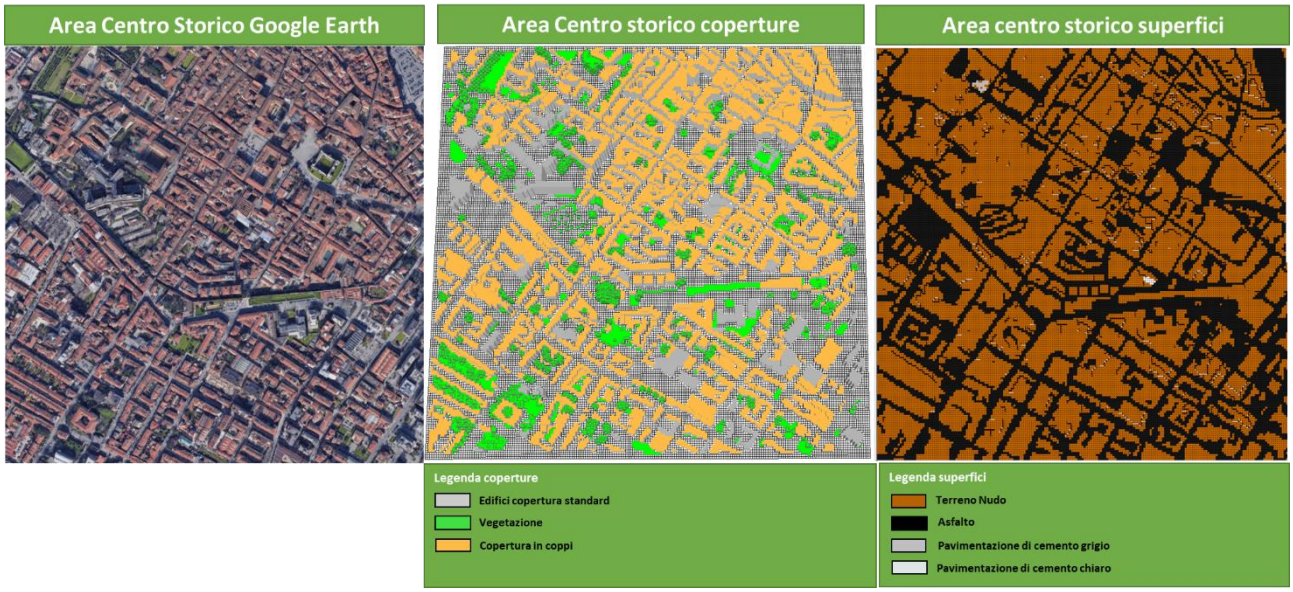


Figura 5. Immagine Google Earth, coperture degli edifici e materiali alla superficie per l'area centro storico.

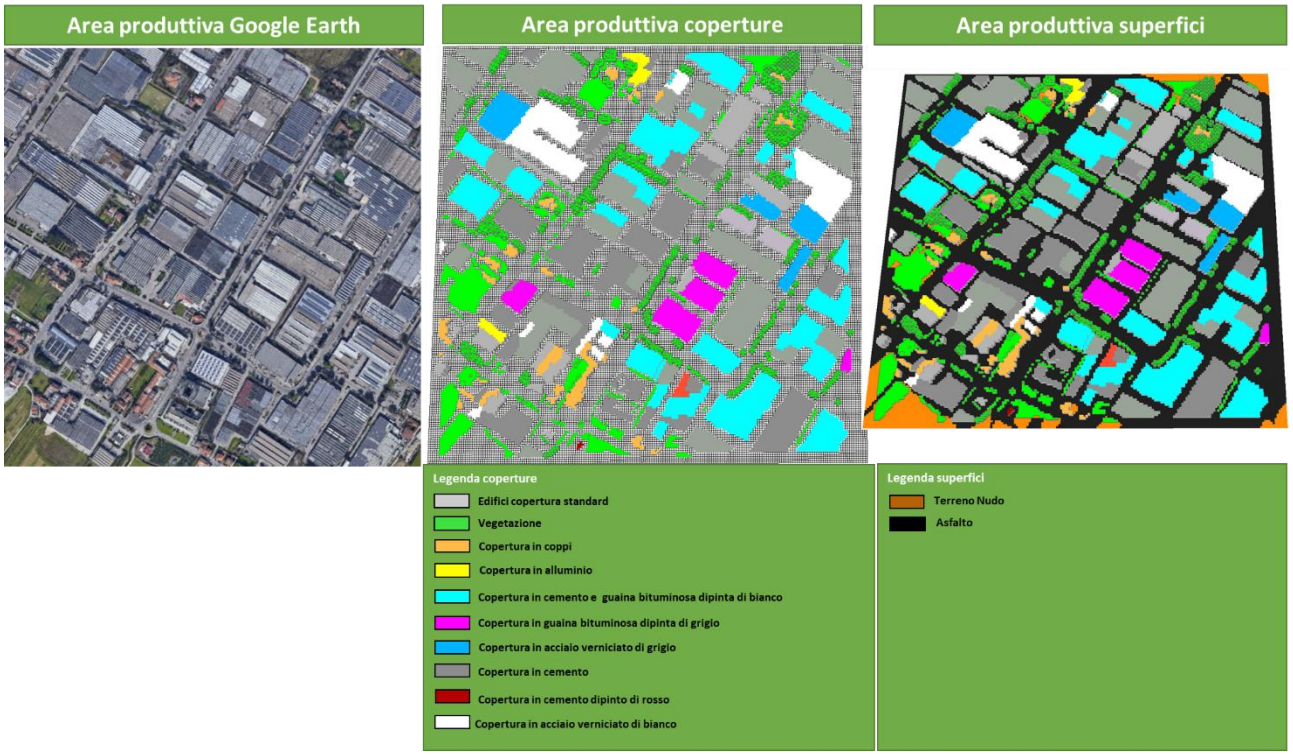


Figura 6. Immagine Google Earth, coperture degli edifici e materiali alla superficie per l'area produttiva.

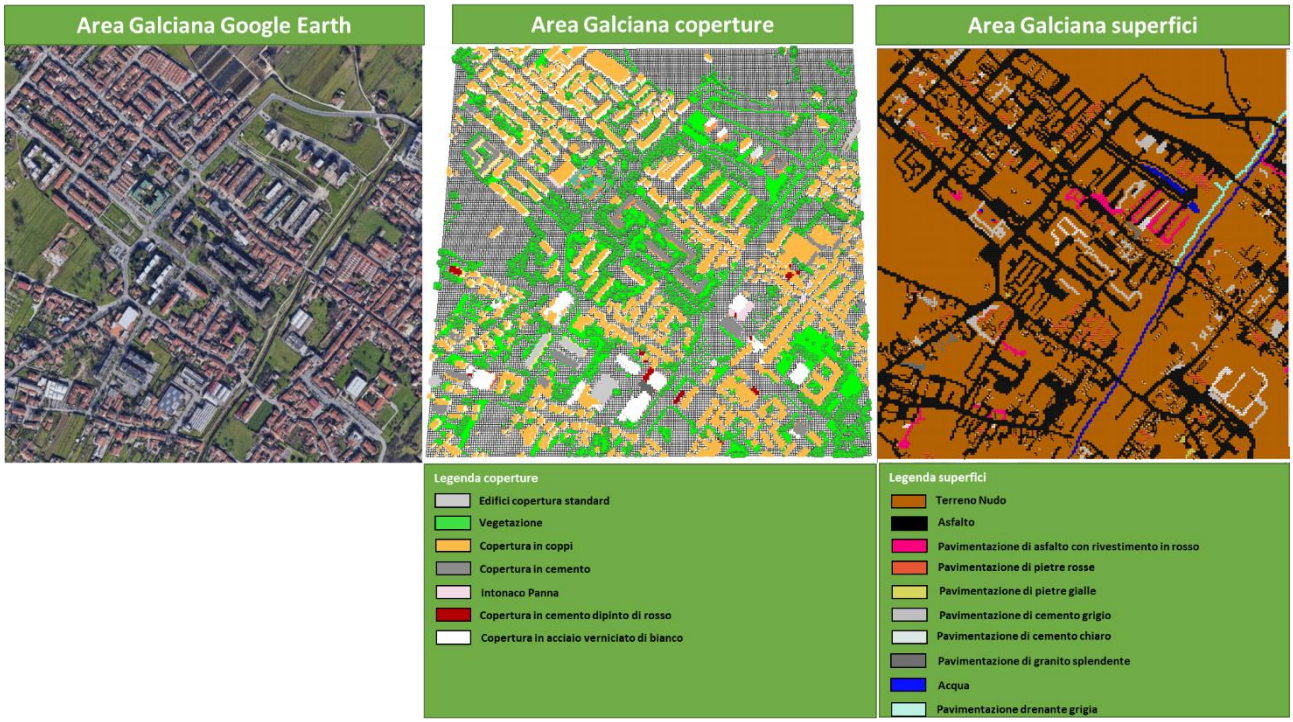


Figura 7. Immagine Google Earth, coperture degli edifici e materiali alla superficie per l'area centro Galciana.

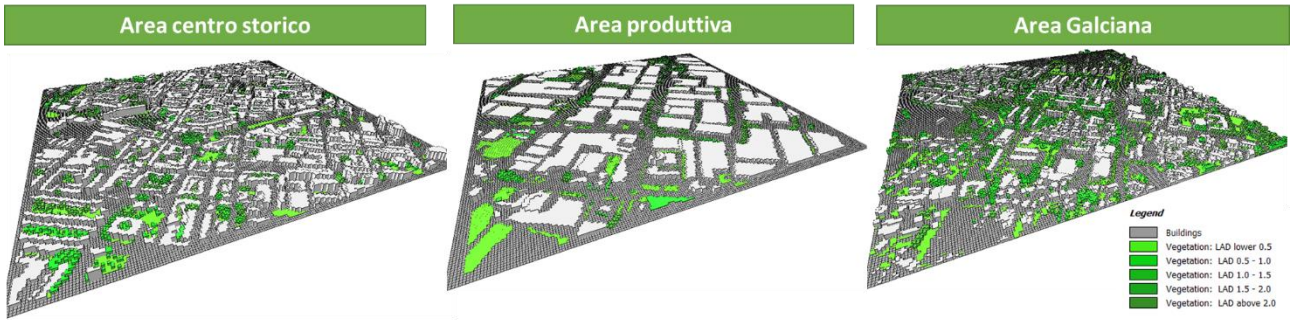


Figura 8. Modellizzazione 3D con vegetazione ed edifici delle tre aree inserite nel modello Envi-met.

Le mappe delle varie variabili superficiali e atmosferiche vengono estratte dopo la simulazione e in Figura 9 e 10 sono riportate le mappe della temperatura dell'aria per le ore 14:00 e le ore 2:00 a 1.8 m di altezza (altezza uomo). Usando la stessa scala di valori di temperatura (tra 36.2°C e 40.75°C per le ore 14:00 e 26.8°C e 30.4°C alle ore 2:00) è possibile confrontare le tre aree tra loro: si evidenzia subito come l'area produttiva risulta essere quella che si scalda maggiormente durante le ore diurne mentre il centro storico, grazie all'effetto ombra degli edifici, risulta essere quella a temperatura minore. L'area di Galciana è una zona residenziale con presenza di verde e questo influisce sul risultato ottenuto: zone piuttosto calde dove si ha irraggiamento diretto rispetto a zone con temperature minori per effetto dell'ombra di alberi e edifici. Le aree di colore fucsia ai margini non sono rappresentative per gli errori di bordo caratterizzanti il modello. Per ogni singola area poi è possibile andare ad identificare le zone di "tasche d'aria calde" al fine di comprendere in quali punti intervenire per mitigare l'isola di calore urbana durante un'ondata di calore estiva.



Figura 9. Temperatura dell'aria a 1.8 m di altezza alle ore 14 simulata nelle tre aree inserite nel modello Envi-met.

Durante la notte si sviluppa la così detta isola di calore urbana dovuta al fatto che le superfici impermeabilizzate rilasciano tutto il calore accumulato durante il giorno. La mappa alle ore 2:00 mostra chiaramente la forma e l'intensità di questa isola di calore soprattutto nel centro storico e nell'area produttiva che sono le zone nelle quali questo effetto è più intenso. Per l'area Galciana le zone di "aria calda" sono in prossimità degli edifici più densi mentre le aree più aperte e con presenza di vegetazione restano a temperature minori.



Figura 10. Temperatura dell'aria a 1.8 m di altezza alle ore 2:00 simulata nelle tre aree inserite nel modello Envi-met.

Il vettore velocità del vento può essere visualizzato attraverso delle frecce dove la lunghezza rappresenta l'intensità del vento, mentre l'angolo la direzione del vento. La velocità del vento è dovuta principalmente alle condizioni climatiche locali (venti prevalenti) e alle caratteristiche microclimatiche locali (stratificazione di masse d'aria con diverse temperature e pressione).

Al fine di comprendere come il vento si incanala nel tessuto urbano considerato riportiamo la temperatura dell'aria e la velocità del vento delle singole aree durante il giorno e durante la notte.

Per il centro storico (Figura 11) è interessante osservare come durante il giorno la massa d'aria che proviene da Est (vento prevalente) si incanala nell'area più aperta, ovvero dove non vi sono edifici, andando a scaldare la strada (Via Pomeria) e il centro dell'incrocio. Lo stesso effetto si ha anche per il Viale Piave. Durante la notte l'effetto è opposto in quanto queste due aree hanno accumulato meno calore durante il giorno grazie all'effetto di incanalamento del vento.

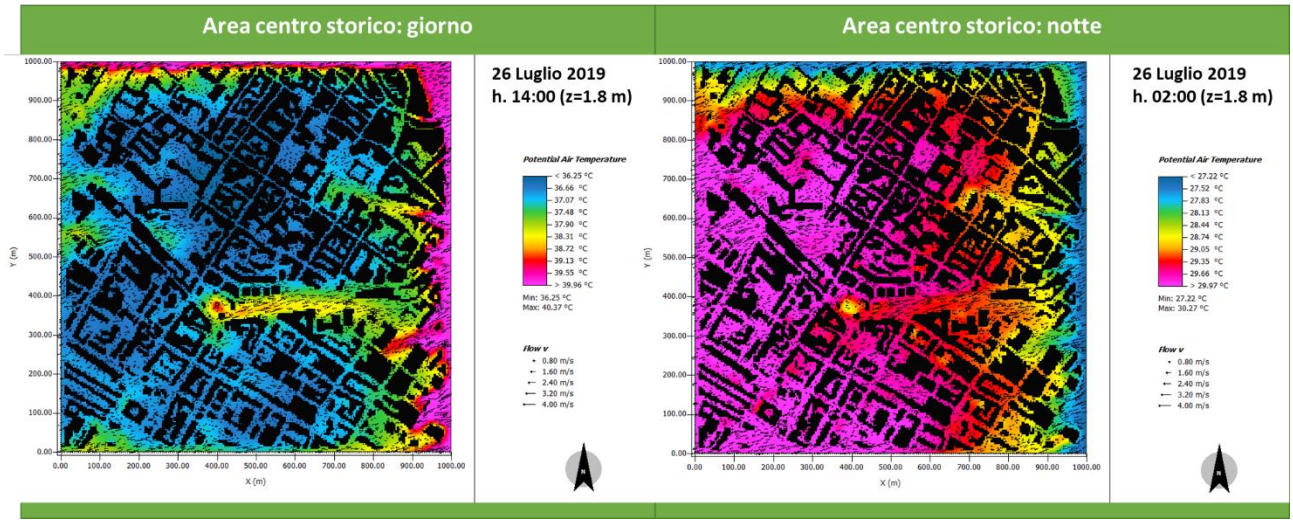


Figura 11. Temperatura dell'aria a 1.8 m di altezza e vettore velocità del vento alle ore 14:00 e alle 2:00 simulata nell'area del centro storico.

Per l'area produttiva la stessa analisi è riportata in Figura 12.

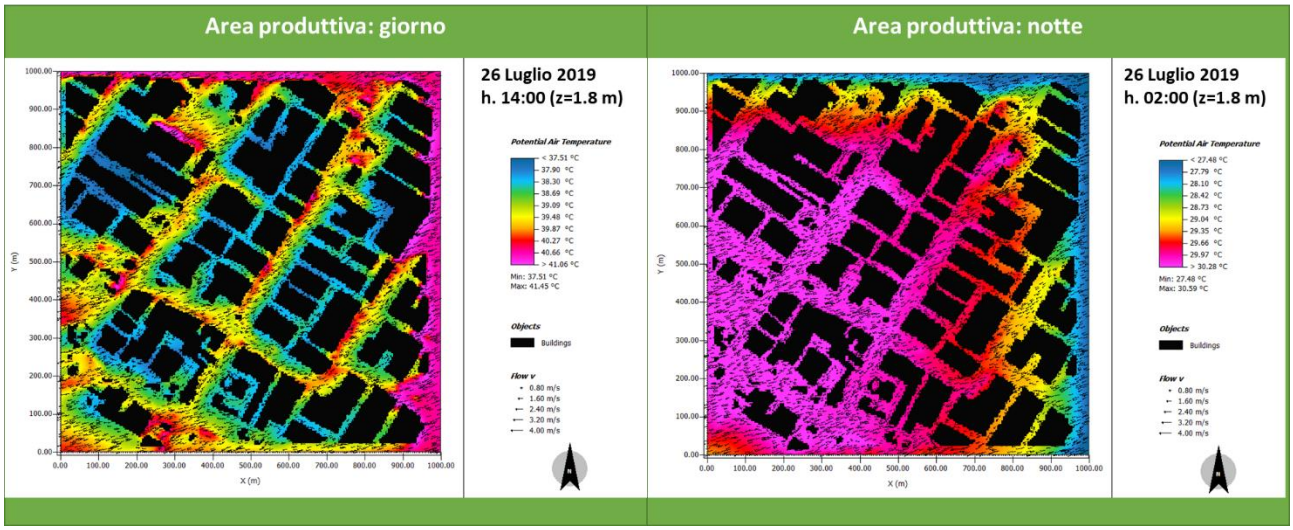


Figura 12. Temperatura dell'aria a 1.8 m di altezza e vettore velocità del vento alle ore 14:00 e alle 2:00 simulata nell'area produttiva.

Quest'area è caratterizzata dalle temperature maggiori durante questa ondata di calore a causa del tessuto urbano quasi tutto impermeabilizzato. Durante il giorno il flusso del vento tende a scaldare maggiormente le zone esposte a Sud Est sia per la l'esposizione ma anche per l'afflusso di aria calda.

Durante la notte l'area presenta un estesa isola di calore anche nelle aree più aperte dove il vento può fluire senza ostacoli.

L'area di Galciana, infine, durante il giorno mostra zone in ombra a minor temperatura e le aree a suolo nudo che si scaldano maggiormente: anche se siamo in presenta di terreno nudo permeabile il calore trasferito all'atmosfera è comunque elevato in quanto la mancanza di vegetazione, o le colture agricole erbacee, fanno sì che l'evapotraspirazione sia insufficiente per ridurre la quantità di calore che produce riscaldamento. Il vento in quest'area riesce a evolversi con velocità maggiori in

quanto vi sono aree più aperte e meno ostacoli presenti: l'effetto si vede durante le ore notturne quando in queste aree la temperatura notturna presenta le temperature minori (Figura 13).

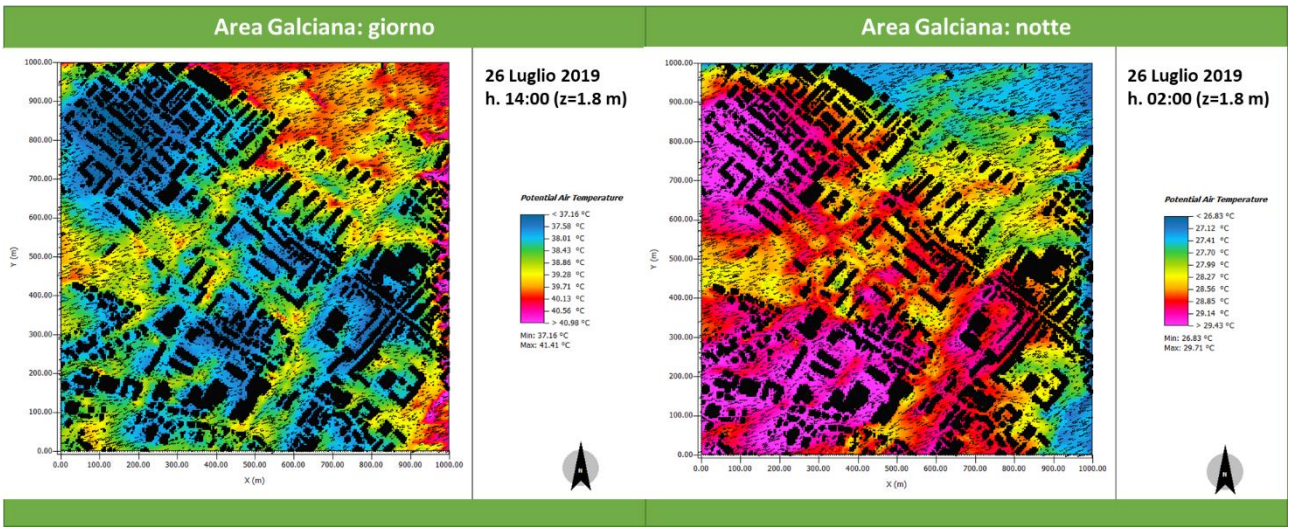


Figura 13. Temperatura dell'aria a 1.8 m di altezza e vettore velocità del vento alle ore 14:00 e alle 2:00 simulata nell'area Galciana.

I risultati tra giorno e notte mostrano chiaramente come il comportamento durante un'ondata di calore delle aree urbane sia diverso sia tra i due periodi temporali, ma anche tra le varie zone: in un centro abitato sicuramente la notte ha importanza quando si vuole intervenire per mitigare questo effetto, mente nella zona produttiva, frequentata maggiormente durante il giorno, occorre tenere in considerazione i risultati diurni.

La temperatura superficiale esprime la temperatura con la quale la superficie scambia energia, per irraggiamento, con l'ambiente circostante. È influenzata dalle proprietà radiative (riflettanza, riflessione, assorbimento e albedo) e dalla emissività dei materiali della superficie che si sta considerando.

La mappa dei valori di temperatura superficiale per le tre aree alle 14:00 (Figura 14) mostra che vengono raggiunti valori superiori ai 55 °C nelle superfici asfaltate mentre sulla vegetazione e acqua i valori restano intorno ai 35 °C. Si distinguono chiaramente le aree vegetate da quelle non vegetate ed è interessante osservare come il terreno nudo presenti comunque un'elevata temperatura (intorno ai 50 °C) a dimostrazione che anche se non asfaltata un'area senza vegetazione emette tantissimo calore. Questa variabile dimostra chiaramente quanto sia di fondamentale importanza sia l'utilizzo di "*cool material*" nelle aree pavimentate e nelle pareti e tetti degli edifici quando non è possibile effettuare un "*desealing*" delle aree impermeabili, sia la messa a dimora di vegetazione.



Figura 14. Temperatura superficiale alle ore 14:00 simulata nelle tre aree inserite nel modello Envi-met.

La temperatura fisiologica equivalente (PET) equivale alla temperatura dell'aria alla quale, in un ambiente interno (senza vento e radiazione solare diretta), il bilancio termico del corpo umano tra la temperatura interna e quella della pelle è equilibrato alle condizioni assegnate. Questo indice permette ad una persona ferma di confrontare gli effetti integrali di condizioni termiche complesse dell'esterno con la propria esperienza in ambienti chiusi.

Per valori standard dei parametri di un corpo umano (altezza=1.75m, peso=75kg, età=35anni, insolazione statica dei vestiti= 0.90, velocità del cammino= 1.21 m/s) e i valori ottenuti dal modello Envi-Met di temperatura dell'aria, temperatura radiante, velocità del vento e umidità specifica la variabile PET può essere calcolata in ogni punto delle aree considerate per tutte le ore del giorno.

In generale a seconda di questo valore si ha una sensazione di caldo o freddo da parte dell'essere umano (comfort termico) riportato in Tabella 1.

PET physiological effective temperature

PMV	PET (°C)	Thermal perception	Grade of physiological stress
		Very cold	Extreme cold stress
−3.5	4	Cold	Strong cold stress
−2.5	8	Cool	Moderate cold stress
−1.5	13	Slightly cool	Slight cold stress
−0.5	18	Comfortable	No thermal stress
0.5	23	Slightly warm	Slight heat stress
1.5	29	Warm	Moderate heat stress
2.5	35	Hot	Strong heat stress
3.5	41	Very hot	Extreme heat stress

Tabella 1. Valori del PMV (Predicted Mean Vote) e della PET (temperatura fisiologica equivalente) e sensazioni della percezione termica e del grado di stress fisiologico

Il valore della PET per le tre aree durante il giorno alle ore 14:00 è riportato in Figura 15: si può notare che il valore per le aree si aggira intorno ai 50 °C e per l'area produttiva anche 55°C che rappresentano un dis-comfort termico molto alto per l'essere umano. In centro storico e in Galciana si hanno zone con valori di PET minori dovuti all'ombra degli edifici e alla vegetazione presente. Valori estremi sono relativi alla prossimità degli edifici che sono irradiati direttamente (esposizione verso Sud) a causa dei materiali presenti. Le aree a minor temperatura, soprattutto in area Galciana, (verde/blu) sono relative alla vegetazione.



Figura 15. Temperatura fisiologica equivalente (PET) dell'aria a 1.8 m di altezza alle ore 14:00 simulata nelle tre aree inserite nel modello Envi-met.

Durante la notte (Figura 16) il valore della PET si aggira intorno ai 22-27 °C che è indice di una percezione termica di leggermente caldo con leggero stress verso uno stress moderato per i valori maggiori di 29°C. Anche in questo caso le tre aree appaiono diverse in termini di stress termico in quanto l'area produttiva ha valori sostanzialmente maggiori di PET e le aree centro storico e Galciana presentano valori più elevati in prossimità degli edifici a causa del rilascio termico notturno delle aree impermeabili.

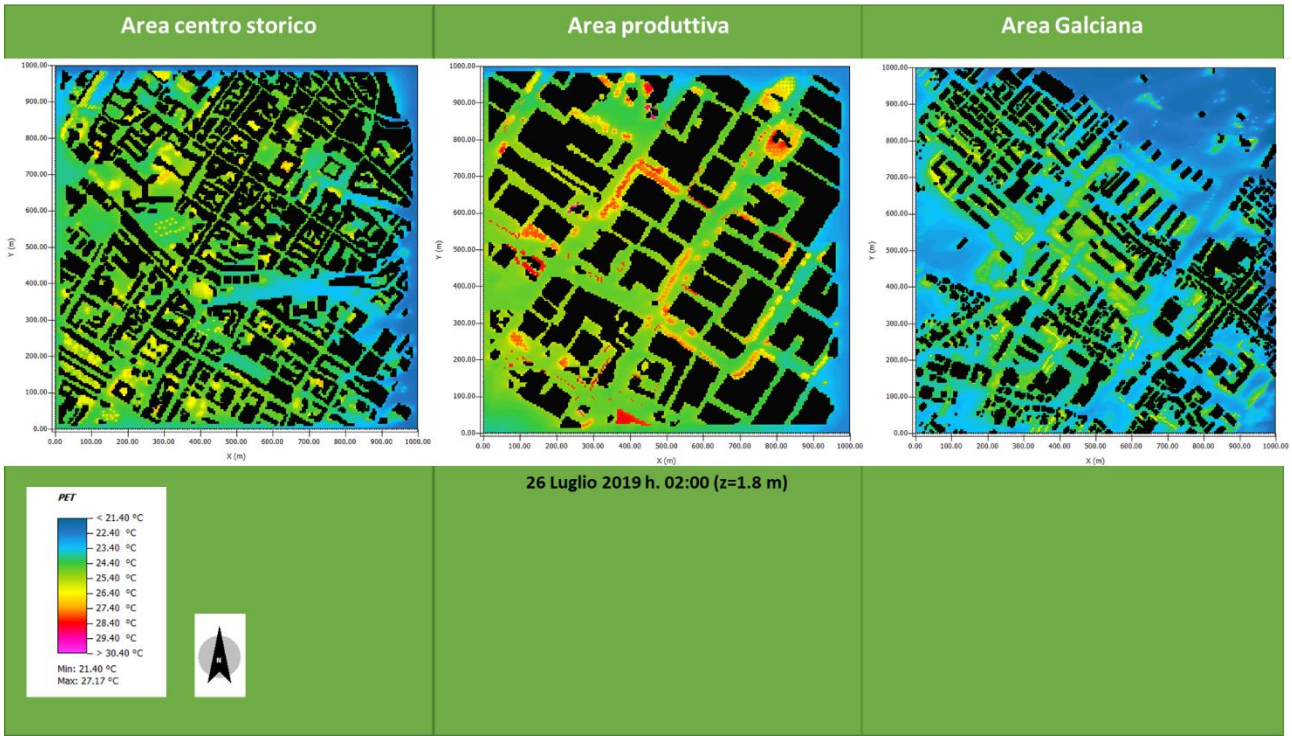


Figura 16. Temperatura fisiologica equivalente (PET) dell'aria a 1.8 m di altezza alle ore 02:00 simulata nelle tre aree inserite nel modello Envi-met.

3.1. Hot spot a scala urbanistica

L'obiettivo di questo capitolo è analizzare le aree maggiormente vulnerabili nelle tre aree simulate in Envi-met al fine di identificare possibili azioni di rigenerazione urbana alla scala di quartiere, tenendo conto di quanto già prevede la *Strategia del Piano Operativo* approvato nel 2019 nella *Disciplina dei suoli e degli insediamenti*, così da aprire un ragionamento operativo per comprendere a quali vulnerabilità dare la precedenza.

Il Piano Operativo è strutturato a livello strategico secondo un approccio integrato fra i Piani settoriali che operano sul territorio urbanizzato e rurale, e fra i temi salienti della promozione della qualità territoriale rientra appieno la mitigazione dell'isola di calore urbana accoppiata a fenomeno ondata di calore, al fine di conseguire il benessere psicofisiologico di cittadini e *cityuser* (parallelamente al miglioramento dei sistemi acque, acustico, di tasso di inquinamento, sismico, etc..). Lo spazio, che sia urbano o rurale, viene visto come nella sua immagine complessiva di qualità, per la quale ogni singolo intervento (sia pubblico che privato) può diventare performante rispetto al contributo che può dare a livello urbano (*Relazione generale* del Piano Operativo PRATO approvato). Quindi alla rete di infrastrutture viarie e ciclabili esistenti si affianca la rete verde di connettività "*costituita da fasce di forestazione lineare previste in aree ad alto tasso di urbanizzazione, in aree industriali e nelle grandi arterie stradali*". Il verde viene considerato non solo per la sua funzione paesaggistica ed estetica, ma anche per la sua funzione ecofisiologica, indispensabile come elemento equilibratore degli scambi termici nel contesto urbano.

Seguendo il *file rouge* del Piano si ipotizza di ragionare sulle aree pubbliche, in cui il Comune può fare interventi diretti in quanto di esclusiva competenza comunale, oppure in aree dove intervengono/interverranno soggetti privati coi quali il Comune stipula accordi come previsto da

legislazione vigente. Il Piano identifica quindi un margine ampio di azione nel breve e lungo periodo nella cosiddetta ***Strategia della CITTA' PUBBLICA*** e dello **spazio pubblico** che comprende: aree per l'istruzione; aree per attrezzature di interesse comune; aree per spazi e parcheggi pubblici; aree per spazi pubblici attrezzati a parco e per il gioco e lo sport.

In questi spazi si mira a garantire e migliorare l'accessibilità, la fruibilità e la sosta, quest'ultima anche da un punto di vista di benessere microclimatico, soprattutto in un'ottica di mobilità lenta (pedoni e ciclisti). Tale strategia in stretta sinergia con ***la Strategia di Forestazione Urbana*** e ***la Strategia di Demineralizzazione***, identificano una rete integrata di potenziamento delle infrastrutture verdi e blu nel territorio comunale, che si sintetizza nella seguente tavola (Figura 17).

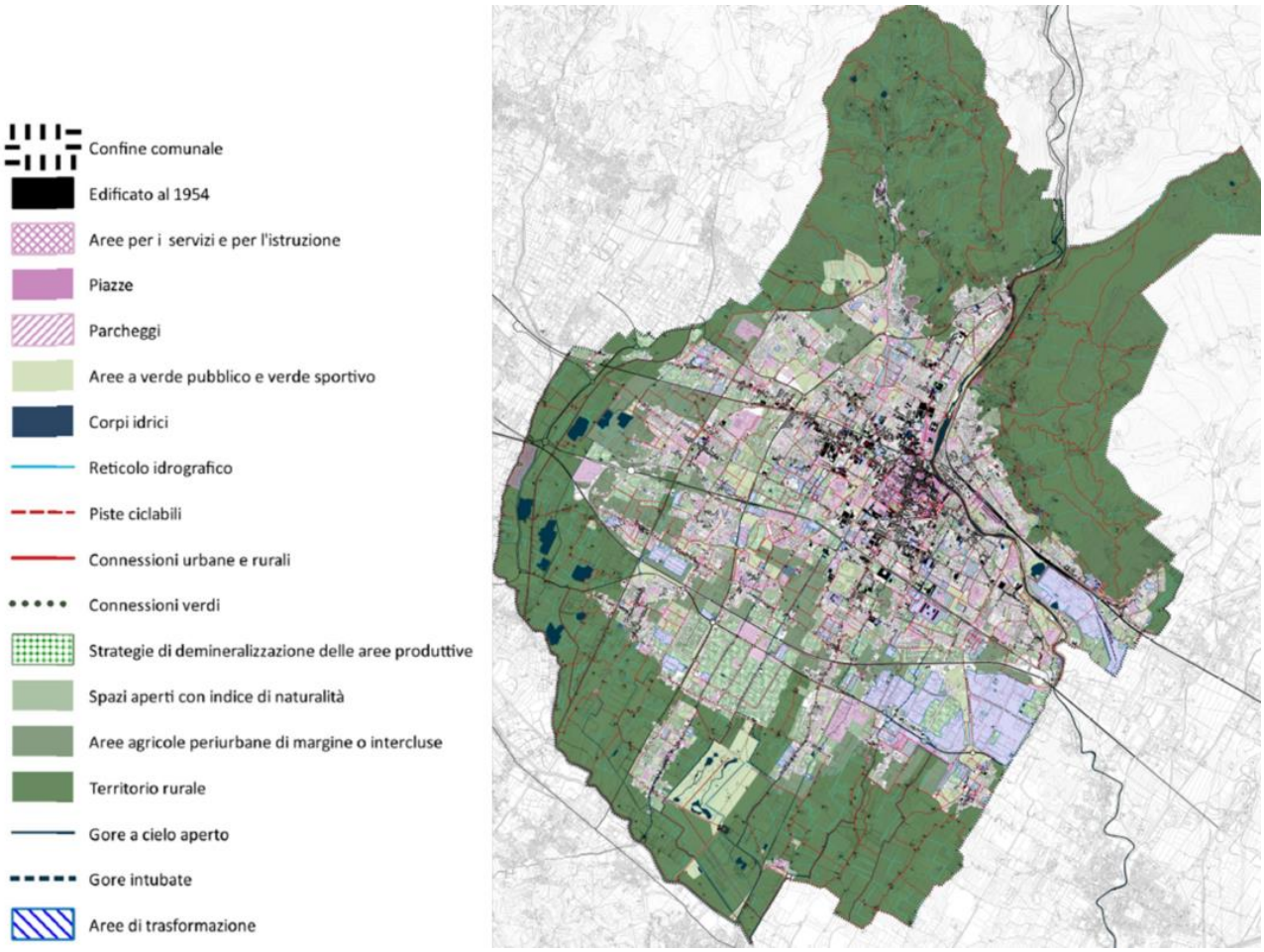


Figura 17. Tavola Unica del Piano Operativo Prato – Strategie del Piano – Sintesi – Approvazione 2019, elaborazione 09.F. https://www.comune.prato.it/it/lavoro/urbanistica/piano-operativo/pagina1057.html

Nelle aree pubbliche (giardini, strade, piazze, edifici pubblici, scuole, etc..), nei luoghi dei servizi e di aggregazione (quali per esempio farmacie, centri sociali per anziani, le parrocchie, i punti URP, i poliambulatori, le associazioni di volontariato, etc..), il Piano fa intravvedere delle opportunità da un punto di vista operativo, al fine di impostare delle azioni concrete, in quanto luoghi che le fasce deboli e il resto della popolazione frequentano abitualmente.

Quindi nelle tre aree oggetto di approfondimento sono state evidenziate le vulnerabilità di questi luoghi e spazi e, dove presenti, indicate delle opportunità derivanti dalla vicinanza di elementi

naturali/ambientali che potrebbero essere potenziate tramite le azioni, così come sono stati identificati possibili rischi o problematiche presenti. Si parte dall'assunto che strutturare le azioni ponendo in sicurezza microclimatica/fisiologica le fasce deboli garantisca la messa in sicurezza di tutti i cittadini in genere. Per tale ragione ***la vulnerabilità è definita dalla presenza di una temperatura elevata e contemporaneamente da una destinazione d'uso degli edifici in prossimità corrispondente a tutte quelle destinazioni più frequentate dalle fasce deboli***.

Successivamente, in base a quanto è emerso dall'analisi dei punti vulnerabili, tenendo in considerazione gli obiettivi del Piano Operativo relativamente al microclima, si sono declinate le **possibili strategie di adattamento locale e azioni**, delle quali è stata fatta una panoramica nel capitolo 1.4 (*Individuazione di un set di strategie percorribili per l'adattamento e la mitigazione agli eventi estremi e ai cambiamenti climatici / Selezione delle strategie operative per la definizione di un percorso di adattamento*), che di seguito si ripropongono come elenco numerato, in quanto tali numeri saranno presentati in maniera sintetica a titolo di suggerimento per ciascuna vulnerabilità. In merito si propone come nuova strategia di adattamento la realizzazione di percorsi di sicurezza e/o di aree/punti di ristoro dal punto di vista del benessere fisiologico. Per ***percorsi di sicurezza*** si intendono dei percorsi che permettano alle fasce deboli di raggiungere gli spazi e i servizi di interesse in condizioni di comfort climatico. Sulla medesima linea concettuale per aree/punti di ristoro si intendono quegli spazi più o meno circoscritti che garantiscano alle fasce deboli una sosta in condizioni di comfort microclimatico.

1-Raccolta dell'acqua piovana

2-Tetti verdi

3-Sistemi di infiltrazione

4-Sistema di trattamento in proprietà privata

5-Dreni e trinceee filtranti

6-Scarichi filtranti

7-Sistemi di bioritenzione (rain garden, pocket park)

8-Alberi

9-Pavimentazioni drenanti

10- Utilizzo di Cool material su superfici orizzontali e verticali

11-Serbatoi di stoccaggio di attenuazione

12-Bacini di detenzione

13-Stagni e zone umide

14-Percorsi a pergolato (di sicurezza)

Va tenuto in considerazione che le soluzioni suddette non vogliono essere esaustive, considerato il fatto che, come ogni intervento operativo, vanno declinate di volta in volta nelle componenti urbane e integrate con le tecnologie, che ad oggi sappiamo evolversi rapidamente.

Riassumendo, in base alla strategia su esplicitata, si riporta di seguito una metodologia ragionata che mira alla identificazione delle vulnerabilità, delle possibili soluzioni, alla realizzazione delle azioni più adeguate, e al monitoraggio delle azioni di mitigazione, applicabile in ogni area tipo:

***A**- L'identificazione delle vulnerabilità di luoghi e spazi di aggregazione delle fasce deboli di proprietà comunale e di interesse pubblico.*

***B**- Il rilevamento di elementi naturali/ambientali o condizioni particolari (anche di rischio) in prossimità.*

***C**- La selezione delle azioni che mitighino il problema fisiologico climatico nei punti vulnerabili identificati.*

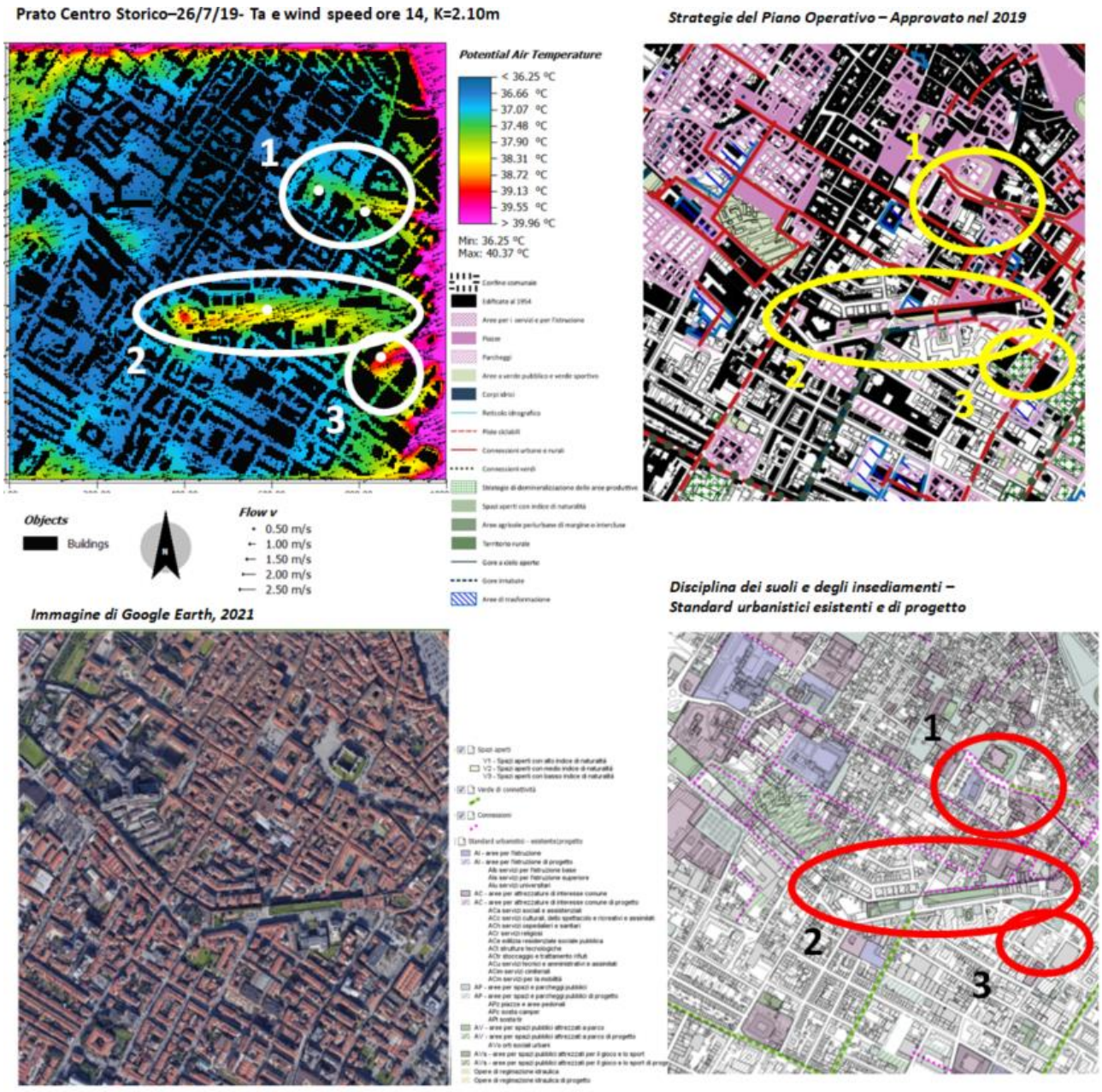
***D**- La Verifica degli effetti microclimatici degli scenari di progetto selezionati mediante gli strumenti di modellistica microclimatica (simulazioni ex post con Envimet o con altri software simili), in riferimento agli obiettivi specifici di ciascuna strategia.*

***E**- La realizzazione delle azioni selezionate e monitoraggio periodico (sondaggi coi cittadini/strumentazioni).*

Consapevoli del fatto che una metodologia per essere funzionale e integrata necessita di una verifica degli interventi in ragione degli obiettivi prefissati, si è considerato sostanziale introdurre nell'ultima fase il monitoraggio delle azioni realizzate, così da ottenere la loro validazione oppure la rivisitazione/modifica delle azioni stesse in funzione ad esiti inaspettati, soprattutto se questi si manifestassero in termini di peggioramento delle condizioni.

Le tre aree simulate vengono di seguito analizzate rispetto alla metodologia appena esplicitata soltanto per i primi tre step, in quanto gli ultimi due sono diretta conseguenza di una scelta politica strategica fatta rispetto alla azioni da realizzare, che spetta a ciascuna pubblica amministrazione.

1.PRATO CENTRO STORICO



Punto di vulnerabilità 1.1a, 1.1b,

Descrizione: la mappa della temperatura dell'aria mostra una temperatura piuttosto elevata in particolare in alcuni punti, in corrispondenza di Viale Piave nello spazio antistante l'Oratorio di Sant'Anna, nelle vicinanze del Castello e in prossimità dell'Istituto Comprensivo Marco Polo, scuola di infanzia. Tale restituzione è dovuta principalmente all'albedo dei materiali, ovvero le superfici asfaltate che compongono le strade e gli slarghi presenti in questa porzione di centro storico, e in parte alla radiazione solare che le facciate degli edifici presenti in questo slargo ricevono nelle ore precedenti rispetto all'orario estratto dalla simulazione.

Rilevamento di elementi particolari: l'area verde pubblica di pertinenza al Castello.

Azioni possibili: il piano operativo identifica la realizzazione di connessioni urbane e delinea la strategia operativa verso i passaggi e le aree pedonali, ben definita in un'ottica di benessere

microclimatico, infatti "*Gli spazi con funzione di passaggio pedonale e/o ciclabile nel caso di prossimità alla rete, devono presentare caratteristiche dimensionali, materiche e di permeabilità consone ai luoghi*." In particolare lungo viale Piave è prevista una connessione verde (8-Alberi), proprio dove si identifica l'intensificarsi l'aumento della temperatura dell'aria; si suggerisce in merito lo studio di soluzioni NBS che vedano la messa a dimora di un numero adeguato di specie arboree e di porre attenzione al dare continuità alle stesse nei punti in cui tale connessione verde lambisce le aree verdi esistenti o da potenziare (quindi in prossimità del Castello), al fine di ottimizzare al massimo il benessere microclimatico nel contesto. Per esempio le isole di traffico possono essere viste come nuovi possibili spazi di *desealing* (7-Pocket park). Dato il contesto storico denso e vincolante a livello di paesaggio urbano, un buon margine di intervento che non impatta con tale contesto può essere l'utilizzo di cool material o comunque di materiali tradizionali (nel rispetto delle palette cromatiche del centro e in linea con il piano del colore di quella parte di città) che abbiano un valore di albedo elevato (10-Utilizzo di Cool material su superfici orizzontali e verticali).

Punto di vulnerabilità 1.2a, 1.2b

Descrizione: la mappa della temperatura dell'aria pone in evidenza un aumento del discomfort termico in corrispondenza di Via Pomezia, in un tratto piuttosto lungo. L'area è composta da spazi a verde pubblico, con particolare riferimento al Giardino di infanzia, ma prevalentemente strade e slarghi asfaltati, oltre che parcheggi disposti in slarghi dedicati, oppure in linea e a spina di pesce lungo la carreggiata. Le specie arboree presenti sono piuttosto rade e discontinue. Anche in prossimità della fermata dell'autobus "Pomezia 5" la temperatura risulta molto elevata.

Rilevamento di elementi particolari: Area verde pubblica "Giardino di infanzia" e una gora intubata in prossimità del Giardino.

Azioni possibili: il piano operativo prevede una pista ciclabile lungo Via Bovio e una connessione verde lungo Via Don Giuseppe Arcangeli, ed entrambe attraversano Via Pomezia. Si suggerisce di valutare Il Giardino di infanzia e gli altri spazi verdi presenti come un sistema unico con le vie suddette in un'ottica di strategie NBS per ottimizzare il benessere microclimatico. Quindi per esempio valutare la messa a dimora di un numero adeguato di specie arboree e arbustive disposte in continuità (8-Alberi- Incremento, dove ha significato, del numero di specie arboree); nei parcheggi a spina di pesce in prossimità del Giardino di infanzia si può valutare un'operazione di *desealing* in alcuni posti auto così da ampliare le fasce di verde pubblico e la distribuzione continua e ragionata di specie arboree. Altre strategie riguardano la sostituzione dei materiali impermeabili dei parcheggi con materiali permeabili (9-Pavimentazioni drenanti) con valore di albedo elevato (10- Utilizzo di Cool material su superfici orizzontali e verticali).

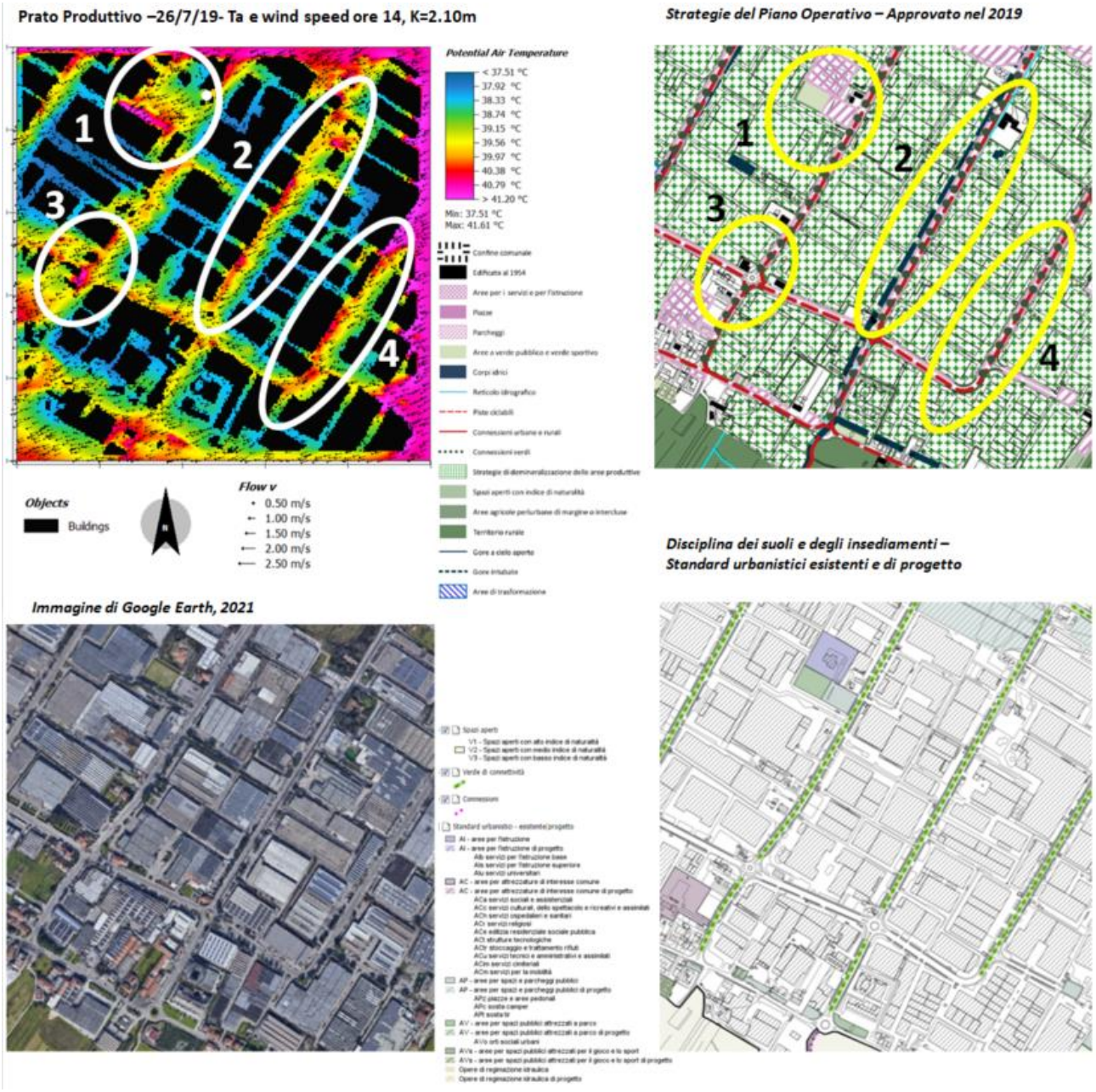
Punto di vulnerabilità 1.3a, 1.3b

Descrizione: la mappa della temperatura dell'aria identifica una tasca di aria calda in corrispondenza del parcheggio fra Via Bovio e Via Flaminio Rai, in prossimità di un Centro Medico e di un'area per passeggiate detta "il muretto". A generare tale discomfort microclimatico è indubbiamente il calore rilasciato dalle parti asfaltate del parcheggio che si unisce a quello dell'asfalto delle tre strade circostanti. Le pavimentazioni semipermeabili presenti nel parcheggio (autobloccanti con forature del 40% con riempimento in sabbia e ghiaia) e le alberature (che probabilmente hanno poco spazio per uno sviluppo adeguato dell'apparato radicale) non riescono a mitigare tale stato.

Rilevamento di elementi particolari: /

Azioni possibili: il piano operativo prevede già un'operazione di *desealing* per tutta l'area del parcheggio, inoltre lungo Via Rai e Via Bovio è prevista la realizzazione di una pista ciclabile. Si suggerisce di ampliare lo spazio di aiuola alla base dei filari principali delle specie arboree presenti nel parcheggio e, dove possibile, mettere a dimora nuove specie (8), eventualmente rinunciando a qualche posto auto (*desealing*). I posti auto adiacenti "il muretto" lungo Via Rai sono asfaltati, pertanto può valutare la sostituzione di tale materiale con pavimentazioni semipermeabili (9) ponendo in opera materiali con albedo elevato (10). Valutare anche qui il *desealing* di alcuni posti auto al fine di realizzare dei pocket park (3), il tutto in modo di dare più continuità possibile alle alberature di tutta l'area. Per quanto riguarda gli edifici antistanti il parcheggio e le vie, si può considerare, in future ristrutturazioni delle facciate, la possibilità di utilizzare dei cool material (10).

2.PRATO AREA INDUSTRIALE



Punto di vulnerabilità 2.1

Descrizione: il cerchio che identifica il punto di vulnerabilità comprende verso sud un gruppo di capannoni industriali prevalentemente prefabbricati circondati da una superficie pavimentata composta da asfalto, e, a nord da un complesso di edifici adibiti a servizi e istruzione composti da materiali tradizionali (cotto e mattoni) circondati da verde manutenuto; uno di questi edifici è adibito ad Asilo nido (il Bosco incantato, identificato dal punto bianco). Ancora più a nord si trovano dei capannoni realizzati con materiali con albedo elevato (copertura probabilmente metallica – alluminio - o in generale tinteggiati di bianco). Al centro del cerchio identificato si trova un'area verde incolta e in adiacenza un ampio parcheggio completamente asfaltato. La mappa della temperatura dell'aria presenta una tasca d'aria calda, non a caso, in prossimità dei capannoni industriali prefabbricati che si estende in continuità con la superficie asfaltata fino al grande parcheggio al centro del cerchio identificato.

Rilevamento di elementi particolari: Area verde incolta

Azioni possibili: Il piano operativo comunale prevede, sui lotti costituiti da capannoni industrializzati e superfici asfaltate, la realizzazione di strategie di demineralizzazione, e in tal senso si suggerisce, nella scelta di pavimentazioni e materiali permeabili (9), di selezionare quelli con valori di albedo elevati (10). Stessa attenzione andrebbe posta per l'area adibita a parcheggio. Per l'area verde incolta si suggerisce la messa a dimora di un numero adeguato di specie arboree (8; ipotizzare la realizzazione di uno specchio d'acqua generando ombra nell'intorno; integrare eventualmente con trincee filtranti, aree di ritenzione vegetate (7-sistemi SUDs), aree esondabili, se ha senso rispetto agli edifici adiacenti (11). Lungo via dei Fossi sono previste inoltre una pista ciclabile e una connessione verde, quindi l'introduzione di verde attrezzato in adiacenza alla strada esistente. Si suggerisce in questo intervento di porre attenzione al dare continuità alle specie arboree e arbustive nei punti in cui tale connessione verde lambisce le aree verdi esistenti o da potenziare (8), al fine di ottimizzare al massimo il benessere microclimatico nel contesto.

Punto di vulnerabilità 2.2, 2.4

Descrizione: Via del Molinuzzo e Via Toscana sono caratterizzate da superfici prevalentemente asfaltate in soluzione di continuità affiancate da parcheggi in linea, quasi completamente prive di verde, e da capannoni ed edifici prefabbricati industriali composti prevalentemente da materiale cementizio. Tali componenti restituiscono una temperatura dell'aria molto elevata con tasche di aria calda (color fuksia) adiacenti alle facciate ovest degli fabbricati, che non a caso sono quelle che hanno ricevuto maggior radiazione solare nelle ore precedenti rispetto a quella estratta. In particolare nel punto 2.2 si nota la presenza di una gora intubata.

Rilevamento di elementi particolari: nel punto 2.2 vi è la presenza di una gora intubata.

Azioni possibili: Lungo entrambe le vie il piano operativo prevede la realizzazione di una pista ciclabile e di connessioni verdi, oltre che, per tutti i lotti che contengono i capannoni, la realizzazione di interventi di *desealing*. Si suggerisce, nella scelta dei materiali permeabili (9), di selezionare quelli con valori di albedo elevati (10). Considerando la concomitanza di parcheggi in linea, connessione verde e pista ciclabile, si suggerisce la messa a dimora di un numero adeguato di specie arboree (8) e di valutare l'opportunità di rinunciare ad alcuni posti auto al fine di creare dei pocket park (7) - anche in funzione delle eventuali esigenze di stoccaggio delle acque degli edifici adiacenti (7-Raccolta e riuso delle acque meteoriche; 6-Scarichi filtranti), oltre che del fronte strada - da localizzare nei punti più strategici per le potenziali soste di pedoni e ciclisti che fruiscono l'area. Nel dettaglio, lungo via del Molinuzzo, dove è presente la gora intubata, valutare, anche in base alla normativa vigente, la possibilità di riaprirne una parte per ottimizzarne la funzione microclimatica in concomitanza al verde previsto.

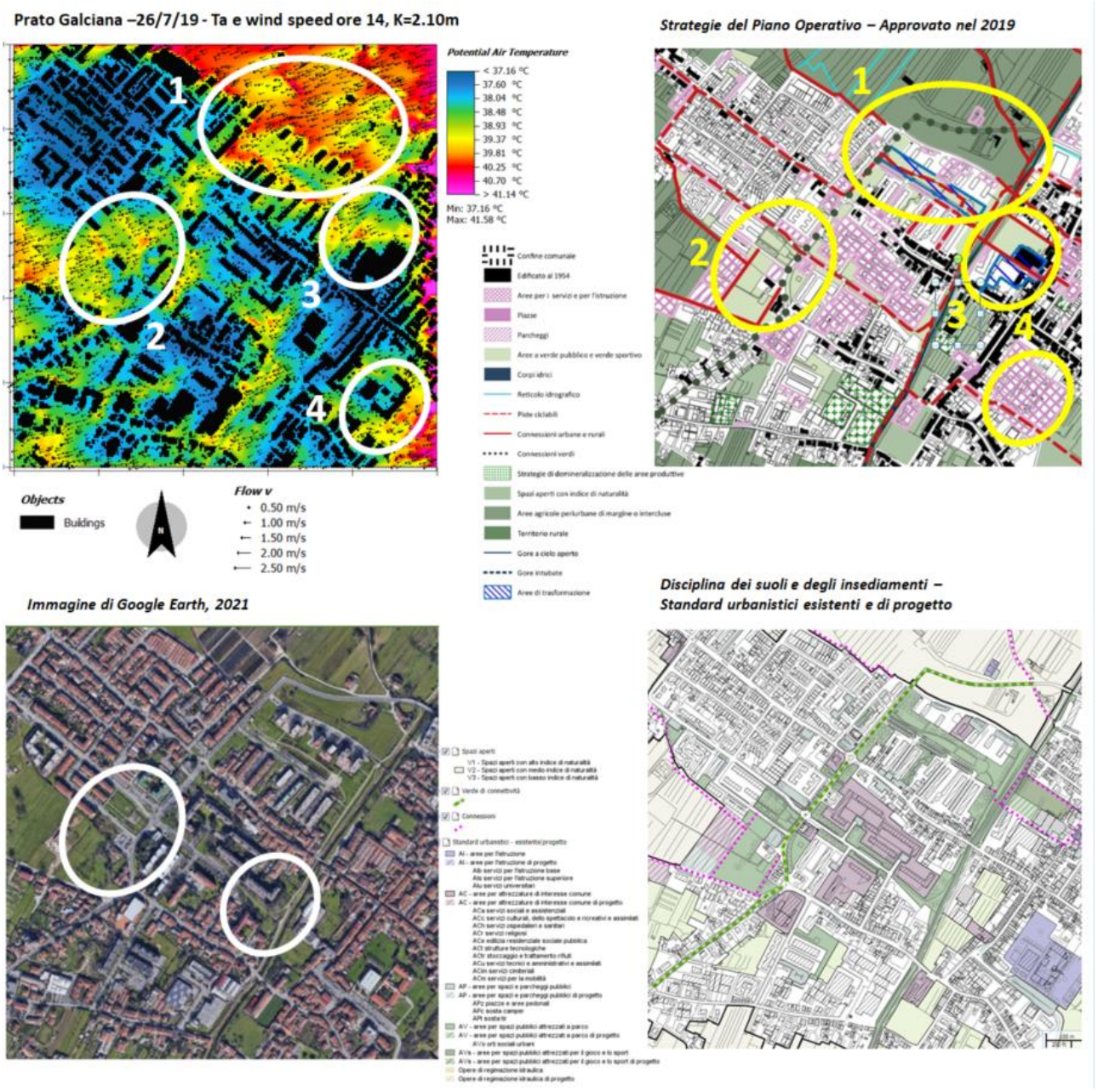
Punto di vulnerabilità 2.3

Descrizione: la mappa della temperatura dell'aria rileva una tasca di aria calda (color fuksia) all'incrocio fra Via dei Fossi e Via Toscana in corrispondenza di uno slargo asfaltato con rotonda, adiacente a un gruppo di edifici che nei lotti di pertinenza vedono la presenza di specie arboree quanto di pavimentazioni a base di cemento. Un'altra tasca di aria calda la si può notare lungo Via dei Fossi proseguendo verso nord.

Rilevamento di elementi particolari: verde esistente nei lotti privati da potenziare con interventi sulle parti pubbliche adiacenti.

Azioni possibili: nel piano operativo lungo Via dei Fossi è prevista una connessione verde, quindi un potenziamento delle specie arboree lungo la via (8). Sia su Via dei Fossi che su Via Toscana è prevista una pista ciclabile. Inoltre nei comparti e lotti industriali sono previste operazioni di *desealing*. Si suggerisce di prestare particolare attenzione all'albedo dei materiali permeabili (10,9) che si metteranno in opera. Ancora, durante la progettazione dei filari lungo le vie valutare la messa a dimora di un numero adeguato di specie arboree (8) e il *desealing* di alcuni posti auto presenti lungo le vie al fine di creare dei pocket park (7) o delle "nicchie di benessere climatico" lungo il percorso (14-Percorsi a pergolato).

3.PRATO GALCIANA



Punto di vulnerabilità 3.1

Descrizione: La zona a Nord è un'area agricola periurbana con la presenza di un servizio all'istruzione al di sopra della quale vi una strada rurale. Questa parte è circondata da un campo agricolo, che, dato un valore di albedo molto basso, restituisce una tasca di aria calda intensa che si estende verso altri edifici adibiti a servizi con i rispettivi parcheggi asfaltati, adiacenti a loro volta a un'area in trasformazione. Questa a sua volta comprende un'area verde pubblica che lambisce, proseguendo verso sud, l'edificato residenziale. Nell'area verde vi sono poche specie arboree, tuttavia il prato inerbito e irrigato interrompe parzialmente la tasca di aria, che però riprende di intensità dove vi è la presenza di asfalto, ovvero sulle strade nonché sui marciapiedi che circondano l'edificato.

Rilevamento di elementi particolari: area verde pubblica presente da potenziare.

Azioni possibili: Il piano operativo prevede già interventi di potenziamento del verde presente, nonché la realizzazione di connessioni verdi lungo la strada adiacente all'istituto d'istruzione, in particolare ponendo a dimora filari alberati (8) che vanno a collegarsi con l'area verde pubblica. Si suggerisce per questa specifica area una integrazione con tecniche NBS quali: messa a dimora di un maggior numero di specie arboree nella parte di parco più spoglia (8); ipotizzare la realizzazione di uno specchio d'acqua generando ombra nell'intorno; integrare eventualmente con trincee filtranti, aree di ritenzione vegetate (12-sistemi SUDs), aree esondabili (se ha senso rispetto agli edifici adiacenti); intervenire sui materiali che compongono gli edifici e le rispettive aree di pertinenza, sostituendoli con cool material (10); dove possibile e conveniente (rispetto all'uso) piantare un maggior numero di specie arboree in prossimità degli edifici pubblici, pur mantenendo la distanza da normativa.

Punto di vulnerabilità 3.2

Descrizione: la zona è caratterizzata da una temperatura elevata nei punti dove è principalmente presente l'asfalto, ovvero nei parcheggi e sulle strade. Il Parco Anton Maria Becherini è inerbito ma privo di alberature, quindi garantisce un minimo miglioramento del microclima. Proseguendo verso sud, prima di un gruppo più denso di case, è presente una porzione di spazio aperto verde che corrisponde ai "Giardini di via fra i campi", anch'esso poco alberato.

Rilevamento di elementi particolari: area verde pubblica presente da potenziare.

Azioni possibili: il piano operativo prevede nella via principale asfaltata (Via Bettazzi) la realizzazione di una connessione verde, ovvero un viale alberato (8), che andrebbe a lambire entrambi i giardini presenti, potenziandone l'effetto mitigante. Al fine di favorire ulteriormente l'abbattimento dell'isola di calore si suggerisce: messa a dimora di un maggior numero di specie arboree nei giardini esistenti (8); ipotizzare la realizzazione di uno specchio d'acqua generando ombra nell'intorno; integrare eventualmente con trincee filtranti, aree di ritenzione vegetate (12-sistemi SUDs), aree esondabili (se ha senso rispetto agli edifici adiacenti); l'asfalto dei parcheggi può essere sostituito con pavimentazioni permeabili/semipermeabili (9); prevedere nelle prossime sistemazioni dei marciapiedi di l'utilizzo di *cool material* (10); realizzare pergolati di sicurezza microclimatica, con rampicanti piantati a suolo (14), così da garantire maggior attecchimento e copertura.

Punto di vulnerabilità 3.3

Descrizione: l'area è caratterizzata da un complesso di edifici adiacenti ad un ampio spazio aperto con indice di naturalità prevalentemente coperto da prato spontaneo e privo di alberature adiacente a una gora a cielo aperto. Questo spiega la piccola tasca di aria calda che viene a formarsi. Il spazio verde lambisce un'area a parcheggio, in cui la temperatura dell'aria tende a diminuire per l'effetto ombreggiamento garantito dall'edificio.

Rilevamento di elementi particolari: spazio aperto con indice di naturalità da potenziare sfruttando la presenza dell'acqua.

Azioni possibili: il piano operativo indica che gli edifici saranno oggetto di trasformazione, nonché il potenziamento dello spazio aperto con indice di naturalità. Al fine di favorire ulteriormente l'abbattimento dell'isola di calore si suggerisce: messa a dimora di un maggior numero di specie arboree nello spazio con riconosciuto indici di naturalità (8), in particolare, se fattibile da normativa,

infittendo le specie arboree in prossimità della gora; l'asfalto dei parcheggi può essere sostituito con pavimentazioni permeabili/semipermeabili (9) con un valore di albedo elevato (10).

Punto di vulnerabilità 3.4

Descrizione: l'area vede la presenza di una struttura adibita all'istruzione, l'Istituto comprensivo Gandhi. La tasca di aria calda si manifesta sull'area verde quasi priva di alberature e si concentra in particolare sul percorso pedonale realizzato in lastre di cemento, per proseguire verso la strada asfaltata.

Rilevamento di elementi particolari: area verde di pertinenza dell'edificio scolastico.

Azioni possibili: il piano operativo indentifica l'area con servizi dell'istruzione e la realizzazione di un percorso ciclabile. Al fine di favorire ulteriormente l'abbattimento dell'isola di calore si suggerisce: messa a dimora di un maggior numero di specie arboree nell'area verde pertinenziale (8); la pavimentazione cementizia presente sull'area verde può essere sostituita con pavimentazioni permeabili/semipermeabili (9) con un valore di albedo elevato (10).

Indicazioni generali per la disciplina di pianificazione territoriale

Il paragrafo precedente ha evidenziato che per operare una rigenerazione urbana in grado di migliorare il comfort microclimatico dello spazio pubblico e privato si hanno a disposizione principalmente alcuni elementi: la vegetazione, l'acqua, i materiali di cui è composto il costruito, le componenti tecnologiche. Questi elementi sono la base delle Nature Based Solution.

Diverse parti di una città rispondono in modi diversi in termini di regimi termici, con conseguente impatto sui cittadini. È evidente la necessità di conoscere le condizioni microclimatiche esistenti del tessuto urbano per procedere all'applicazione delle strategie e all'azione. Ciò si riflette fortemente sulla politica urbana come il regolamento edilizio urbano che è lo strumento principale per affrontare un reale sviluppo sostenibile e resiliente di una città.

I materiali che utilizziamo non sono neutrali rispetto alla cattura di energia alla superficie. Purtroppo, questa non neutralità dei materiali sembra essere tenuta molto poco in considerazione da architetti e urbanisti. Il problema sta nel fatto che fisica e architettura seguono due strade separate. Il tema delle proprietà ottiche dei materiali non è soltanto un motivo di scontro tra comitati civici e Soprintendenze, è un tema diretto alla sostenibilità del sistema urbano. Oggi, oltre ai materiali tradizionali, alcuni dei quali possiedono un albedo elevato, vi sono nuovi materiali, detti cool material (materiali freddi) capaci di essere estremamente simili a quelli tradizionali, che possono aprire la strada ad una analisi fisica del costruito che possa ridurre il regime termico urbano (vedere box di approfondimento sui cool material).

Ogni intervento urbanistico o edilizio, pubblico e privato, diretto o soggetto ad accordi, può divenire una opportunità per mitigare l'isola di calore urbano indicando negli strumenti di pianificazione territoriale (Regolamento Edilizio) quanto necessario affinché le buone pratiche vengano rese non solo volontarie (protocolli LEED, BREEAM, ITACA) ma cogenti. Le nostre città e i tessuti che le compongono hanno tendenzialmente un grande valore storico artistico e sono ricche di patrimonio vincolato dalla Soprintendenza; tuttavia il buon senso, il costruire a regola d'arte, la ricerca scientifica e l'avanzamento tecnologico possono garantire la rigenerazione al fine di migliorare il comfort microclimatico, e contemporaneamente rispondere ad altri bisogni quali l'abbattimento

degli inquinanti, garantire un adeguato drenaggio urbano, la ricarica delle falde. In particolare "l'albedo è uno dei fattori che influenzano la temperatura superficiale locale e non può essere omesso quando si decide sulle caratteristiche dei materiali da costruzioni, anche se questi vanno coperte con la vegetazione" (Givoni 1998).

L'ampio uso di materiali ad elevato albedo è stato ritenuto una soluzione per mitigare l'isola di calore urbano, soprattutto nel tessuto urbano ad alta densità. Il presupposto implicito di questa strategia è l'abbassando della temperatura dell'aria nel *canopy layer*, e si traduce in:

- carichi di condizionamento ridotti negli edifici
- un miglior comfort termico per i pedoni negli spazi urbani.

Il Regolamento Edilizio di Prato offre ampio spazio per approfondire il tema circa la possibilità di assumere la prescrizione di soglie minime di valori di albedo dei materiali utilizzati per gli interventi diretti e per gli Accordi operativi. In generale nel ***Capo III-Tutela degli spazi verdi e dell'ambiente - Sezione VIII Incentivi (riduzione degli oneri di urbanizzazione, premi di edificabilità, fiscalità comunale) finalizzati all'innalzamento della sostenibilità energetico ambientale degli edifici, della qualità e della sicurezza edilizia, della accessibilità, rispetto ai parametri cogenti*** e nel **Capo V - *Recupero urbano, qualità architettonica e inserimento paesaggistico***, si potrebbe ipotizzare l'integrazione con un riferimento dedicato al miglioramento del clima in outdoor che, oltre all'albedo, chieda verifiche circa un miglioramento microclimatico tra stato di fatto e stato di progetto.

In particolare, per gli interventi diretti privati, all'articolo 91 – Incentivo di carattere edilizio-urbanistico - Sezione VIII, i parametri di albedo dei materiali e di permeabilità del suolo possono essere integrati, se d'interesse diretto della pubblica amministrazione, nelle schede tecniche, sia per le nuove costruizioni che per le ristrutturazioni.

Si propone di seguito un paragrafo di approfondimento sui Cool Material.

Bibliografia

Strategia europea per i cambiamenti climatici, 2003: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52013DC0216&from=IT

La Strategia Nazionale di Adattamento ai cambiamenti climatici (SNAC): https://pdc.minambiente.it/sites/default/files/allegati/strategia_nazionale_adattamenti_climatici.pdf

Variazioni e tendenze degli estremi di temperatura e precipitazione in Italia, 2013: https://www.isprambiente.gov.it/files/pubblicazioni/statoambiente/SA_37_2013_indici_estremi.pdf.

Bruse, M.; Fleer, H. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. Environ. Model. Softw. 1998, 13, 372–384.

M. Giuliacci, A. Giuliacci, P. Corazzon. Manuale di meteorologia. Guida alla comprensione dei fenomeni atmosferici e dei cambiamenti climatici. Alpha Test, 4° Edizione 2019, ISBN: 978-88-483-2185-3 , pp.688

Blue Green Solutions – A System Approach to Sustainable, Resilient and Cost-Efficient Urban Development, tratto da: https://www.researchgate.net/publication/315756004_Blue_Green_Solutions_A_Systems_Approach_to_Sustainable_Resilient_and_Cost-Efficient_Urban_Development

EKLIPSE – An impact evaluation framework to support planning and evaluation of nature-based solution projects – An EKLIPSE Expert Working Group Report – H2020, tratto da: http://www.eklipse-mechanism.eu/apps/Eklipse_data/website/EKLIPSE_Report1-NBS_FINAL_Complete-08022017_LowRes_4Web.pdf

Ballards W. et al., 2015, The SuDS Manual. http://www.scotsnet.org.uk/documents/NRDG/CIRIA-report-C753-the-SuDS-manual-v6.pdf

Huber, J., 2010. Low Impact Development: a Design Manual for Urban Areas. http://www.bwdh2o.org/wp-content/uploads/2012/03/Low_Impact_Development_Manual-2010.pdf

Tema 4: super-sito per la misura degli scambi di CO2

Il sito di misura degli scambi di CO2 di Prato è collocato Palazzo Pretorio (43°52’50’’N, 11°05’47’’ E). Palazzo Pretorio è l'antico palazzo comunale di Prato, situato in piazza del Comune davanti all'attuale Palazzo Comunale, ed è sede del Museo di Palazzo Pretorio. Le misure di scambio di CO2 all’interno del sito sono effettuate mediante la tecnica eddy covariance (correlazione turbolenta), la quale è una tecnica micrometeorologica in grado di misurare i flussi di massa (flusso di CO_2 e flusso di H_2O - LE) e di energia (flusso di calore sensibile – H) che la superficie scambia con l’atmosfera. Si tratta di una metodologia che mette in relazione la direzione del moto delle particelle di aria (eddies) al di sopra di una superficie e la massa di scalare (gas) trasportata verticalmente. La tecnica dell’eddy covariance è utilizzata in numerosi network nazionali ed internazionali (Fluxnet), che negli anni recenti ha visto un crescente interesse verso siti di tipo urbano.



Figura 1. *Installazione della stazione Eddy Covariance su Palazzo Pretorio (a) nel centro della città di Prato. A destra (b) dettaglio della strumentazione utilizzata comprensiva di analizzatore di gas ad infrarosso e anemometro triassiale.*

La stazione è stata installata nel Giugno del 2021 e ad oggi ha collezionato oltre un anno di dati di misure. I primi risultati sulla città di Prato insieme a Firenze sono stati presentati alla Conferenza ICOS Italy, 2022 (contributo in allegato) e riportati in dettaglio di seguito. La torre è posta ad un’altezza di circa 50 m rispetto al livello del suolo in modo da coprire un’area significativa del centro urbano di Prato.

Risultati

I risultati riportati coprono oltre un anno di misurazioni (Maggio 2021-Settembre 2022), che sono state aggregate per diverse scale temporali (oraria, giornaliera, settimanale, stagionale). La stazione è tuttavia attualmente in funzione e sta continuando a collezionare dati di scambi di CO2 e calore.

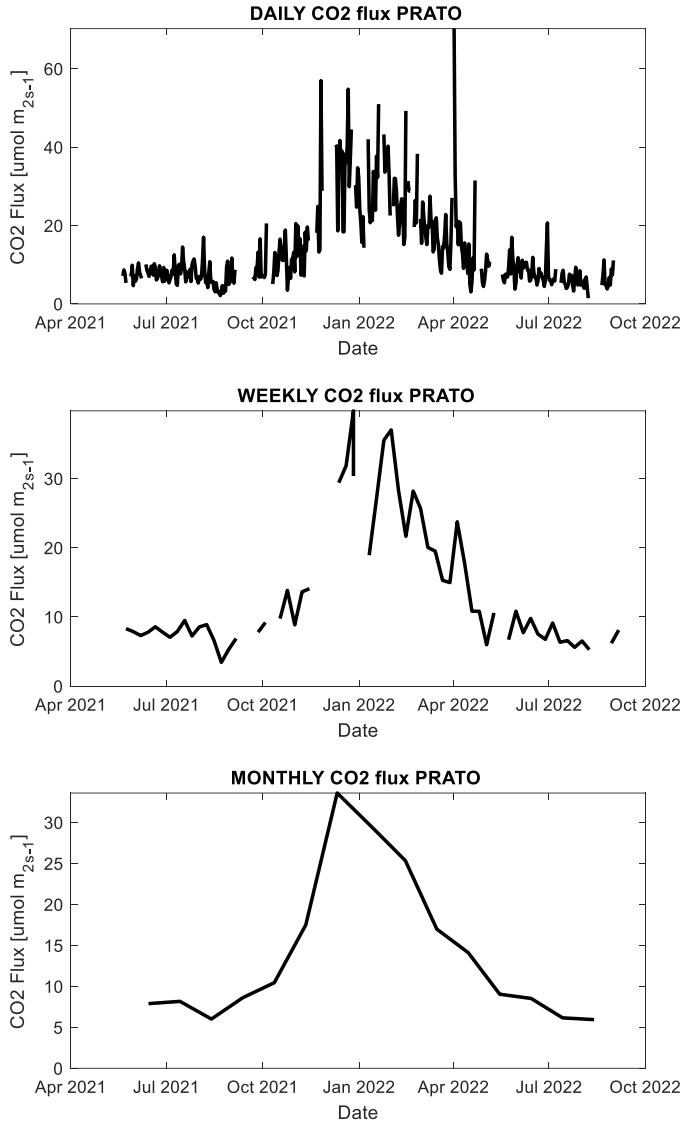


Figura 2. Andamenti flussi di CO2 durante il periodo di misura, elaborati a scala giornaliera, settimanale e mensile

In figura 2 sono stati riportati i flussi di CO2 misurati dalla stazione eddy covariance. Dalla figura emerge come i valori più alti siano registrati nel periodo invernale (40-60 umol m^{-2} s^{-1}, scala giornaliera), con le concentrazioni massime osservabili nel periodo Novembre-Febbraio. Tale andamento risulta principalmente correlato con le emissioni urbane dovute all'accensione dei riscaldamenti.

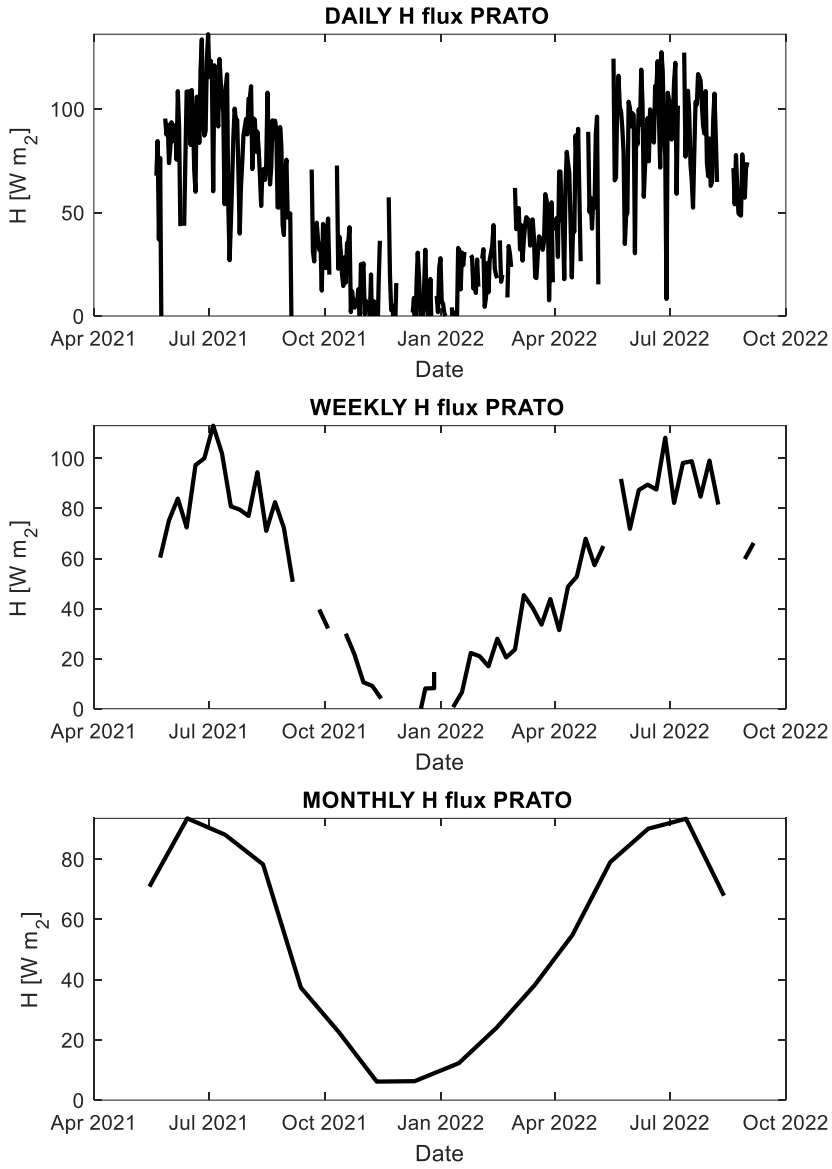


Figura 3. Andamenti flussi di calore sensibile (H) durante il periodo di misura, elaborati a scala giornaliera, settimanale e mensile

In figura 3 sono stati riportati gli andamenti di calore sensibile misurati dalla stazione eddy covariance. Dalla figura emerge come, in modo opposto ai flussi di CO_2, i valori più alti siano registrati nel periodo primaverile-estivo (80-100 W/m^2), mentre i più bassi durante l'inverno (0-20 W/m^2). Tale andamento risulta principalmente dovuto alla variazione dell'irraggiamento solare nel corso dell'anno e alla quantità di calore accumulata nelle strutture urbane, che è maggiore sia come quantità che come durata nei periodi più caldi dell'anno. In estate soprattutto, strutture come gli edifici tendono a rilasciare calore, anche dopo il tramonto. In generale ci si aspetta un andamento opposto anche tra i flussi di calore sensibile e latente, con riduzione del flusso di calore latente (associata alla minore disponibilità di vapor d'acqua presso il suolo), accompagnata a valori positivi del flusso di calore sensibile.

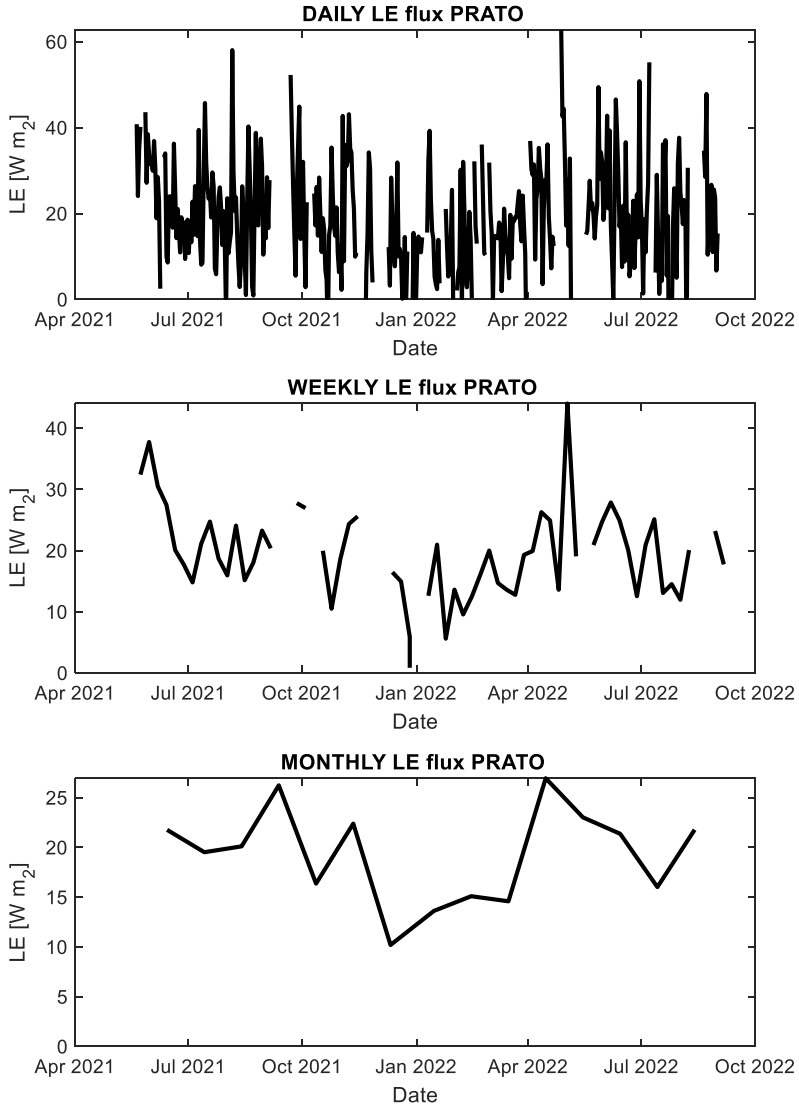


Figura 4. Andamenti flussi di calore latente (LE) durante il periodo di misura, elaborati a scala giornaliera, settimanale e mensile

In figura 4 sono stati riportati gli andamenti di calore latente (evapotraspirazione) misurati dalla stazione eddy covariance. Dalla figura emerge come i valori tendano a rimanere piuttosto costanti durante tutto l'anno (10-30 W m2), con variazioni non significative nel corso di tutto periodo analizzato. Questo andamento riflette il ridotto contributo della componente vegetale, piuttosto limitata in ambito urbano, in termini evapo-traspirativi. La componente vegetale nel pieno centro di Prato risulta infatti molto limitata, causa la mancanza di parchi verdi urbani nell'area di analisi della torre di flusso, per cui il contributo vegetativo delle poche e sparse piante identificabili nell'area è praticamente nullo.

I flussi di CO2, calore sensibile e calore latente, sono stati inoltre investigati anche su scala oraria, al fine di verificare come le dinamiche giornaliere sia naturali che antropiche possono influenzare queste variabili.

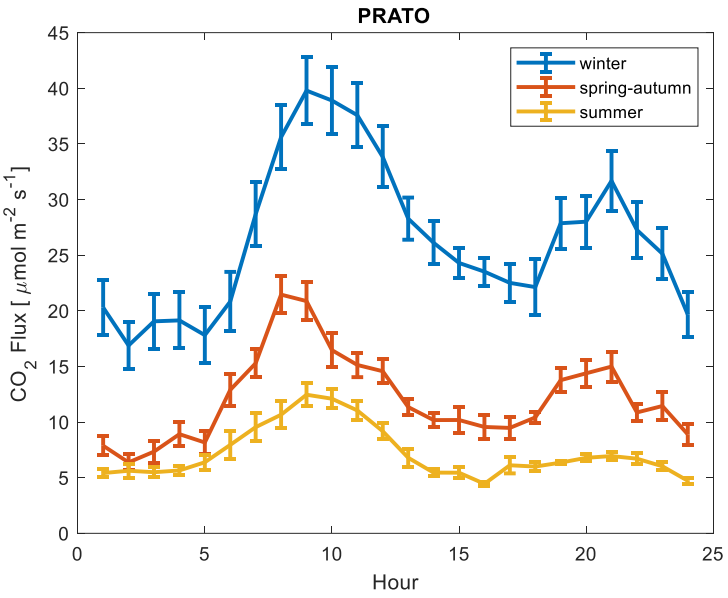


Figura 5. Andamenti flussi di CO2 orari mediati su base stagionale

I flussi di CO2 a scala oraria (Fig. 5) evidenziano come, a prescindere dalla stagionalità che evidenzia i valori più alti in inverno, i picchi più elevati si concentrino al mattino (8:00 – 10:00) ed alla sera (19:00 – 21:00). Tali picchi sono dovuti principalmente all'interazione tra riscaldamenti domestici e traffico, concentrandosi nei momenti di maggior utilizzo e/o presenza veicolare, appunto al mattino ed al rientro tardo pomeridiano degli utenti nelle abitazioni. I picchi, come atteso, sono maggiormente rilevabili nel periodo freddo, mentre, seppur presenti, si attenuano fortemente nei periodi più caldi, dove il ruolo fondamentale dei riscaldamenti domestici tende a ridursi fortemente.

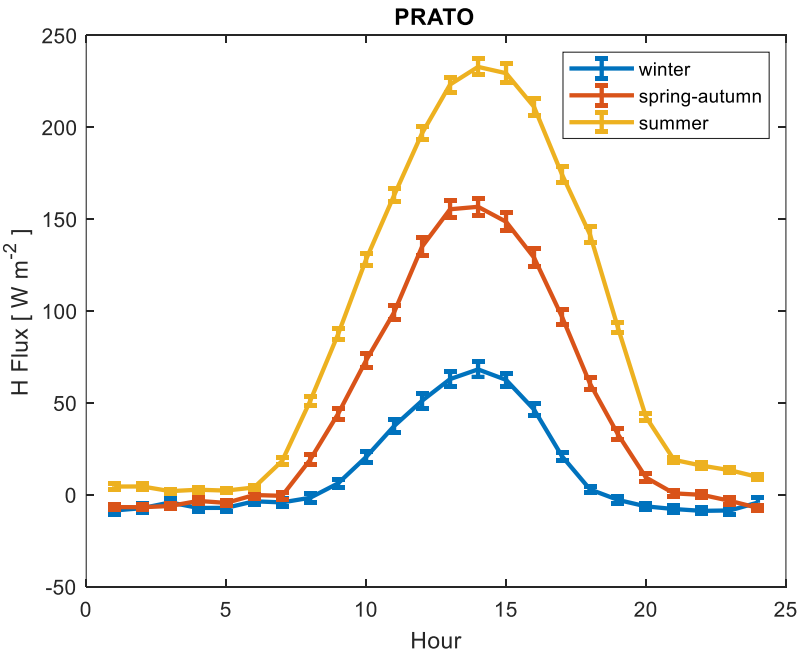


Figura 6. Andamenti flussi di calore sensibile (H) orari mediati su base stagionale

I flussi di calore sensibile a scala oraria (Fig. X) evidenziano i picchi più elevati durante le ore centrali della giornata (12:00 – 15:00). Tali picchi sono dovuti principalmente al calore dovuto alla forzante radiativa, la quale è massima nelle ore centrali della giornata. In ambito urbano i valori maggiori si osservano durante l'estate (240 W m2), con picchi fino a quattro volte superiori nelle ore centrali del giorno rispetto a quelli misurabili nel periodo invernale (60 W m2).

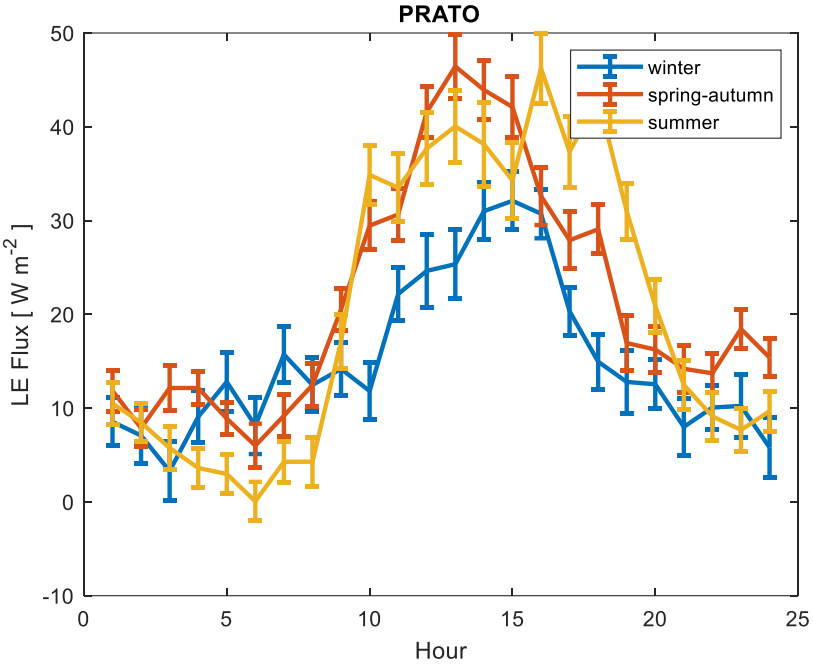


Figura 7. Andamenti flussi di calore latente (LE) orari mediati su base stagionale

I flussi di calore latente a scala oraria (Fig. 7) evidenziano i picchi più elevati durante le ore centrali della giornata (12:00 – 15:00). Tali valori risultano massimi nei periodi più caldi dell'anno (45 W m2), tuttavia si mantengono piuttosto elevati anche nel periodo invernale (30 W m2). I valori più bassi sono stati osservati invece nelle ore mattutine, serali e notturne in tutte le stagioni (0-10 W m2). Mentre le dinamiche giornaliere dei flussi di calore latente ricalcano gli andamenti giornalieri di temperatura, la scarsa presenza di componente vegetazionali per l'area investigata riduce le possibili differenze stagionali, come evidenziato anche nell'analisi degli andamenti giornalieri, mensili e stagionali.

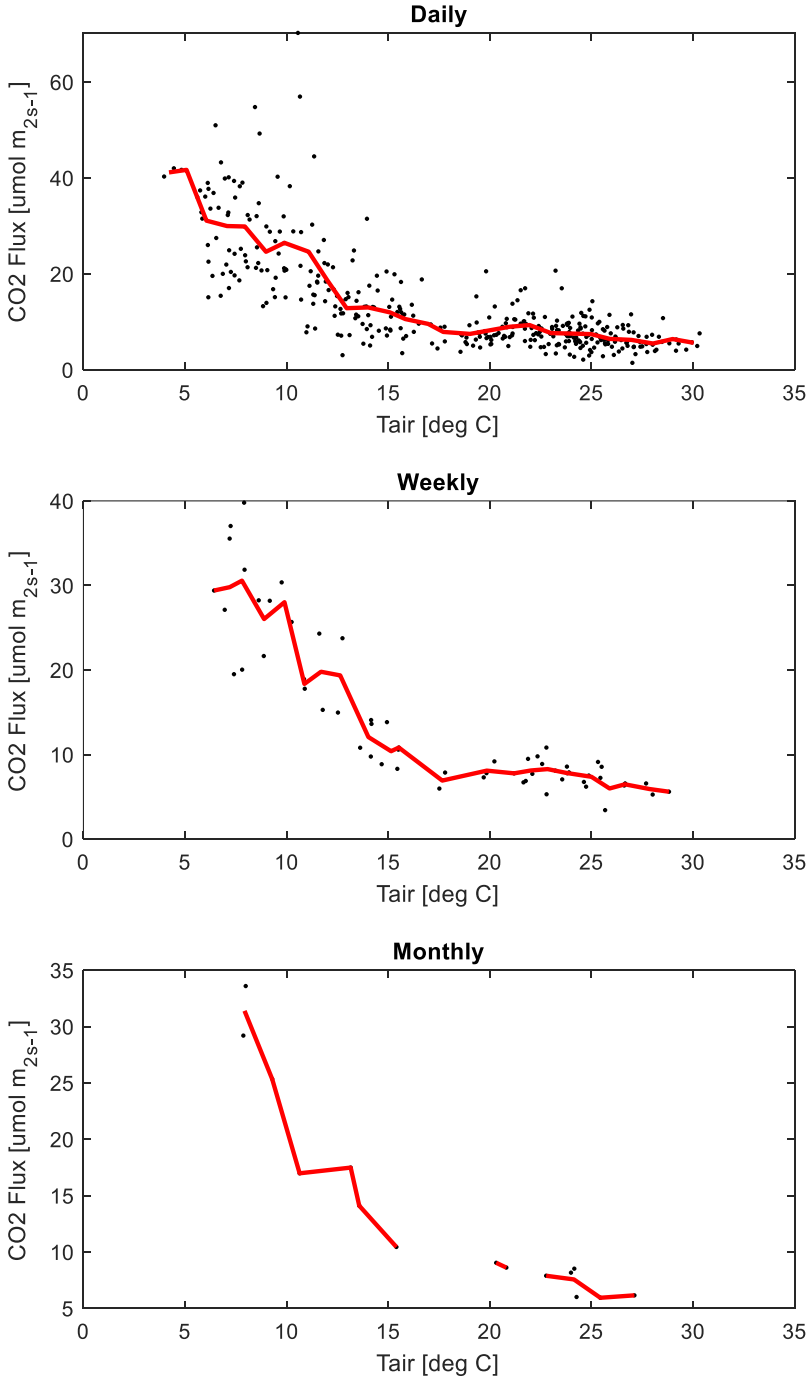


Figura 8. Flussi di CO2 espressi in funzione della temperatura dell'aria a scala giornaliera, settimanale e mensile

In Fig. 8 è stata riportata la correlazione tra flussi di CO2 e temperatura a scala giornaliera, settimanale e mensile. Dalla dinamica osservabile si evidenzia come i flussi di CO2 siano negativamente correlati con le temperature fino a 18°C circa. Tale correlazione evidenzia come a minori temperature si associno valori di flusso di CO2 maggiori, dovuti principalmente all'utilizzo di metano per i riscaldamenti residenziali. Tale correlazione tende ad appiattirsi all'aumentare delle temperature, specialmente a partire da valori di temperatura uguale o superiore a 18°C. Tale

appiattimento evidenzia una riduzione della significatività statistica tra alte temperature ed emissioni di CO2, suggerendo come all'aumentare delle temperature vi sia una aspettata riduzione del consumo di metano per riscaldamento residenziale.

Sviluppi futuri

Le attività di ricerca effettuate nel secondo anno di lavoro e finalizzate allo sviluppo del Piano d'Azione 887 per l'Energia Sostenibile ed il Clima (PAESC) per il Comune di Prato sono state incentrate sul completamento dell'analisi dei bilanci di carbonio (emissioni ed assorbimenti) e della vulnerabilità climatica del territorio comunale (temi 1 e 2), sulla effettuazione di simulazioni numeriche (digital twin) a microscala su tre diversi tessuti urbani rappresentativi delle tipologie urbanistiche (Tema 3), e sull'elaborazione del primo anno di misure dirette di emissioni di CO2 da aree urbanizzate effettuate a Palazzo Pretorio (Tema 4).

Le prossime attività nel 2023 riguarderanno:

- la messa a punto di metodologie di *upscale* (Tema 3 Modello digital twin) di specifiche variabili di interesse biometeorologico (quali PET) con i dati provenienti dalle sotto-aree oggetto di simulazione.

- La raccolta ed elaborazione di un ulteriore dataset dal sito eddy covariance (Tema 4).

Allegati

Le attività di ricerca hanno, al momento, portato alla pubblicazione di un articolo scientifico:

- Brilli et al., 2022, Science of the Total Environment

ed a due contributi per conferenze:

- Air Pollution threats to Plant Ecosystems Conference 2021;
- Conferenza Nazionale ICOS Italy, 2022)

Allegato 1

Brilli, L., Carotenuto F., Chiesi, M., Fiorillo, E., Genesio, L., Magno, R., Morabito, M., Nardino, M., Zaldei, A., Gioli, B. 2022. *An integrated approach to estimate how much urban afforestation can contribute to move towards carbon neutrality.* Science of the Total Environment, 842 (2022) 156843. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156843

Science of the Total Environment 842 (2022) 156843

Contents lists available at ScienceDirect

Science of the Total Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/scitotenv

An integrated approach to estimate how much urban afforestation can contribute to move towards carbon neutrality

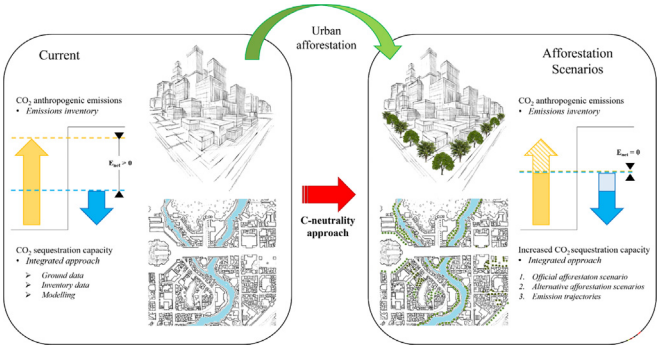
L. Brilli *, F. Carotenuto, M. Chiesi, E. Fiorillo, L. Genesio, R. Magno, M. Morabito, M. Nardino, A. Zaldei, B. Gioli

CNR-IBE, National Research Council of Italy, Institute of Bioeconomy, Via Madonna del Piano 10, 50145 Sesto Fiorentino, Italy

HIGHLIGHTS

- The green areas within the Municipality of Prato can sequester 33.1 $ktCO_2\ yr^{-1}$.
- CO_2 sequestration capacity from 1911 afforestation scenarios was evaluated.
- Afforestation scenarios can offset city emissions in a range from 8.1 to 11 %.
- An increase in the number of broadleaves resulted in increased CO_2 sequestration.
- The increase in urban green areas can only marginally contribute to C-neutrality.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Editor: Kuishuang Feng

Keywords:
CO_2 sequestration
Carbon neutrality
Afforestation scenarios
Emissions
Modelling

ABSTRACT

Urban afforestation is considered a promising nature-climate solution that may contribute to achieve climate neutrality by 2050, since it can increase C-storage and C-sequestration, whilst providing further multiple ecosystem services for citizens. However, the quantification of the CO_2 sequestration capacity that may be provided by an urban forest as well as the capacity to impact the city-level C-balance and offset anthropogenic emissions is a complex issue. Methodological approaches, quantity and quality of information contained in urban tree database, and the level of detail of the planned urban forest can strongly influence the estimation of C-sequestration potential offered by urban forests. In this work, an integrated framework based on emission inventory, tree species/morphology and ecosystem modelling has been proposed for the city of Prato, Italy, a representative medium size European city to: i) evaluate the current C-sequestration capacity of urban trees; ii) upscale such capacity with different afforestation scenarios, iii) compare the sink capacity offered by ecosystems with current and projected anthropogenic emissions. Results indicated that the green areas within the Municipality of Prato can sequester 33.1 $ktCO_2\ yr^{-1}$ under actual conditions and 51.0 $ktCO_2\ yr^{-1}$ under the afforestation scenario which maximize the CO_2 sequestration capacity, offsetting the 7.1 % and 11 % of the total emissions (465.8 $ktCO_2\ yr^{-1}$), respectively. This study proves that, in the various afforestation scenarios tested, the contribution of urban afforestation to the municipality carbon balance is negligible and that carbon neutrality can only be reached by the substantial decarbonization of emission sectors.

1. Introduction

The achievement of climate neutrality by 2050, as defined by the goal of the European Green Deal and converted into the European Climate Law (Regulation EU, 2021/1119), is based on multiple and multi-sectorial actions. Among them the development of climate-neutral cities appears as a critical milestone. European cities cover only 4 % of the whole European

* Corresponding author.
E-mail address: lorenzo.brilli@ibe.cnr.it (L. Brilli).

http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156843
Received 15 April 2022; Received in revised form 15 June 2022; Accepted 16 June 2022
Available online 21 June 2022
0048-9697/© 2022 Elsevier B.V. All rights reserved.

area, consuming and contributing, however, for 65 % and 70 % of global energy and CO_2 emissions, respectively (EU, 2020). The EU mission for climate-neutral and smart cities was also proposed to select 100 climate-neutral cities by 2030, acting through a cross-sectoral approach for developing decarbonization strategies involving energy, transport, buildings, industry, and agriculture. In this context, nature-climate solutions (NCS) - i.e., nature-based solutions (NBS) that focus on climate mitigation through carbon (C) sequestration or emissions reduction - are becoming increasingly relevant (Griscom et al., 2017). These actions involve water filtration, flood buffering, soil health and biodiversity habitat conservation and restoration, management of ecosystems and may both provide social and economic benefits and increase C-removal from the atmosphere (Albert et al., 2017; Dushkova and Haase, 2020; Faivre et al., 2017; Frantzeskaki, 2019; Griscom et al., 2017; Liu, 2021; Wickenberg et al., 2021).

One of the most recommended NCS in urban context is the development of urban forests (Raskin, 2015; Teo et al., 2021; Masiero et al., 2022). Afforestation in urban areas can increase C-storage and C-sequestration, whilst providing further multiple ecosystem services for citizens such as urban climate modification by transpiration and evaporative cooling, air quality improvement by pollutants absorption and deposition, flood protection by increased soil permeability, and mental benefits (Tyrväinen et al., 2005; Sæbø et al., 2017; Rahman et al., 2020). Given the growing attention to environment and climate related issues, coupled with the growing need for associated social benefits, financial resources allocation for urban afforestation projects has significantly increased in the recent years, resulting in the development of urban forests plans in several cities. Among these, Beijing City implemented the One Million-Mu (666 km^2) Plain Afforestation Project during 2012–2015 (Yao et al., 2019), where >50 million of trees were planted in the Beijing city's plain area, resulting in a 10 % increase of the city forest cover. In New York City, the MillionTreesNYC program (https://www.milliontreesnyc.org/) contributed to plant and care for one million new trees across the City's five boroughs. In this context, many representatives from towns and cities proposed urban forests plans aimed at enhancing the boost towards low-carbon, resilient and inclusive energy systems, thus showing how each single local administration can reach the carbon (C) neutrality target. For instance, the currently ongoing program named “Forestami” (www.forestami.org) aims at planting 3 million trees within 2030 in the metropolitan area of Milan (Italy).

However, the quantification of the C-sequestration capacity provided by an urban forest and the assessment of the capacity to impact the city level C-balance and offset anthropogenic emissions is challenging. Such an analysis is dependent on the methodological approach that is adopted (Teo et al., 2021; Parsa et al., 2019; Boukili et al., 2017; Uniyal et al., 2022; Agbelade and Onyekwelu, 2020), the quantity and quality of information contained in urban tree database, and on the level of detail of the urban forest development plans (i.e., type of species to be used, number of trees hectares and type of surface available). All these aspects can strongly influence the C-sequestration potential offered by urban forests and shall be carefully considered to provide reliable C-sequestration estimates for a specific urban context. In the end they result to be essential to appropriately answer the question on how much the development of an urban forest may really contribute to reach net zero emissions at the city scale, as well as to quantify the capability of ecosystems to offset the more emissive macro sectors where specific reduction actions should be implemented.

In this work an integrated framework based on emission inventorial data, tree species and morphology data and ecosystem modelling has been proposed to i) evaluate the current CO_2 sequestration capacity of urban trees; ii) upscale such capacity with different afforestation scenarios, iii) compare the sink capacity offered by ecosystems with current and expected anthropogenic emissions, iv) provide guidelines on the emission reduction trajectories that are needed towards climate neutrality. This framework was developed here for the city of Prato, Italy, a representative medium size European city (~200,000 citizens) with strong industrial activity, where urban forestry projects are currently ongoing, and an official afforestation plan has been adopted.

2. Materials and methods

2.1. Study area

The study area (Fig. 1) is the Municipality of Prato (43°52′48″ N, 11°05′54″ E) which is in the center of the plain of Florence-Prato-Pistoia (Tuscany), at an altitude of 61 m a.s.l. It comprises an area of 97,58 km^2 with a resident population of about 194,000 inhabitants, thus resulting in a population density of 1990 inhabitants/km^2. The urban area and a large part of the municipal territory extends over the flat area between the Bisenzio river (north side) and the Ombrone Pistoiese (south side), an integrated central part of the intra-Apennine basin. Prato has a mesothermal climate which has sunny hot summers and cool damp winters, Ca in the Köppen and Geiger climate classification (Kottek et al., 2006). July is the driest month of the year.

The Land Use (LU) of the municipality shows a rather homogeneous composition (Fig. 2). Forest areas are located mainly in the north-eastern part, occupying the 21 % of the municipal area. These areas mainly consist of broadleaf Mediterranean forest (i.e., oaks, mixed sclerophyll forests, etc.), whilst a little percentage is represented by needleleaf trees such as pine trees and cypresses. Agricultural areas (35.6 %) concern olive groves, as typical of the vocation of the area, in the foothill surrounding the urban context, and herbaceous areas (i.e., forage and perennial grasslands, maize and wheat systems), and other crop/vegetable systems.

Industries are largely present within the municipality, since Prato is one of the largest textile centers in Europe to produce woolen yarns and fabrics. About 93 % of manufacturing employment is concentrated in small businesses (around 7000 businesses), which contribute to a major part of municipal gross domestic product (GDP). Paper industries, construction and trade market further contribute to local economy.

In this municipal context, local policymakers agreed to develop an action plan for urban afforestation which aims to restore spaces and green corridors by linking existing and newly planned parks, agricultural areas and private green spaces in a single system through a planting of 190,000 trees, approximately one for each inhabitant (https://www.pratourbanjungle.it/it/linee-guida/piano-forestazione-urbana/pagina2006.html).

2.2. Emission inventory

In the last two decades the Tuscany regional administration has adopted an emission inventory based on official methodology called IRSE (Regional Inventory of Sources of Emissions to the atmosphere), that provides regional estimates of pollutants emissions from industrial, civil, and natural sources at different spatial resolutions (from 1-km spatial grid to municipal level). The database is built according to the national standards indicated by the Italian Institute for Environmental Protection and Research (ISPRA) as well as following the methodologies adopted at European level (EMEP/CORINAIR, 2007; EMEP/EEA, 2019). The emission sources included in the database are classified according to the European standard nomenclature named SNAP '97 (Selected Nomenclature for Air Pollution) and divided, as broader level of aggregation, into 11 macro-sectors (Table 1a). Each inventory database update provides an updated estimate, and a revision of all previous years estimates to make them comparable across the years as well as attributable to current changes of emission sources (Table 1b).

2.3. Land use and tree cover analysis

A LU analysis of the municipality was performed based on the available data (2016) extrapolated from the LU map of the Tuscany region. This database included 44 classes which were used to identify the type and extent of the forest areas falling within the municipality. All detected classes were aggregated in six major classes: broadleaf forest, needleleaf forests, olive trees, and herbaceous areas, this latter including grasslands and annual herbaceous crops. The fifth class consisted of urban areas and the sixth all other classes (i.e., cemeteries, greenhouses, sporting areas, etc.) (Fig. 2a).

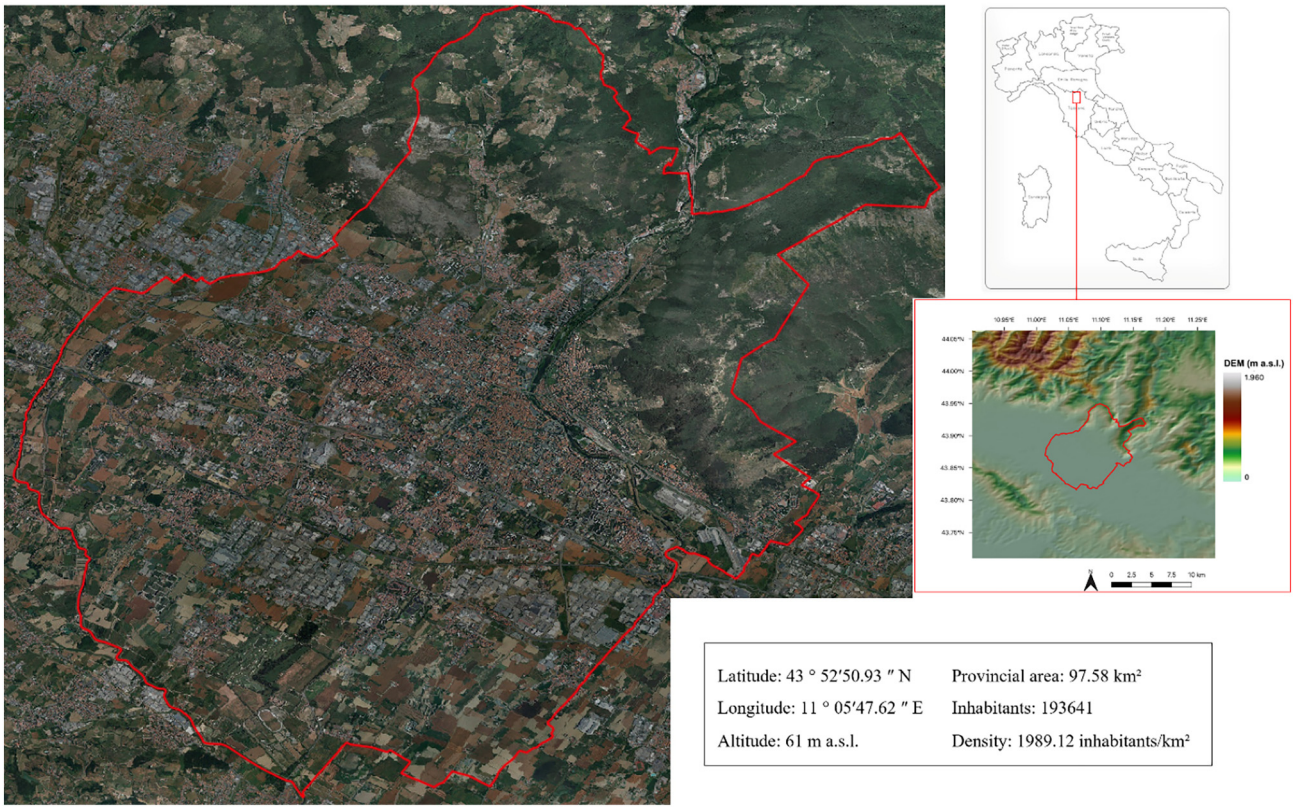


Fig. 1. Localization in Italy, orographic (DEM-Digital Elevation Model) and geographical information of Municipality of Prato.

A further layer containing information of both public and private trees located in the urban area of Prato was built by coupling an urban trees georeferenced inventory (UTI) owned by the municipality, with photointerpretation of private trees distribution (Fig. 2b), in order to have a realistic number of urban trees within the municipality, excluding extra-urban forest areas. High spatial resolution (20 cm) airborne images from *GEOscopio*, the open-source geoportal of Tuscany Region (http://www502.regione.toscana.it/geoscopio/fototeca.html), were used for the photointerpretation.

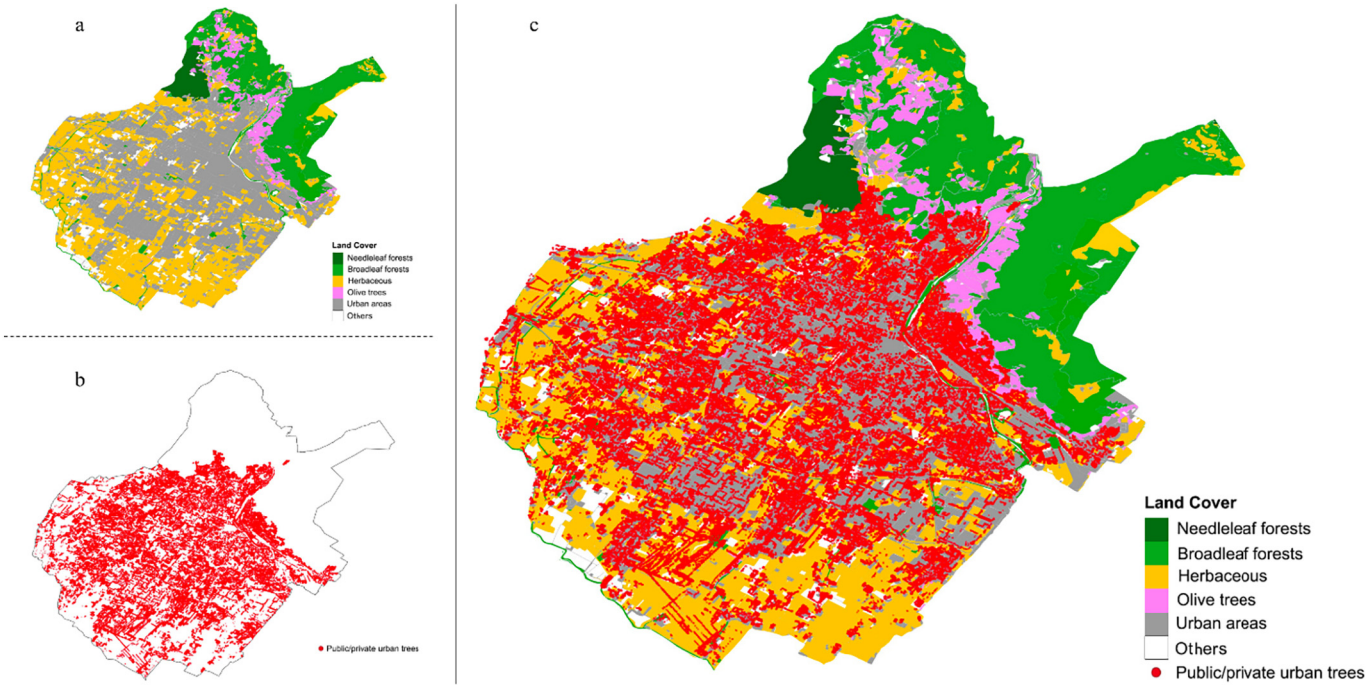


Fig. 2. LU classification of the Prato Municipality according to seven classes: needleleaf forest (light green); broadleaf forest (dark green); herbaceous areas (yellow); olive trees (pink); urban areas (grey). Other areas (white) included cemeteries, greenhouses, sporting areas, etc. Public and private trees were showed as red dots.

Table 1
(a) The 11 macro-sectors aggregated as broader level as classified according to the European standard nomenclature named SNAP '97. (b) CO_2 emissions (tons) and their relative percentage for all 11 macro-sectors and aggregated for the main contributing sectors (i.e., combustion processes, road transports and machinery, and other sectors) within the Municipality of Prato during the period 1995–2017 (source: IRSE).

(a)	Macrosectors				
ID	Name				
01	Combustion in energy and transformation industries				
02	Non–industrial combustion plants				
03	Combustion in manufacturing industry				
04	Production processes				
05	Extraction and distribution of fossil fuels and geothermal energy				
06	Solvent and other product use				
07	Road transport				
08	Other mobile sources and machinery				
09	Waste treatment and disposal				
10	Agriculture				
11	Other sources and sinks				
(b)		Macrosectors (all)	Combustion processes	Road transport and machinery	Others
years		ID: 01–11	ID: 01,02,03	ID: 07,08	ID: 04,05,06,09,10,11
1995	kt CO_2	529.3	285.3	243.6	0.3
2000	emissions	600	326.6	265.2	8.2
2003	(tons)	719.8	392	296.3	31.4
2007		751.9	431.6	320.1	0.2
2010		713.6	426.8	286.7	0.1
2013		571	270	300.9	0.1
2015		538.3	256	282.2	0.1
2017		465.8	206.9	257.7	1.2
1995	CO_2	100 %	53.91 %	46.03 %	0.05 %
2000	emissions	100 %	54.43 %	44.21 %	1.37 %
2003	(%)	100 %	54.47 %	41.17 %	4.36 %
2007		100 %	57.40 %	42.57 %	0.03 %
2010		100 %	59.81 %	40.17 %	0.02 %
2013		100 %	47.29 %	52.70 %	0.01 %
2015		100 %	47.55 %	52.43 %	0.02 %
2017		100 %	44.42 %	55.33 %	0.25 %

The public trees inventory includes information about geolocation of each tree, year of sampling, and characteristics as species, circumference, and diameter. We selected only data collected on the most recent available year i.e., 2018 corresponding to the 92.7 % (i.e., 26,356 trees) of the total dataset. The largest fraction of the excluded species (7.3 %) resulted to be mainly associated to shrubs.

Trees were aggregated to 29 genera to calculate the number of species and trees, and the average diameter and circumference for each genus (Table 2). This approach allowed building the public/private trees layer for the whole municipality and, at the same time, to reduce uncertainties in trees presence and localization over the urban area. Finally, the public/private trees map was superimposed over the six-classes LU map (Fig. 2c, Table S1).

2.4. Tree volumes and urban forest area

The tree volumes and C-stock were calculated for all urban trees to improve modelling estimates of the net carbon fluxes as described below. This information was obtained at first by aggregating the selected trees of the public urban trees inventory in 15 classes (Table S1) based on similarities between species, as reported in literature (Federici et al., 2008; Brilli et al., 2019). For each class, hypsometric curves were built (Fig. S1) using tree diameters and the relative equations retrieved from Brilli et al. (2019) to estimate tree heights. Then, trees heights, circumferences and diameters were aggregated in groups of 5 cm for each class. Finally, specific biomass expansion factors (BEF), wood basic densities for aboveground biomass estimate (WBD) and root/shoot ratio reported by Federici et al. (2008) (Table S2) were applied at each 5-cm group of the 15 classes to calculate tree volume (m^{-3}) and biomass (tons/C) (Fig. S2).

The tree crown areas were calculated to estimate the vegetation cover for the official afforestation scenario (OAS). This information was obtained by calculating the average broadleaf and needleleaf tree crown areas and the ratio between these two categories over the urban context, as reported by the public trees inventory (78 % and 22 % for broadleaf and needleleaf, respectively). Specifically, from the final public/private trees layer, five trees representative of trunk circumference of each of the 29 genera (Table S3) were chosen. For each of the 155 trees, the crown areas were manually segmented and computed. Then, these crown areas were aggregated, weighted, and averaged following two steps: first according to the identified 15 classes, and then for the two forest categories (Table S3). The two final tree crown areas were assumed for the 190,000 new trees foreseen by the afforestation scenario and according to their relative presence within the municipality. Following this approach, the spatial coverage estimated for the official afforestation scenario resulted to be 979.25 ha. Once detected the number of hectares, the OAS was developed over the 100 % of herbaceous area. This assumption was done to overcome the lack of information about the available surface for the urban forest development in the municipality of Prato but taking in account the planting of 190,000 new trees foreseen by official afforestation plan. Due to the extension of olive orchards in the foothill, the fraction vegetation cover (FVC) was also used to feed the biogeochemical model specifically for this tree species. Finally, the CO_2 sequestration capacity of the OAS was obtained by subtracting instead of adding the CO_2 sequestration capacity of the herbaceous area to the urban forest CO_2 sequestration capacity.

2.5. Modelling approach

The CO_2 sequestration capacity of the whole municipality was estimated based on the use of two models, C-Fix and BIOME-BGC, as proposed by Maselli et al. (2009a, 2009b) and Chirici et al. (2022). Their outputs are integrated to exploit the advantages of the two models, i.e., the higher accuracy of C-Fix in estimating gross forest production and the capacity of BIOME-BGC to simulate respiration and allocation processes.

C-Fix in fact, is a light use efficiency model capable of estimating gross primary production (GPP; Eq. (1)) based on the use of meteorological data and satellite imagery, as proposed by Maselli et al. (2009a):

$$GPP = \varepsilon \cdot Tcor \cdot Cws \cdot fAPAR \cdot PAR \quad (1)$$

where ε is the maximum radiation use efficiency per each biome type; Tcor is a temperature correction factor of the forest type; Cws is a water stress factor based on meteorological data; fAPAR is the fraction of absorbed PAR derived from the NDVI imagery and PAR is the solar incident PAR (see Maselli et al., 2009a for more details).

BIOME-BGC, which is a bio-geochemical model capable of simulating the storage and fluxes of water, C and nitrogen within terrestrial ecosystems (Golinkoff, 2010), requires daily climate data, general environmental information (i.e., about soil, vegetation and site conditions) and parameters describing the ecophysiological characteristics of the vegetation (White et al., 2000). It quantifies the initial amounts of all carbon and nitrogen pools by simulating quasi-equilibrium condition based on site eco-climatic characteristics, therefore the sum of all simulated respiration processes is nearly equivalent to GPP, which makes annual net primary production (NPP) approximate heterotrophic respiration (Rh) and net ecosystem production (NEP) tend to zero.

Both models were applied over the period 2018–2020 using the daily meteorological data available at 250-m spatial resolution from a regional database (LaMMA Consortium); the NDVI imagery were derived at 10-m spatial resolution from the Sentinel-2 MSI and pre-processed to achieve 24 15-day images per year. The same data were then linearly transformed into fAPAR as proposed by Maselli et al. (2009a). The parameter settings of the model BIOME-BGC were those for herbaceous species, plain-hilly

Table 2
Specific urban trees information was determined by selecting the most updated (i.e., since 2018) information on trees characteristics from the CONSIAG database for the Prato municipality. Tree species were aggregated to genus, and then the number of species, the number of trees, the average diameter and circumference were calculated for each one. The genus n°25 (i.e., oak trees) was further divided according to its main species (a, b, and c) present over the municipality. * Calocedrus was aggregated to Cupressus genus due to the low numbers of trees (i.e., 8).

Genus	ID genus	Species	N° of species	N° of trees	Circumference avg.	Diameter avg.
Abies	1	Alba, Pinsapo	2	12	76.5	24.4
Acer	2	Campestre, Ginnala, Negundo, Freemani, Platanoides, Pseudoplatanus, Saccharinum	7	2134	67	21.3
Aesculus	3	Hippocastanum, Indica, Carnea	3	218	133	42.4
Alnus	4	Cordata, Glutinosa, Incana	3	15	40	12.7
Betula	5	Pendula	1	20	52	16.6
Carpinus	6	Betulus	1	619	57.4	18.3
Catalpa	7	C. Bignonoides	1	55	94.7	30.2
Cedrus	8	Atlantica, Deodara, Libano	3	764	163	51.9
Celtis	9	Australis, Levigata	2	1345	67.6	21.5
Corylus	10	Avellana, Colurna	2	114	19	6.1
Cupressus	11	Sempervirens, Leylandi, Arizonica, Glabra, Calocedrus*	5	1465	83.4	26.6
Fraxinus	12	Americana, Angustifolia, Excelsior, Ornus, Oxicarpa	5	1618	53.9	17.2
Gleditsia	13	*G. triacanthos*	1	113	86.1	27.4
Juglans	14	Regia, Nigra	2	98	77.7	24.7
Liquidambar	15	Liquidambar S.	1	88	57.2	18.2
Magnolia	16	Grandiflora, Liliflora, Solanganea	3	260	64.39	20.5
Olea	17	Europaea	1	1622	74	23.6
Ostrya	18	Carpinifolia	1	164	38	12.1
Picea	19	Abies, Glauca, Pungens	3	39	74.2	23.6
Pinus	20	Pinea, Nigra, Pinaster, Silvestris, Strobo, Wallichiana, Halepensis	7	3491	165.6	52.7
Platanus	21	Orientalis, Acerifolia	2	1578	144.6	46.1
Populus	22	Italica, Nigra, Alba, Canescens, Tremula	5	598	123.45	39.3
Prunus	23	Avium, Cerasifera, Domestica, Dulce, Laurocerasus, Persica, Serrulata, Armeniaca, Lusitanica, Amygdalus	10	433	57	18.2
Pyrus	24	Calleriana, Communis	2	679	42.5	13.5
Quercus	25	Ilex [(a)], Pubescens [(b)], Cerris [(b)], Petrae [(b)], Palustris [(b)], Rubra [(b)], Suber [(b)], Robur [(c)]	8	2905	89.5	28.5
Robinia	26	*R. pseudoacacia*	1	446	91	29.0
Sophora	27	*S. japonica*	1	44	99.4	31.7
Tilia	28	Americana, Europaea, Tomentosa, Ibrida argentea, Cordata, Platifoglia	6	5147	102	32.5
Ulmus	29	Pumila, Laevis, Minor	3	272	93.4	29.7
Total			92	26,356		

broadleaf forests, and plain-hilly coniferous forests (Maselli et al., 2009b; Maselli et al., 2013).

The simulation of actual forest condition required the use of two maps to correct the simulated fluxes and obtain actual conditions: one is the growing stock volume map produced by Chirici et al. (2020) at 23-m spatial resolution, and the other is the soil organic carbon map produced by Gardin et al. (2021) at 250-m spatial resolution. The former map was utilized to correct autotrophic respirations (Ra) whilst the latter, being soil organic carbon (SOC) strictly related to decomposition, was used to correct Rh (Chirici et al., 2022).

The estimates of net ecosystem production (NEP, g C m^{-2} $year^{-1}$) currently obtained with this modelling approach have demonstrated to be comparable with measurements collected by the eddy covariance technique at numerous sites spread all over Italy (see Maselli et al., 2009b; Chirici et al., 2016). The final product was a gridded map of NEP expressed in terms of g C m^{-2} $year^{-1}$ and then converted into t CO_2 ha^{-1} $year^{-1}$ to make them comparable to the emission data provided by IRSE.

2.6. Afforestation scenarios

Afforestation scenarios were built to consider both the effect of the OAS and alternatives afforestation scenarios (AAS) in terms of CO_2 sequestration capacity. The OAS was built considering the current broadleaf-needleleaf ratio ($BN_{78/22}$), a surface of 975.25 ha (R00), and the plantation over the 100 % of herbaceous areas (S1). The AAS were built considering the interactions between 13 levels of BN, 21 levels of surface to be forest (R), and 7 levels of type of surface to be forest (S) (Table S5). These interactions provided a total of 1911 scenarios (i.e., 1910 AAS + 1 OAS).

Both OAS and AAS were here considered as static plantations (i.e., no dynamic growth) with a continuous canopy cover of adult trees with dimension agreeing with the current "average-tree" for both broadleaves and needle leaves. Urban tree management (i.e., pruning and composition) and climate conditions were intrinsically included in the data since they reflected the current conditions of trees extrapolated by the inventory and remote sensing analysis. This static approach was chosen to have a suitable comparison between the latest emission data available for the Municipality of Prato - (i.e., 2017) - and the CO_2 sequestration potential provided by different urban afforestation plans.

3. Results

3.1. Land use classification

The LU analysis grouped the municipality of Prato in seven major classes (Table S1). *Urban areas* (Class 5) resulted the largest class, occupying a total of 3577.65 ha (36.7 % of the Prato territory), whilst *public/private urban trees* (Class 7) represented the smallest class (1.9 %), with 185.07 ha of land cover. The *herbaceous areas* (Class 3), composed by permanent urban and natural grasslands, annual crops, vegetables, recreational areas represent 30.5 % of the total land cover, whilst the *olive trees* (Class 4) consist of 443.9 ha (4.5 %). The two forest classes, *needleleaf forest* (Class 1) and *broadleaf forest* (Class 2), cover a surface of 233.11 ha (2.4 %) and 1818.25 ha (18.6 %) respectively. These four classes (1–4) together cover the 56 % (5469.8 ha) of the Municipality of Prato. The Class 6 (*Others*) includes categories such as cemeteries, greenhouses, sporting areas, rivers and lakes, mixed agroforestry systems, and occupies 525.6 ha (5.4 %).

3.2. Actual CO_2 sequestration

Fig. 3 shows the net fluxes expressed in terms of t CO_2 ha^{-1} yr^{-1} for the whole Municipality of Prato as derived from the modelling approach, with sink expressed with negative sign. Results indicated that the CO_2 exchange ranged from < -35 to $+25$ tCO_2 ha^{-1} yr^{-1}, with the highest emission

source provided by a peatland in the south part of the Municipality. The highest sink was observed in the north-east part of the municipality, characterized by forests and olive trees. On average, the major sequestration was provided by broadleaf forest ($+13.46$ tCO_2 ha yr^{-1}), whilst needle leaf forest and olive trees showed similar magnitude, sequestering $+7.33$ and $+7.11$ tCO_2 ha yr^{-1}, respectively. Agricultural and other areas little contributed to CO_2 sequestration, resulting in $+0.73$ and $+1.4$ tCO_2 ha yr^{-1}, on average. Finally, whilst urban area did not show any CO_2 sequestration capacity, the public and private urban trees showed a considerable efficiency ($+4.88$ tCO_2 ha yr^{-1}, on average).

Considering the whole area covered by each class, the highest sink was reported by broadleaf forest (24.5 $ktCO_2$ yr^{-1}), followed by olive trees (3.16 $ktCO_2$ yr^{-1}) and herbaceous areas (2.18 $ktCO_2$ yr^{-1}). Needle leaf forests, which occupy about 230 ha, were estimated to sequester 1.71 $ktCO_2$ yr^{-1}, whilst urban trees contributed for 0.9 $ktCO_2$ yr^{-1}. Under the actual conditions, the estimated total CO_2 sequestration capacity within the whole municipality was 33.1 $ktCO_2$ yr^{-1}.

3.3. Afforestation scenarios and municipal CO_2 sequestration capacity

Once the current CO_2 sequestration capacity of the whole municipality was evaluated (33.1 $ktCO_2$ yr^{-1}), the potential of each afforestation scenario was assessed (Fig. S3). The CO_2 sequestration capacity among afforestation scenarios was evaluated by assessing the differences (%) between various AASs versus the reference OAS. The latter was assessed to be as high as 11.1 $ktCO_2$ yr^{-1}. For simplicity, these differences were grouped into classes of 10 % and reported for all BN (13 levels) and S (7 levels), whilst only current (R0), minimum (R_{-50}) and maximum (R_{+50}) hectares to be forested were shown (Fig. 4).

As expected, increasing the afforestation surface of 50 % (R_{+50}) led to the highest increase in CO_2 sequestration ($+30$ to $+70$ %) compared to the OAS. By contrast, when the extension was reduced of 50 % (R_{-50}), the CO_2 sequestration capacity was reduced between 50 and 70 %. Moving from herbaceous to anthropic as land use for urban afforestation development, the CO_2 sequestration capacity tended to increase, finding the highest values when the urban forest was built over an herbaceous to anthropic percentage ratio of 70:30 (S7). This pattern was clearly observed under R_{+50} for $BN_{63/37}$, $BN_{75/25}$, $BN_{87/13}$, where CO_2 sequestration increased of one class step (10 %) compared to S1 to S6. By reducing the extension of the afforestation surface (R_0 and R_{-50}), the CO_2 sequestration increased at a lower rate. Concerning BN changes, an increase in the number of broadleaves species resulted in an increase of CO_2 sequestration capacity under all surface extensions (R) and LU (S). The highest rate of CO_2 sequestration increase was observed at higher afforestation surface (R_{+50}), whilst the lower rates were found when the surface was reduced. Under all scenarios, the highest CO_2 sequestration (18.6 $ktCO_2$ yr^{-1}) was observed under the urban forest scenario named $R_{+50} - S7 - BN_{96/4}$, whilst the lowest (5.0 $ktCO_2$ yr^{-1}) under the $R_{-50} - S1 - BN_{60/40}$.

Once the CO_2 sequestration capacity of all 1911 afforestation scenarios was evaluated, the expected CO_2 sequestration capacity of the whole municipality was assessed. In Fig. 5, the CO_2 sequestration capacity under actual, OAS, and extremes (i.e., minimum, and maximum CO_2 sequestration capacity) afforestation scenarios were reported.

The analysis revealed that the adoption of the OAS increased the actual CO_2 sequestration capacity (33.1 $ktCO_2$ yr^{-1}) by 31 % (43.5 $ktCO_2$ yr^{-1}). This increase was driven by the land-use change of 979.25 herbaceous hectares to urban forest, which contributed for 11.1 $ktCO_2$ yr^{-1}. By contrast, the CO_2 sequestration contribution of the herbaceous area decreased from 2.2 to 1.46 $ktCO_2$ yr^{-1} (-32.9 %), as driven by the decrease of herbaceous land use from 2974.48 to 1995.23 ha. The urban forest maximizing the sink capacity ($R_{+50} - S7 - BN_{96/04}$) contributed to increase the actual CO_2 sequestration capacity of 53.9 %, resulting in 51.0 $ktCO_2$ yr^{-1} sequestered within the whole municipality. This increase was driven by the land-use change of 1028.21 ha from herbaceous (70 %) and 440.66 ha from anthropic (30 %) to urban forest (18.6 $ktCO_2$ yr^{-1}), whilst the CO_2 sequestration of the herbaceous area decreased from 2.22 to 1.43 tCO_2 yr^{-1} (-34.5 %) as driven by the decrease of herbaceous land use from 2974.48 to 1946.27 ha. The urban forest minimizing the sink capacity

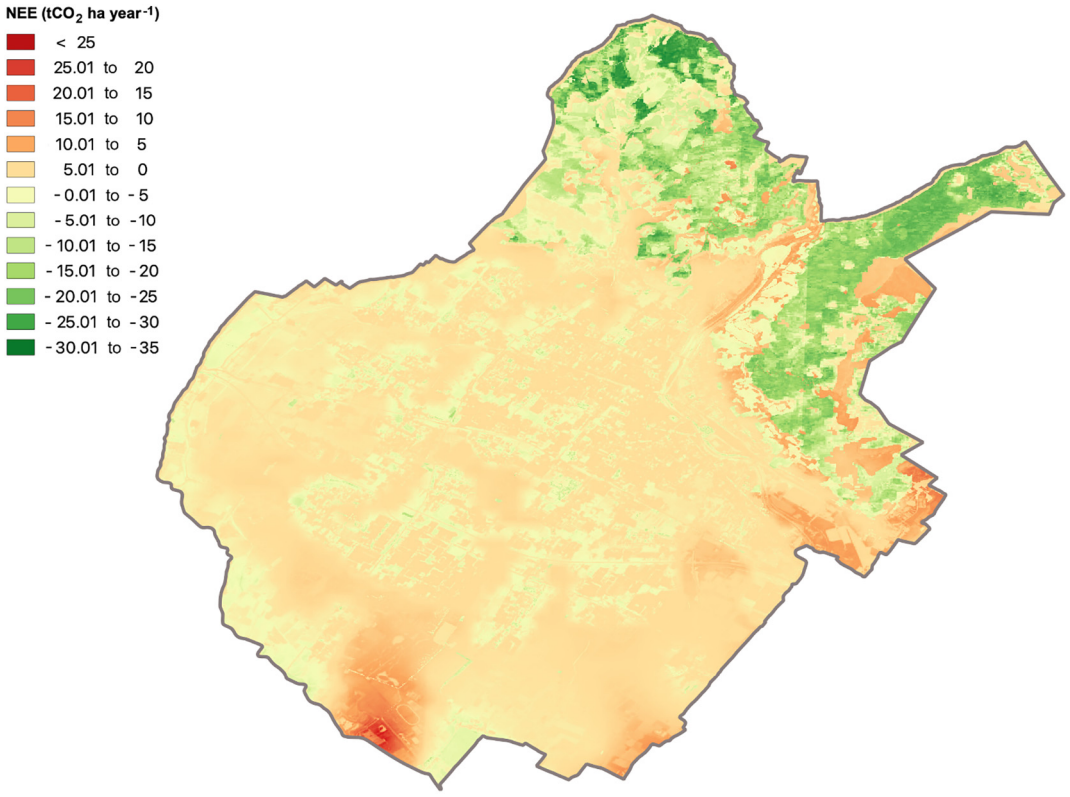


Fig. 3. Map of NEE for the Municipality of Prato.

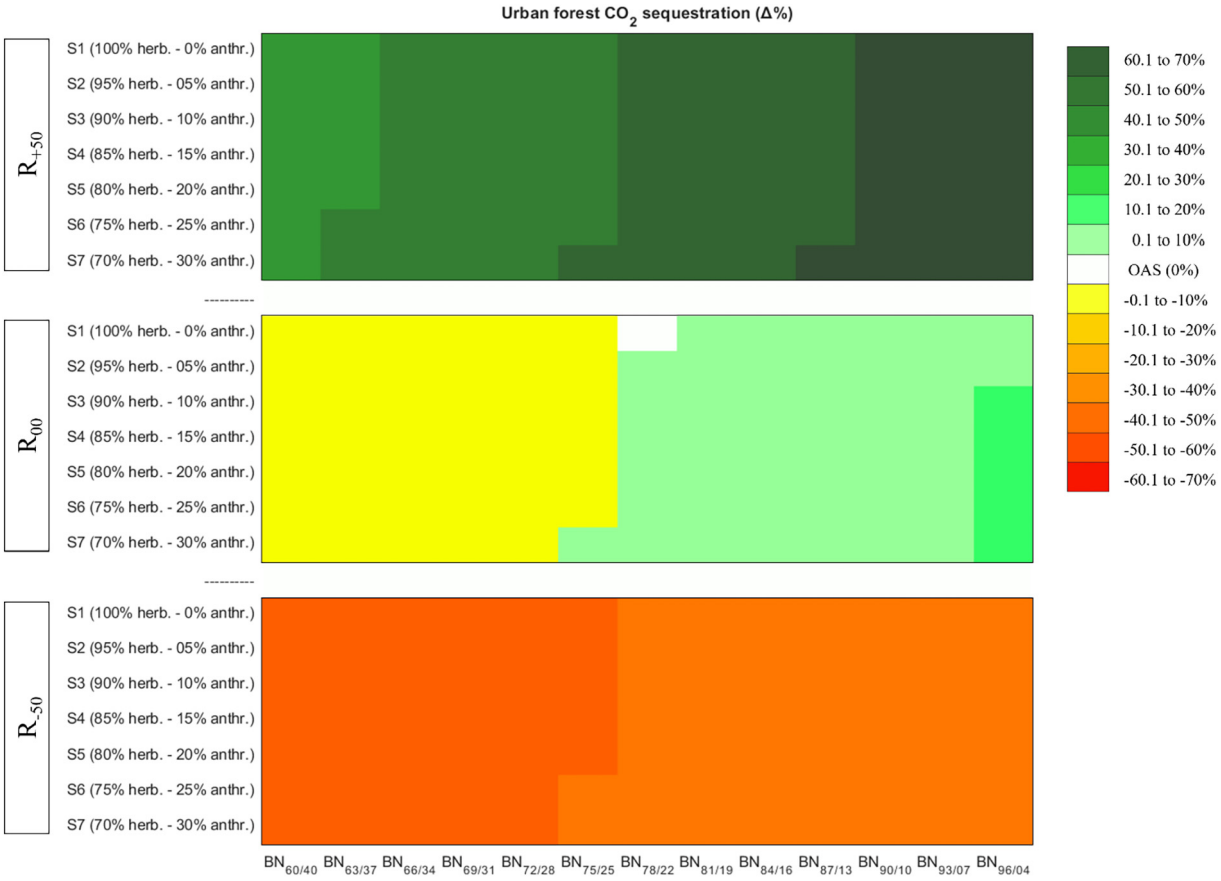


Fig. 4. Map of ΔCO_2 sequestration between OAS and 272 AAS. The comparison was proposed considering only the reference, the maximum (+50 %) and the minimum (−50 %) surface to be forested included in the analysis and evaluating ΔCO_2 sequestration grouping scenarios by 10 % classes.

(R_{-50} − S1 − $BN_{60/40}$) still provided an increase compared to the actual CO_2 sequestration capacity of 17.1 %, resulting in 33.1 $ktCO_2\ yr^{-1}$ sequestered within the whole municipality. This increase was driven by the land-use change of 489.6 ha from herbaceous to urban forest (5030.4 $tCO_2\ yr^{-1}$), whilst the CO_2 sequestration of the herbaceous area slightly decreased from 2.22 to 1.82 $ktCO_2\ yr^{-1}$ (−16.5 %).

3.4. Impacts towards C-neutrality

Under the actual conditions, the green areas within the Municipality of Prato were able to offset the 7.1 % of the total emissions (465.8 $ktCO_2\ yr^{-1}$). The development of the OAS contributed to increase the emissions offset of only +2.2 % compared to the actual conditions (Fig. 6). Even the scenario maximizing the CO_2 sequestration capacity of green areas (51.0 $ktCO_2\ yr^{-1}$) was far to offset the emissions, showing an increase of 3.9 % compared to the actual conditions and only slightly higher (+1.7 %) than that provided by OAS. The scenario minimizing the CO_2 sequestration capacity of green areas was able to offset 37.8 $ktCO_2\ yr^{-1}$, slightly higher (+1 %) if compared to the actual conditions but lower (−1.2 %) than the OAS.

3.5. Emissions trajectories and C-neutrality

The path of the emissions trajectories for the Municipality of Prato in 2030 was estimated through the implementation of two models fitting and extrapolating the emission inventory data (Fig. 7). One is a simple linear model (R^2 = 0.97), where emissions in 2030 decrease at a rate proportional to the last five estimates (i.e., 2007, 2010, 2013, 2015 and 2017) reported by IRSE dataset, whilst the other included an exponential model (R^2 = 0.95). The fitting was applied against the five IRSE municipal emissions data since 2007, as considered the period of emission peak achievement within the municipality according to the IRSE database (see Table 1).

Using the linear model (yellow line), the predicted emissions in 2030 were 82.3 $ktCO_2\ yr^{-1}$, with a yearly decline rate of −7.7 %. By contrast, using the exponential model (red line) the predicted emissions in 2030 were higher (260 $ktCO_2\ yr^{-1}$), with a yearly decline rate of −4.3 %. In the hypothesis of C-neutrality achievement, the CO_2 sequestration capacity accounted for actual, OAS and highest sequestration scenarios might be close to offset emissions only under predicted linear emissions reduction, compensating between 40 and 60 % of anthropogenic emissions in 2030 depending on the adopted scenarios. Using the exponential model, the CO_2 sequestration capacity could compensate emissions in a range between 12 and 20 %, well below the target of C-neutrality. Only under strong emissions decline, represented by the low interval of confidence using the linear model (yellow dashed line), the C-neutrality might be earlier achieved as the more mitigative scenarios are adopted.

4. Discussion

Urban afforestation has been largely encouraged in the last years as NCS to provide communities with a host of ecosystem services (Hiemstra et al., 2017; Hsieh et al., 2018; Marando et al., 2019; Nowak et al., 2018; Pataki et al., 2021) as well to increase climate change mitigation through atmospheric CO_2 sequestration and C-storage (Nowak and Crane, 2002; Raciti et al., 2012; Hutyra et al., 2011; Strohbach and Haase, 2012). This practice, currently considered one of the most important in the urban context, can contribute to achieve the goal of CO_2 emissions reduction of 40 % by 2030 (EU, 2020) through shadings effects, radiative forcing and energy demand reduction, and C-sink capacity from small to large scale (Escobedo et al., 2011, Stone, 2012; Safford et al., 2013).

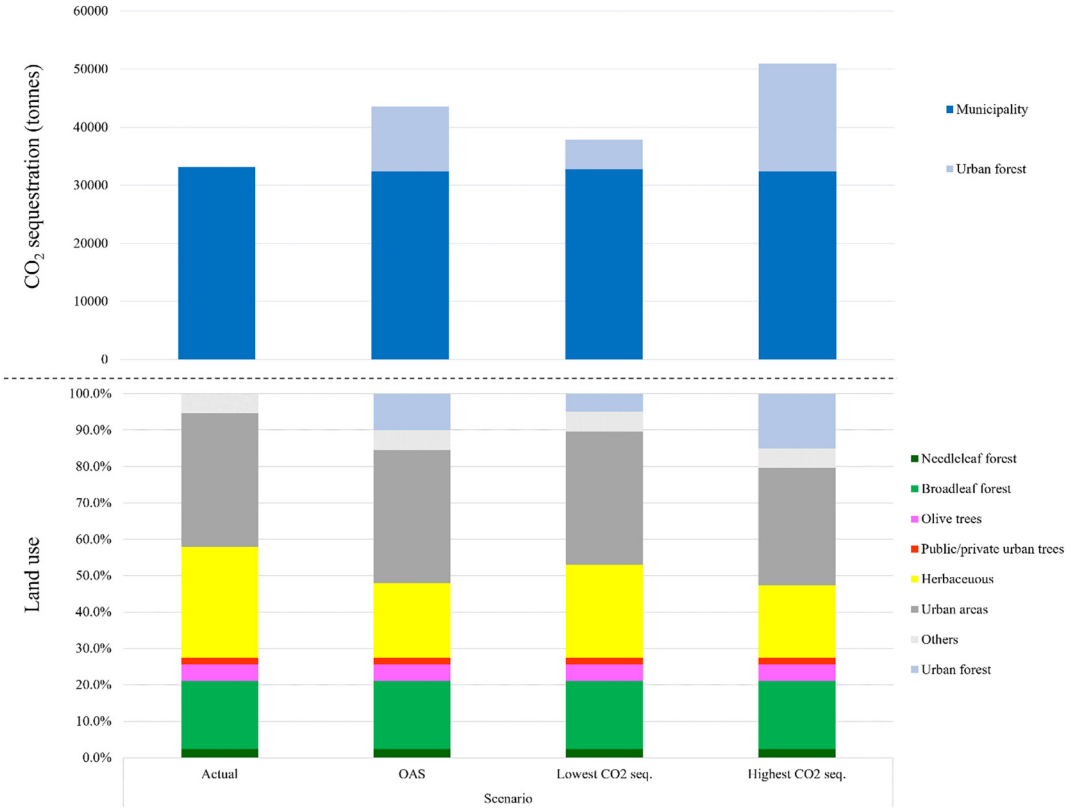


Fig. 5. Histograms of (a) CO_2 sequestration for the whole Municipality of Prato under actual, OAS, and extremes (minimum and maximum) CO_2 sequestration provided by afforestation scenarios. The total CO_2 sequestration was divided as provided by both municipal (blue) and afforestation scenarios (cyan); (b) LU changes within the Municipality of Prato according to the adopted afforestation scenarios.

In our study, the CO_2 sequestration capacity of green areas was investigated at municipal scale by an integrated approach including urban trees inventory, LU analysis and modelling. This approach was adopted to maximize the level of detail in reproducing the actual CO_2 sequestration of the study area. However, multiple approaches characterized by different level of complexity were used in recent years to evaluate the C-sequestration capacity and C-storage in several global regions and at different resolutions. For instance, Teo et al. (2021), estimated the global potential and limits of urban afforestation worldwide by land cover analysis at 10 m resolution for both urban areas and reforestable areas within cities considering only grass and shrub cover suitable for afforestation, and estimating C-sequestration potential from aboveground carbon using predicted natural forest regrowth values at a spatial resolution of 1 km^2. Fargione et al. (2018) quantified the potential of urban forest to increase C-storage and avoid greenhouse gas emissions by assessing current forest cover within municipal boundaries of 3.535 U.S. cities and estimating the potential absolute increase in tree cover for each municipality in 2025 as the product of the estimated potential percentage forest cover increase. At smaller scale, several specific modelling approaches were used. For instance, Parsa et al. (2019) evaluated the C-sequestration and C-storage provided by urban trees in Tabriz (Iran) using the i-Tree Eco model (https://www.itreetools.org/tools/i-tree-eco) integrated with additional regional-specific tree data. Similarly, Boukili et al. (2017) estimated the CO_2 sequestration in a random sample of 90 street segments in the city of Cambridge (USA) using i-Tree Street model, UTI and empirical measured growth rates combined with UTI. Russo et al. (2014) estimated the aboveground C-storage and C-sequestration in a subsample of urban trees in Bolzano (Italy), using city-specific dendrometric and allometric biomass equations extrapolated by one European and two U.S carbon estimation models. Abbate et al. (2021) investigated on the C-sequestration potential in the Municipal context of Avezzano (Italy) using trees growth modelled by a logistic curve based on the Verhulst approach, whilst Uniyal et al. (2022) applying the combination of different machine learning algorithms and geospatial data to estimate aboveground biomass and carbon of the urban forests in the arid region of Jodhpur (India). Further approaches were proposed by Agbelade and Onyekwelu (2020), using simple random sampling in urban forests in two Nigerian cities, by Davies et al. (2011) that analyzed the quantities and spatial patterns of above-ground carbon stored in Leicester (UK) by surveying vegetation across the entire urban area and by several studies in India using conventional methods (Anjum et al., 2020; Deb et al., 2016; Dhyani et al., 2021; Khadanga and Jayakumar, 2018; Lahoti et al., 2020).

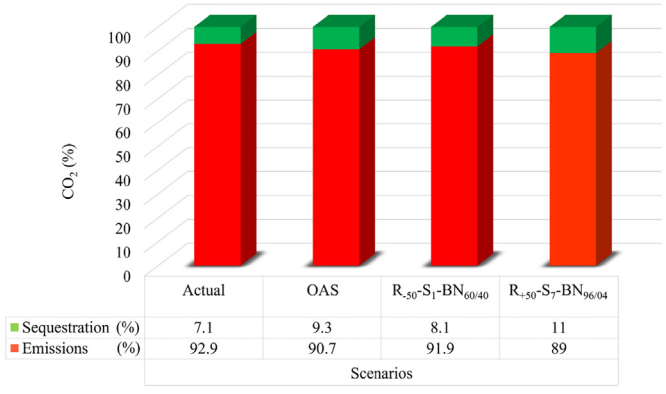


Fig. 6. Emissions offset within the study area according to the actual, OAS, and extremes (minimum and maximum) CO_2 sequestration afforestation scenarios.

Differently from other studies, the method proposed here not only quantified the actual CO_2 sequestration capacity within the study area, but also evaluated the urban forest CO_2 sequestration changes according to both proposed (OAS) and alternatives (AAS) afforestation scenarios, with the

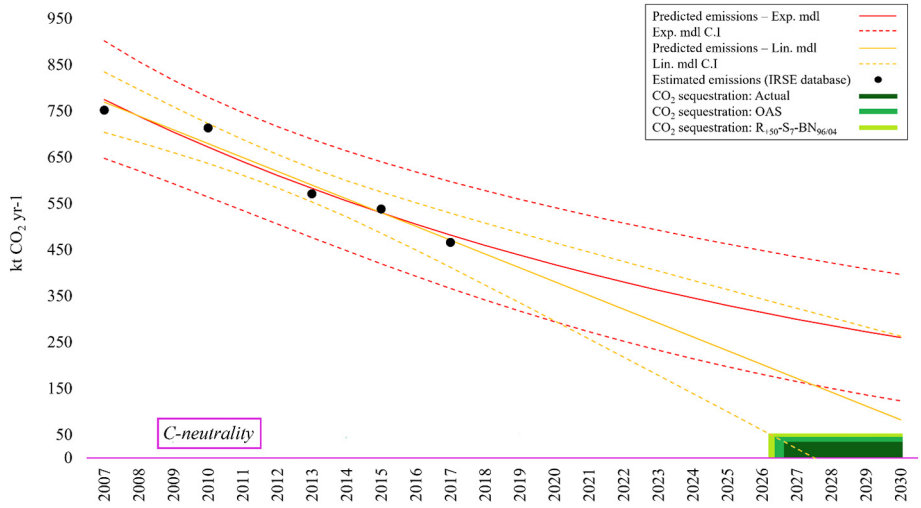


Fig. 7. Predicted emissions in t CO_2 yr^{-1} and the relative interval of confidence for the Municipality of Prato according to the linear (yellow) and exponential (red) models. Green areas represent the actual (dark green), OAS (green), and highest (light green) CO_2 sequestration scenarios. The purple line shows the C-neutrality target.

related net carbon balance changes in the whole municipality. These scenarios, which considered changes in urban forest extensions (ha), type of surface to be forested (anthropic or herbaceous), and BN ratio, were built to quantify the impact of the major variables involved in urban forest development on CO_2 sequestration changes. Whilst positive or negative changes in the urban forest extensions clearly impacted the CO_2 sequestration magnitude, this analysis revealed as both the type of surface to be forested and the BN ratio should be considered crucial for policymakers in planning new urban forests, where constraints associated to availability of spaces and municipal policies are often present. The plantation of urban forests is usually planned over unused municipal areas, river edges or pre-existing urban green areas characterized by the presence of herbaceous vegetation which is already contributing to CO_2 sequestration. Under the same extension and BN ratio, the urban forest showed a lower CO_2 sequestration capacity when it was developed over higher percentage of herbaceous than anthropic area. The C sequestration estimated from herbaceous cover (20 g C m^{-2} yr^{-1}) was obtained from different LU such as annual crops, pastures, grassland, vegetables, bare soils, etc., where the carbon balance changed from negative to positive according to ecosystem type and management (poorly or unmanaged to sustainable to intensive management). This averaged value was observed to be in line with literature. For instance, Liang et al. (2020), upscaling site-level NEE from 44 flux towers and based on a model tree ensemble approach, reported the mean annual C sequestration capacity of temperate grassland of 51.8 ± 7.9 g C m^{-2} yr^{-1}. Pereira et al. (2007) in a grassland dominated by herbaceous annuals in southern Portugal observed variation in NEE from −190 to +49 g C m^{-2} yr^{-1} during the period 2003–2006. Khorchani et al. (2021) using an ecohydrological model (RHESSys) in abandoned cropland areas in Mediterranean mountains observed that under natural revegetation scenario the ecosystem showed average annual carbon emission (27 g C m^{-2} yr^{-2}), whilst under two managed scenarios the ecosystem provided average annual carbon sequestration rates of 43 and 112 g C m^{-2} yr^{-1}. In this study, the lower CO_2 sequestration obtained from urban forest developed over herbaceous area than over anthropic area was due to the avoided C-sequestration intake provided by herbaceous cover, which was subtracted instead of added to the urban forest C-sink capacity because of light use efficiency and water availability competition under continuous tree canopy cover. This approach was also chosen as considered the most conservative to evaluate the C-sink capacity of urban forest growth over pre-existing green areas. Despite urban forest development could increase the total CO_2 sequestration capacity when developed over both abandoned and well-managed green areas, the planting of urban trees over grassland areas does not necessarily enhance belowground carbon storage neither improve other soil ecosystem services (Edmondson et al., 2014). In this perspective, planting trees over anthropic surfaces should be considered the best approach to provide advantages not only related to CO_2 sequestration increase, but also to water cycle and hydrological conditions regulation (Barbaro et al., 2021; Salata et al., 2021).

Concerning the BN ratio, the overall C-sequestration capacity was observed to increase moving towards larger fractions of broadleaf forest. This was likely due to the not optimal growing conditions of needle leaves, that are characterized by exogenous and slow growth species (i.e., Abies, Cedrus and Cupressus) and were observed here to present a lower plant density and a lower average tree volume compared to broad leaves. Despite C-fluxes assessment between these two categories (i.e., broad leaves and needle leaves) are limited, and most studies have focused on specific species and locations, international research reported higher C-sequestration over broadleaves than over needle leaf forests (i.e., Valentini et al., 1996 in beech forest at Collelongo, Italy; Goulden et al. (1996) in mixed deciduous at Harvard Forest, USA; Canadell et al., 2000). Xiao et al. (2008) observed that the carbon assimilated in U.S. terrestrial ecosystems was highest in croplands, intermediate in deciduous forests, savannas, and mixed forests, and lowest for evergreen forests and grasslands. Also, the CO_2 sequestration capacity provided by urban forest may be reinforced or counteracted due to changes in surface albedo. Despite in this work the impact of albedo changes was not assessed, the expected increase in albedo moving towards broadleaves may decrease the radiative imbalance at the top of the atmosphere, resulting into maintenance of the current carbon sink and increased local cooling of (Lutz and Howarth, 2014, Luyssaert et al., 2019). Since urban forest development requires a considerable land surface within the urban space, this information can be crucial for policymakers to increase C-sequestration capacity by maintaining the same expected area for urban forest development.

Looking at the net emission balance, the actual CO_2 sequestration (33.1 kt yr^{-1}) resulted to compensate only a fraction of 7.1 % of the municipal scale GHG emission (465.8 kt yr^{-1}). The effect of the planned urban forest is expected to increase the CO_2 sequestration capacity by 31 %, enhancing the emission compensation by 7.1 % to 9.3 %. When the maximum surface dedicated to urban forest was coupled with the BN ratio maximizing the CO_2 sequestration, a compensation of 11.0 % was reached, which is still far from providing a significant offset of the whole municipality emissions. This result agreed with worldwide literature, where afforestation plans and urban trees increase did not show high efficiency in GHG emissions compensation. For instance, Teo et al. (2021) at global scale observed that the 17.6 % of all city areas suitable for afforestation could offset about 1 % of the total emissions from cities. Hundertmark et al. (2021) observed a C uptake by tree canopy cover of 600 ± 200 g C m^{-2} in three urban campuses in Boston (USA) higher than to that detected in this study (283 g C m^{-2}),

which was not large enough to offset biogenic emissions even when spatially overlapped. Escobedo et al. (2010) indicated that urban trees in Gainesville and Miami-Dade (USA) only moderately offset the city-wide CO_2 emissions, contributing for 3.4 % and 1.8 %, respectively. Parsa et al. (2019) found that trees and shrubs were able to sequester 5.13 $tCO_2\ ha^{-1}\ yr^{-1}$ in Tabriz (Iran), contributing only at 0.2 % of the demand (2471.51 $tCO_2\ ha^{-1}$). Liu and Li (2012) estimated that the urban forests of Shenyang (China) offset the 0.26 % of the annual C emissions of the city. Chen (2015), investigating how urban green infrastructure contribute to the carbon balance in 35 major Chinese cities, observed that the total urban green spaces (6.38 %) of the whole land area, collectively offset only 0.33 % of the carbon emissions from fossil fuel combustion. Reynolds et al. (2017) reported that over 180,000 public trees in Medellin (Colombia) were able to sequester 0.06 % of total and 0.07 % of transportation emissions. In Italy, Vaccari et al. (2013) observed that the greenspaces of the Municipality of Florence collectively offset 6.2 % of the direct carbon emissions (58.700 $tCO_2\ yr^{-1}$), but that the green spaces in the densely built-up city can offset only 1.1 % of the emissions (13.5 $tCO_2\ yr^{-1}$). Russo et al. (2014) indicated that public trees in Bolzano (Italy) can offset only 0.08 % of transportation associated carbon emissions, whilst Speak et al. (2020) observed that urban trees in Merano (Italy) were able to annually sequester 0.61 % of traffic emissions and 0.17 % when all emissions are considered.

Finally, emissions trajectories in 2030 obtained from the implementation of one linear and one exponential model were built to evaluate the efficiency of different afforestation plans to sequester CO_2 for achieving C-neutrality within the Municipality of Prato. The two predicted emissions patterns, built according to a less conservative (linear) and a more conservative (exponential) approach from municipal emissions data by 2007, indicated an expected continuous decrease of anthropogenic emissions in the next decade based on extrapolating the robust decreasing trend observed in the past decade. These patterns were likely driven by the deployment of effective mitigation actions in recent years, which led to a decrease of 52 % and 19.5 % in the two most emissivity macrosectors (i.e., combustion processes, and road transport and machinery, Table 1) between 2007 and 2017. However, expected future emission patterns computed here are necessarily influenced by a large uncertainty. The first source of uncertainty is related to the data used for model fitting, since emissions prediction in 2030 were calculated from emissions estimates that presented a peak in mid-2000–2010, which constrained the decreasing pattern. Secondly, models were arbitrarily chosen based on the performances from regression fitting, which are driven by the emission pattern of the last decade at local scale, without considering impacts driven by environmental, socio economic and policy factors, such as climate variability, industrial processes conditions, policy and market context, and the expectation of changes in these contexts. Third, the comparison between emission and sequestration in 2030 was performed using the current CO_2 sequestration data. Even if major changes in urban structure (tree types and number) and climate conditions are not to be expected, this assumption did not consider CO_2 sequestration changes due to the effect of climate change on tree growth and C-fixation capacity, the impact of extreme events (i.e., windstorm, windstorm, and droughts), green space maintenance (pruning and irrigation) and the related management-induced changes in surface albedo, land-surface roughness, transpiration and sensible heat flux, and local policies. Despite the level of uncertainty, this analysis revealed that even under decreased emissions patterns, the mitigation capacity provided by different and ambitious afforestation scenarios would not be able to approach C-neutrality in 2030. This result confirms that the implementation of large-scale measures to decarbonize all emission sectors must be considered the primary step to approach the C-neutrality target, with urban afforestation providing a fractional contribution.

5. Concluding remarks

Urban afforestation can provide environmental, social, and economic benefits to citizens living in urban areas, and its application should be encouraged and stimulated. However, within the perspective of emission mitigation, results from this study agreed with large part of literature, indicating that the C-sequestration capacity provided by urban forest is often overclaimed. To clarify this aspect, the methodology proposed here was based on a close-to reality approach considering the most updated urban tree data, ground and satellite observations and ecosystem models. Despite the intrinsic uncertainties related to both estimated emission inventory and predicted emissions (model trajectories), as well as to CO_2 sequestration capacity from urban afforestation scenarios, results for a typical European medium-size city indicated that, the idea that urban afforestation can substantially contribute to the compensation of emissions is misleading. Looking at the data, for the Municipality of Prato it would be necessary to forest an area at least 30 times wider than that indicated by the official plan to compensate the current emissions, whilst in the perspective to the C-neutrality target in 2030 as foreseen for the 100 European climate neutral cities, only a linear emission decrease reflecting that observed in the last decade would make the most mitigative afforestation scenarios able to almost compensate anthropogenic emissions. Our analysis indicates that, in a C-neutrality perspective, the implementation of actions aimed at reducing CO_2 emissions should be considered the priority, whilst the increase in urban green areas, although providing other important ecosystem services, can only marginally contribute to C-neutrality.

CRediT authorship contribution statement

Lorenzo Brilli: Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Roles/Writing – original draft.

Federico Carotenuto: Formal analysis, Visualization.

Marta Chiesi: Data curation, Formal analysis, Methodology.

Edoardo Fiorillo: Writing – review & editing.

Lorenzo Genesio: Writing – review & editing.

Ramona Magno: Data curation, Formal analysis, Methodology, Visualization.

Marco Morabito: Writing – review & editing.

Marianna Nardino: Investigation, Writing – review & editing.

Alessandro Zaldei: Methodology.

Beniamino Gioli: Conceptualization, Investigation, Roles/Writing – original draft.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156843.

References

Abbate, S., Di Paolo, L., Carapellucci, R., Cipollone, R., 2021. Urban context and neighboring lands: how reforestation could have a role in the implementation of sustainable energy and climate action plans. 2021E3S Web of Conferences. 76° Italian National Congress ATI312. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202131210002.

Agbelade, A.D., Onyekwelu, J.C., 2020. Tree species diversity, volume yield, biomass and carbon sequestration in urban forests in two Nigerian cities. Urban Ecosyst. 23 (2). https://doi.org/10.1007/s11252-020-00994-4.

Albert, C., Spangenberg, J., Schröter, B., 2017. Nature-based solutions: criteria. Nature 543, 315. https://doi.org/10.1038/543315b.

Anjum, J., Tiwari, A., Sheikh, M.A., Sharma, S., 2020. Floristic biodiversity and carbon stock of urban city with reference to educational institutes of Gwalior: an approach of sustainability. Environ. Ecol. (ISSN: 0970-0420) 38, 183–189.

Barbaro, G., Miguez, M.G., de Sousa, M.M., da Cruz, Ribeiro, Franco, A.B., de Magalhães, P.M.C., Foti, G., Valadão, M.R., Occhiuto, I., 2021. Innovations in best practices: approaches to managing urban areas and reducing flood risk in Reggio Calabria (Italy). Sustainability 13, 3463. https://doi.org/10.3390/su13063463.

Boukili, V.K.S., Bebber, D.P., Mortimer, T., Venicx, G., Lefcourt, D., Chandler, M., Eisenberg, C., 2017. Assessing the performance of urban forest carbon sequestration models using direct measurements of tree growth. Urban For. Urban Green. 24 (2017), 212–221. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.03.015.

Brilli, L., Chiesi, M., Brogi, C., Magno, R., Arcidiaco, L., Bottai, L., Tagliaferri, G., Bindi, M., Maselli, F., 2019. Combination of ground and remotely sensed data to assess carbon stock changes in the main urban park of Florence. Urban For. Urban Green. 43 (2019), 126377. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126377.

Canadell, J.G., Mooney, H.A., Baldocchi, D.D., Berry, J.A., Ehleringer, J.R., Field, C.B., Gower, S.T., Hollinger, D.Y., Hunt, J.E., Jackson, R.B., Running, S.W., Shaver, G.R., Steffen, W., Trumbore, S.E., Valentini, R., Bond, B.Y., 2000. Carbon metabolism of the terrestrial biosphere: a multitechnique approach for improved understanding. Ecosystems 3, 115–130. http://doi:10.1007/s100210000014.

Chen, Y.W., 2015. The role of urban green infrastructure in offsetting carbon emissions in 35 major Chinese cities: a nationwide estimate. Cities 44 (2015), 112–120. https://doi.org/10.1016/j.cities.2015.01.005.

Chirici, G., Chiesi, M., Corona, P., Salvati, R., Papale, D., Fibbi, L., Sirca, C., Spano, D., Duce, P., Marras, S., Matteucci, G., Cescatti, A., Maselli, F., 2016. Estimating daily forest carbon fluxes using the combination of ground and remotely sensed data. J. Geophys. Res. Biogeosci. 121, 266–279. https://doi.org/10.1002/2015JG003019.

Chirici, G., Giannetti, F., McRoberts, R.E., Travaglini, D., Pecchi, M., Maselli, F., Chiesi, M., Corona, P., 2020. Wall-to-wall spatial prediction of growing stock volume based on Italian National Forest Inventory plots and remotely sensed data. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 84, 101959. https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101959.

Chirici, G., Chiesi, M., Fibbi, L., Giannetti, F., Corona, P., Maselli, F., 2022. High spatial resolution modelling of net forest carbon fluxes based on ground and remote sensing data. Agric. For. Meteorol. 316, 108866. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.108866.

Davies, Z.J., Edmondson, J.L., Heinemeyer, A., Leake, J.R., Gaston, K.J., 2011. Mapping an urban ecosystem service: quantifying above-ground carbon storage at a city-wide scale. J. Appl. Ecol. 2011 (48), 1125–1134. https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.02021.x.

Deb, D., Deb, S., Debbarma, J., Datta, B., 2016. Tree species richness and carbon stock in Tripura university campus, Northeast India. J. Biodivers. Manag. For. 5, 1–7. https://doi:10.4172/2327-4417.1000167.

Dhyani, S., Singh, A., Gujre, N., Joshi, R.K., 2021. Quantifying tree carbon stock in historically conserved Seminary Hills urban forest of NagpurIndia. Acta Ecol. Sin. 41, 193–203. https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2021.01.006.

Dushkova, D., Haase, D., 2020. Not simply green: nature-based solutions as a concept and practical approach for sustainability studies and planning agendas in cities. Land 9 (1), 19. https://doi.org/10.3390/land9010019 2020.

Edmondson, J.L., O'Sullivan, O.S., Inger, R., Potter, J., Gaston, K.J., Leake, J.R., McHugh, N., 2014. Urban tree effects on soil organic carbon. 8PLoS One 9 (7), e101872. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0101872 PMID: 25003872; PMCID: PMC4087013.

EMEP/CORINAIR, 2007. Atmospheric Emission Inventory Guidebook. Technical Report No 16/2007.

EMEP/EEA, 2019. Air pollutant emission inventory guidebook 2019. Technical report No 13/2019.

Escobedo, F., Varela, S., Zhao, M., Wagner, J.E., Zipperer, W., 2010. Analyzing the efficacy of subtropical urban forests in offsetting carbon emissions from cities. Environ. Sci. Policy 13, 362–372. https://doi:10.1016/j.envsci.2010.03.009.

Escobedo, F.J., Kroeger, T., Wagner, J.E., 2011. Urban forests and pollution mitigation: analyzing ecosystem services and disservices. Environ. Pollut. 159 (8–9), 2078–2087. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.01.010.

EU, 2020. Mission board on climate-neutral and smart cities, 100 climate-neutral cities by 2030 – by and for citizens. Report on the Mission Board 2020. https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe/eu-missions-horizon-europe/climate-neutral-and-smart-cities_en.

Faivre, N., Fritz, M., Freitas, T., Boissezon, B., Vandewoestijne, S., 2017. Nature-based solutions in the EU: innovating with nature to address social, economic and environmental challenges. Environ. Res. 159, 509–518. https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.08.032.

Fargione, J.E., Bassett, S., Boucher, T., Bridgham, S.D., Conant, R.T., CookPatton, S.C., Ellis, W.P., Falcucci, A., Fourqurean, J.W., Gopalakrishna, T., Gu, H., Henderson, B., Hurteau, M.D., Kroeger, K.D., Kroeger, T.K., Lark, T.J., Leavitt, S.M., Lomax, G., McDonald, R.I., Megonigal, J.P., Miteva, D.A., Richardson, C.J., Sanderman, J., Shoch, D., Spawn, S.A., Veldman, J.W., Williams, C.A., Woodbury, P.B., Zganjar, C., Baranski, M., Elias, P., Houghton, R.A., Landis, E., McGlynn, E., Schlesinger, W.H., Siikamaki, J.V., Sutton-Grier, A.E., Griscom, B.W., 2018. Natural climate solutions for the United States. Sci Adv. 4 (11), eaat1869. https://doi.org/10.1126/sciadv.aat1869 2018.

Federici, S., Vitullo, M., Tulipano, S., De Lauretis, R., Seufert, G., 2008. An approach to estimate carbon stocks changes in forest carbon pools under the UNFCCC: the Italian case. iForest Biogeosci. For. 1, 86–95. https://doi.org/10.3832/ifor0457-0010086.

Frantzeskaki, N., 2019. Seven lessons for planning nature-based solutions in cities. Environ. Sci. Pollut. 93, 101–111. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.12.033.

Gardin, L., Chiesi, M., Fibbi, L., Maselli, F., 2021. Mapping soil organic carbon in Tuscany through the statistical combination of ground observations with ancillary and remote sensing data. Geoderma 404, 115386. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115386.

Golinkoff, J., 2010. Biome BGC Version 4.2: Theoretical Framework of Biome-BGC. http://www.ntsg.umt.edu/project/biome-bgc.

Goulden, M.L., Munger Jr., W., Fan, S.M., Daube, B.C., Wofsy, S.C., 1996. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance methods and a critical evaluation of accuracy. Glob. Chang. Biol. 2, 169–182. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.1996.tb00070.x.

Griscom, B.W., Adams, J., Ellis, P.W., Houghton, R.A., Lomax, G., Miteva, D.A., Schlesinger, W.H., Shoch, D., Siikamäki, J.V., Smith, P., Woodbury, P., Zganjar, C., Blackman, A., Campari, J., Conant, R.T., Delgado, C., Elias, P., Gopalakrishna, T., Hamsik, M.R., Herrero, M., Kiesecker, J., Landis, E., Laestadius, L., Leavitt, S.M., Minnemeyer, S., Polasky, S., Potapov, P., Putz, F.E., Sanderman, J., Silvius, M., Wollenberg, E., Fargione, J., 2017 Oct 31. Natural climate solutions. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 114 (44), 11645–11650. https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114 Epub 2017 Oct 16. Erratum in: Proc Natl Acad Sci U S A. 2019 Feb 12;116(7):2776. PMID: 29078344; PMCID: PMC5676916. https://doi.10.1073/pnas.1710465114.

Hiemstra, J.A., Saaroni, H., Amorim, J.H., 2017. The urban heat island: thermal comfort and the role of urban greening. Springer, ChamUrban Forest 7 (2), 7–19 ISBN: 9783319502809.

Hsieh, C.-M., Li, J.-J., Zhang, L., Schwegler, B., 2018. Effects of tree shading and transpiration on building cooling energy use. Energy Build. 159, 382–397. https://doi:10.1016/j.enbuild.2017.10.045.

Hundertmark, W.J., Lee, M., Smith, I.A., Bang, A.H.I., Chen, V., Gately, C.K., Templer, P.H., Hutyra, L.R., 2021. Influence of landscape management practices on urban greenhouse gas budgets. Carbon Balance Manage 2021 (16), 1. https://doi.org/10.1186/s13021-020-00160-5.

Hutyra, L.R., Yoon, B., Alberti, M., 2011. Terrestrial carbon stocks across a gradient of urbanization: a study of the SeattleWA region. Glob. Change Biol. 17, 783–797. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02238.x.

Khadanga, S.S., Jayakumar, S., 2018. Tree diversity and carbon sequestration potential of an urban Forest patch of PondicherryIndia. J. Tree Sci. 37, 58–71. https://doi.10.5958/2455-7129.2018.00009.2.

Khorchani, M., Nadal-Romero, E., Lasanta, T., Tague, C., 2021. Carbon sequestration and water yield tradeoffs following restoration of abandoned agricultural lands in Mediterranean mountains. Environ. Res. 207, 112203. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112203.

Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F., 2006. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorol. Z. 15, 259–263. https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130.

Lahoti, S., Lahoti, A., Joshi, R.K., Saito, O., 2020. Vegetation structure, species composition, and carbon sink potential of urban green spaces in Nagpur City, India. Land https://doi.org/10.3390/land9040107.

Liang, W., Zhang, W., Jin, Z., Yan, J., Lü, Y., Wang, S., Fu, B., Li, S., Ji, Q., Gou, F., Fu, S., An, S., Wang, F., 2020. Estimation of global grassland net ecosystem carbon exchange using a model tree ensemble approach. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences 125, e2019JG005034. https://doi.org/10.1029/2019JG005034.

Liu, H.Y., 2021. The role of nature-based solutions for improving environmental quality, health and well-being. Sustainability 13 (19), 1–56. https://doi.org/10.3390/su131910950.

Liu, C., Li, X., 2012. Carbon storage and sequestration by urban forests in Shenyang, China. Urban Forestry & Urban Greening 11, 121–128. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2011.03.002.

Lutz, D.A., Howarth, R.B., 2014. Valuing albedo as an ecosystem service: Implications for forest management. Clim. Change 124, 53–63. https://doi.org/10.1007/s10584-014-1109-0.

Luyssaert, S., Marie, G., Valade, A., Chen, Y.Y., Njakou Djomo, S., Ryder, J., Otto, J., Naudts, N., Lansø, A.S., Ghattas, J., McGrath, M.J., 2019. Trade-offs in using European forests to meet climate objectives. Nature 567, E13. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1023-8.

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. Ecol. Model. 392, 92–102. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.11.011.

Maselli, F., Papale, D., Puletti, N., Chirici, G., Corona, P., 2009a. Combining remote sensing and ancillary data to monitor the gross productivity of water-limited forest ecosystems. Remote Sens. Environ. 113, 657–667. https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.11.008.

Maselli, F., Chiesi, M., Moriondo, M., Fibbi, L., Bindi, M., Running, S.W., 2009b. Modelling the forest carbon budget of a Mediterranean region through the integration of ground and satellite data. Ecol. Model. 220, 330–342. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.10.002.

Maselli, F., Argenti, G., Chiesi, M., Angeli, L., Papale, D., 2013. Simulation of grassland production by the combination of ground and satellite data. Agric. Ecosyst. Environ. 165, 163–172. https://doi.10.1016/j.agee.2012.11.006.

Masiero, M., Biasin, A., Amato, G., Malaggi, F., Pettenella, D., Nastasio, P., Anelli, S., 2022. Urban forests and green areas as nature-based solutions for brownfield redevelopment: a case study from Brescia municipal area (Italy). Forests 13 (3), 444. https://doi.org/10.3390/f13030444 2022.

Nowak, D.J., Crane, D.E., 2002. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. Environ. Pollut. 116, 381–389. https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00214-7.

Nowak, D.J., Hirabayashi, S., Doyle, M., McGovern, M., Pasher, J., 2018. Air pollution removal by urban forests in Canada and its effect on air quality and human health. Urban For. Urban Green. 29, 40–48. https://doi.10.1016/j.ufug.2017.10.019.

Parsa, V., Salehi, E., Yavari, A.R., van Bodegom, P.M., 2019. An improved method for assessing mismatches between supply and demand in urban regulating ecosystem services: a case study in TabrizIran. PLoS ONE 14 (8), e0220750. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220750.

Pataki, D.E., Alberti, M., Cadenasso, M.L., Felson, A.J., McDonnell, M.J., Pincetl, S., Pouyat, R.V., Setälä, H., Whitlow, T.H., 2021. The benefits and limits of urban tree planting for environmental and human health. Front. Ecol. Evol. 9, 603757. https://doi.10.3389/fevo.2021.603757.

Pereira, J.S., Mateus, J.A., Aires, L.M., Pita, G., Pio, C., David, J.S., Andrade, V., Banza, J., David, T.S., Paço, T.A., Rodrigues, A., 2007. Net ecosystem carbon exchange in three contrasting Mediterranean ecosystems – the effect of drought. Biogeosciences 4, 791–802. https://doi.doi.org/10.5194/bg-4-791-2007.

Raciti, S.M., Hutyra, L.R., Rao, P., Finzi, A.C., 2012. Inconsistent definitions of 'urban'result in different conclusions about the size of urban carbon and nitrogen stocks. Ecol. Appl. 22, 1015–1035. https://doi.org/10.1890/11-1250.1 PMID: 22645829.

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. Build. Environ. 170, 106606. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106606.

Raskin, E., 2015. Urban forests as weapons against climate change: lessons from California's global warming solutions act. The Urban Lawyer 47 (3), 387–418. https://www.jstor.org/stable/26423769.

Regulation (EU), 2021/1119. of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 ('European Climate Law'). Official Journal of the European Union L243, 1–17. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32021R1119.

Reynolds, C.C., Escobedo, F.J., Clerici, N., Zea-Camano, J., 2017. Does "greening" of neotropical cities considerably mitigate carbon dioxide emissions? The case of Medellin, Colombia. 8Sustainability 9 (5), 785. https://doi.org/10.3390/su9050785 PMID: 25003872; PMCID: PMC4087013.

Russo, A., Escobedo, F.J., Timilsina, N., Schmitt, A.O., Varela, S., Zerbe, S., 2014. Assessing urban tree carbon storage and sequestration in Bolzano, Italy. International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management 10 (1), 54–70. https://doi.org/10.1080/21513732.2013.873822.

Sæbø, A., Janhäll, S., Gawronski, S.W., Hanslin, H.M., 2017. Urban forestry and pollution mitigation. Routledge Handbook of Urban Forestry, 1st edition Imprint Routledge eBook ISBN9781315627106.

Safford, H., Larry, E., McPherson, E.G., Nowak, D.J., Westphal, L.M., August 2013. Urban Forests and Climate Change. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Climate Change Resource Center www.fs.usda.gov/ccrc/topics/urban-forests.

Salata, S., Ronchi, S., Giaimo, C., Arcidiacono, A., Pantaloni, G.G., 2021. Performance-based planning to reduce flooding vulnerability insights from the case of Turin (North-West Italy). Sustainability 2021 (13), 5697. https://doi.org/10.3390/su13105697.

Speak, A., Escobedo, F.J., Russo, A., Zerbe, S., 2020. Total urban tree carbon storage and waste management emissions estimated using a combination of LiDAR, field measurements and an end-of-life wood approach. J. Clean. Prod. 256, 120420. https://doi.10.1016/j.jclepro.2020.120420.

Stone, B., 2012. The City and the Coming Climate: Climate Change in the Places We Live. Cambridge University Press, New York https://doi.org/10.1017/CBO9781139061353.

Strohbach, M.D., Haase, D., 2012. Above-ground carbon storage by urban trees in Leipzig, Germany: analysis of patterns in a european city. Landsc. Urban Plan. 104, 95–104. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.10.001.

Teo, H.C., Zeng, Y., Sarira, T.V., Fung, T.K., Zheng, Q., Song, X.P., Chong, K.Y., Koh, L.P., 2021. Global urban reforestation can be an important natural climate solution. Environ. Res. Lett. 16 (2021), 034059. https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe783.

Tyrväinen, L., Pauleit, S., Seeland, K., de Vries, S., 2005. Benefits and uses of urban forests and trees. In: Konijnendijk, C., Nilsson, K., Randrup, T., Schipperijn, J. (Eds.), Urban Forests and Trees. Springer, Berlin, Heidelberg https://doi.org/10.1007/3-540-27684-X_5.

Uniyal, S., Purohit, S., Chaurasia, K., Srinivas Rao, S., Amminedu, E., 2022. Quantification of carbon sequestration by urban forest using Landsat 8 OLI and machine learning algorithms in Jodhpur, India. Urban Forestry & Urban Greening 67 (2022), 127445. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127445.

Vaccari, F., Toscano, P., Perrone, C., Gioli, B., 2013. Carbon dioxide balance assessment of the city of Florence (Italy), and implications for urban planning. Landscape and Urban Planning 120, 138–146. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.08.004.

Valentini, R., Deangelis, P., Matteucci, G., Monaco, R., Dore, S., Mugnozza, G.E.S., 1996. Seasonal net carbon dioxide exchange of a beech forest with the atmosphere. Glob. Chang. Biol. 2, 199–208. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.1996.tb00072.x.

White, M.A., Thornton, P.E., Running, S.W., Nemani, R.R., 2000. Parameterization and sensitivity analysis of the BIOME-BGC terrestrial ecosystem model: net primary production controls. Earth Interact 4, 1–85. https://doi.org/10.1175/1087-3562(2000)004<0003:PASAOT>2.0.CO;2.

Wickenberg, B., McCormick, K., Olsson, J.A., 2021. Advancing the implementation of nature-based solutions in cities: a review of frameworks. Environ. Sci. Pol. 125, 44–53. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.08.016.

Xiao, J., Zhuang, Q., Baldocchi, D., Law, B.E., Richardson, A.D., Chen, J., Oren, R., Starr, G., Noormets, A., Ma, S., Verma, S.B., Wharton, S., Wofsy, S.C., Bolstad, P.V., Burns, S.P., Cook, D.R., Curtis, P.S., Drake, B.G., Falk, M., Fischer, M.L., Foster, D.R., Gu, L., Hadley, J.L., Hollinger, D.Y., Katul, G.G., Litvak, M., Martin, T., Matamala, R., McNulty, S., Meyers, T.P., Monson, R.K., Munger, J.W., Oechel, W.C., Paw, U.K.T., Schmid, H.P., Scott, R.L., Sun, G., Suyker, A.E., Torn, M.S., 2008. Estimation of net ecosystem carbon exchange for the conterminous United States by combining MODIS and AmeriFlux data. Agricultural and Forest Meteorology 148, 1827–1847. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.06.015.

Yao, N., Konijnendijk van den Bosch, C., Yang, J., Devisscher, T., Wirtz, Z., Jia, L., Duan, J., Ma, L., 2019. Beijing's 50 million new urban trees: Strategic governance for large-scale urban afforestation. Urban Forestry & Urban Greening 44, 126392. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126392 ISSN 1618-8667.

Allegato 2

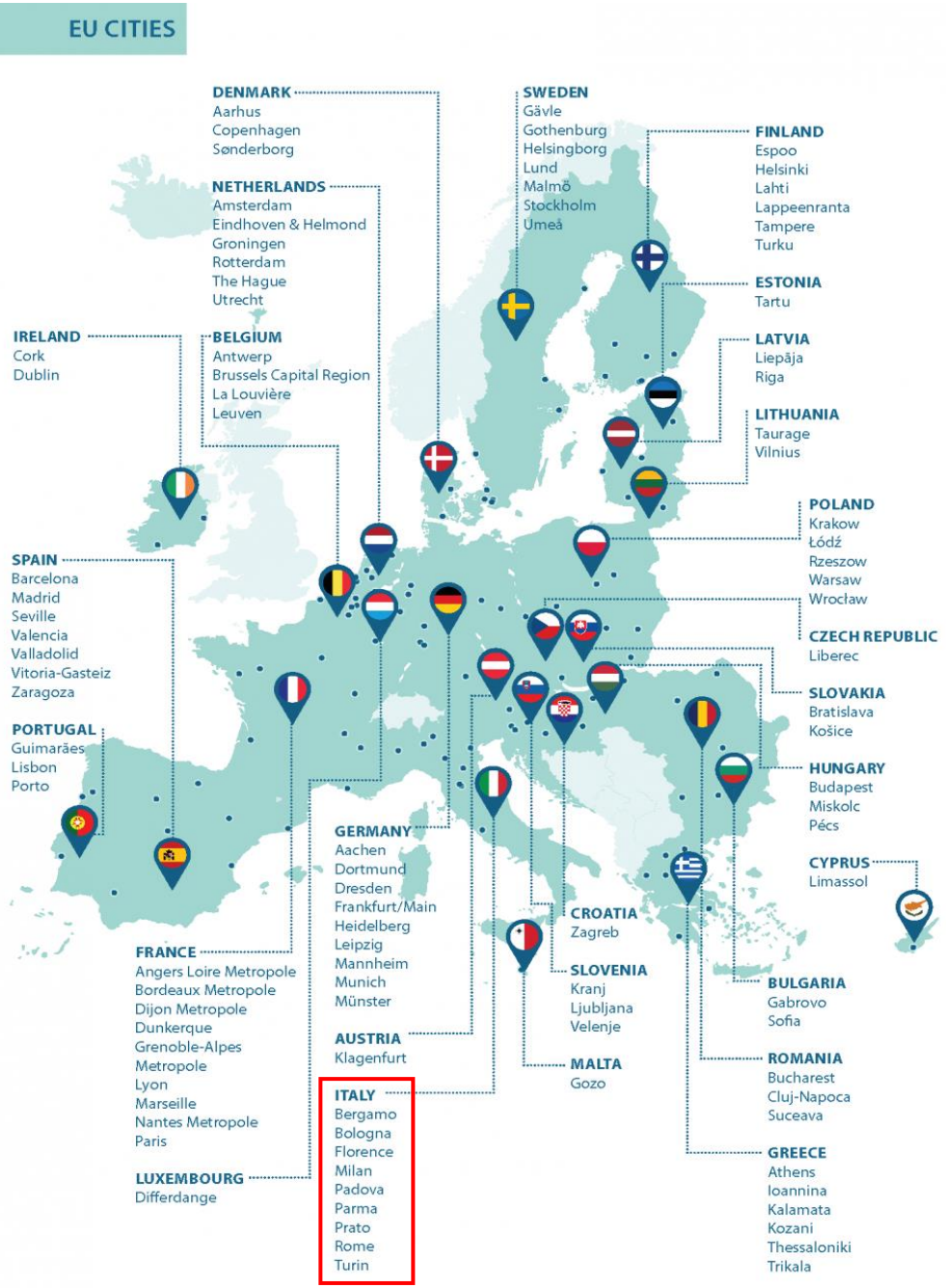
Brilli, L., Carotenuto F., Chiesi, M., Gualtieri, G., Martelli, F., Maselli, F., Magno, R., Vagnoli, C., Zaldei, A., Gioli, B. 2021. *An integrated approach to assess cities carbon neutrality target*. In: Air pollution and climate change effects on plant ecosystems: from cell to ecosystem Session 2. Urban green: sinks or sources of air pollution and climate change, Air Pollution & Plants, Paphos 11-15 October 2021.

Session:
Integrazione tra osservazioni in-situ, remote sensing e modelli

Urban eddy covariance sites as tools to assess trajectories towards C-neutrality –Firenze-Prato case studies

Lorenzo Brilli, Beniamino Gioli

Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per la BioEconomia (CNR-IBE),
Via Madonna del Piano 10, 50019, Firenze, Italia
Contact: lorenzo.brilli@ibe.cnr.it



The EU mission for climate-neutral and smart cities was proposed to select 100 climate neutral cities by 2030 (developing decarbonization strategies involving energy, transport, buildings, industry, and agriculture).

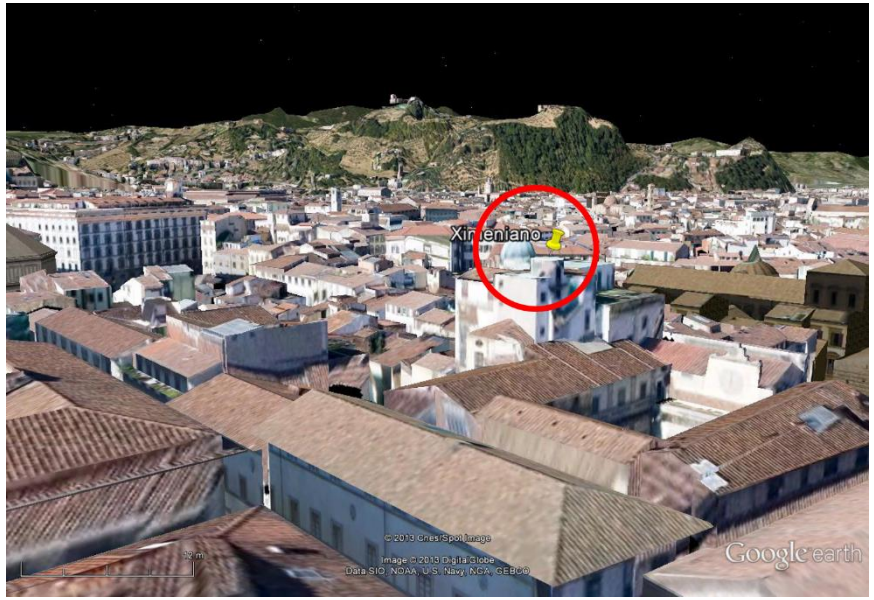
BERGAMO
BOLOGNA
FIRENZE
MILANO
PADOVA
PARMA
PRATO
ROMA
TORINO

The quantification and partitioning of the urban CO_2 emissions, and the CO_2 sequestration capacity that may be provided by urban green areas to impact the city-level C-balance and offset anthropogenic emissions is a complex issue.

1. STUDY AREA: Experimental site 1 – Florence, Osservatorio Ximeniano







ICOS association: ongoing



Measurement mast:

Height above ground: 33 m

Mean building height: 19 m

Roughness length ~ 1.0 m

1. STUDY AREA: Experimental site 1 – Florence, Osservatorio Ximeniano

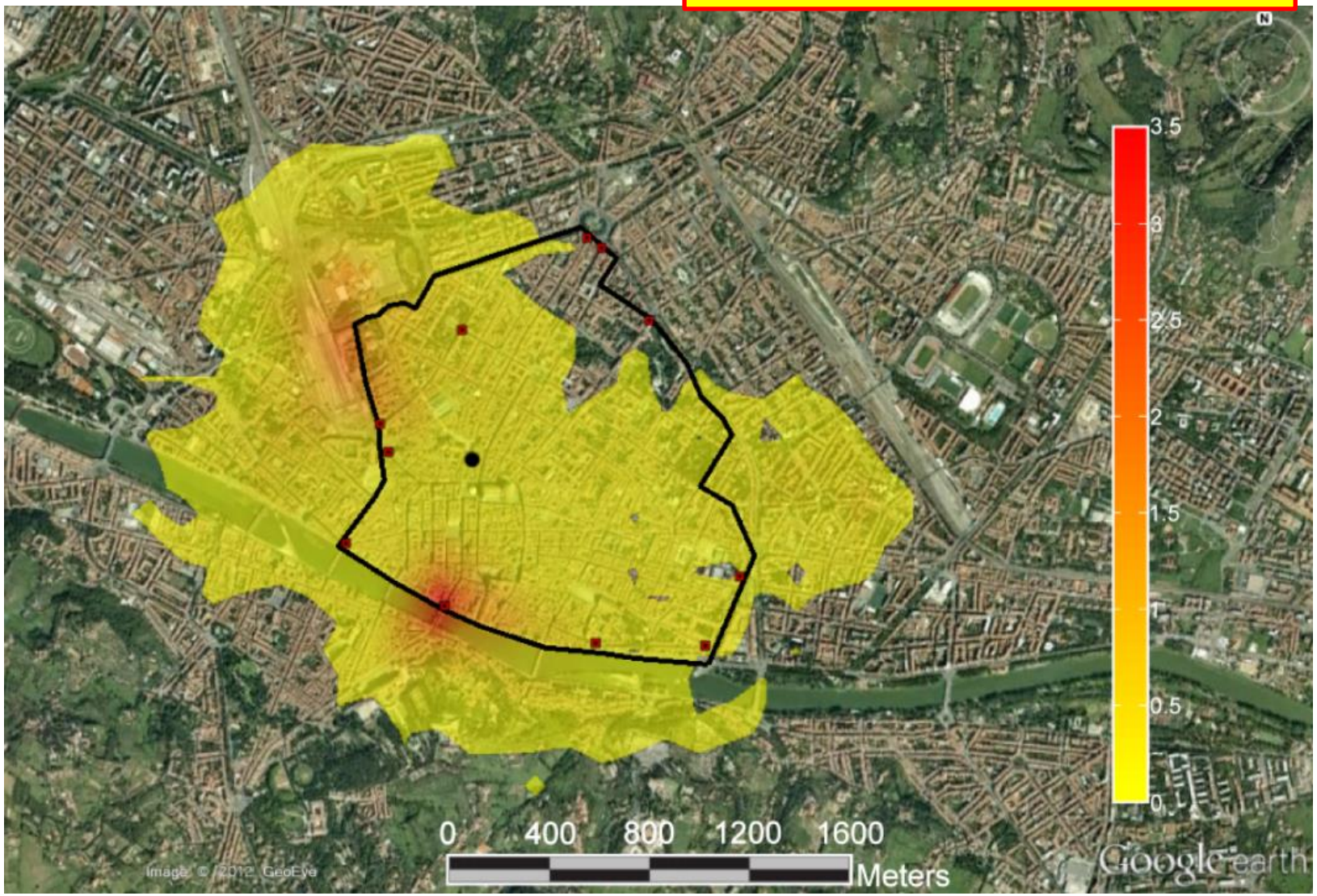
ICOS association: ongoing

Measurement periods:

- CO_2: Long-term**, 2005 – ongoing**
- CH_4: Short-term campaigns
- PM: Short-term campaigns

Footprint area :

> 90% urbanized land



1. **STUDY AREA:** Experimental site 2 – Prato, Palazzo Pretorio







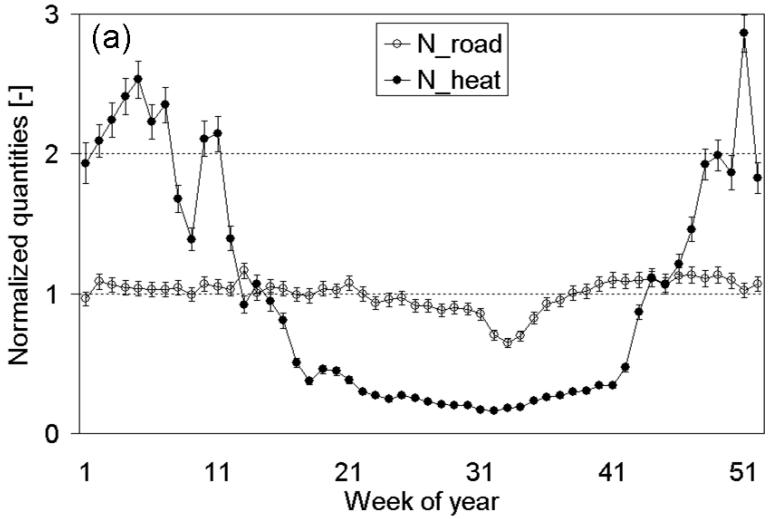
Measurement periods:

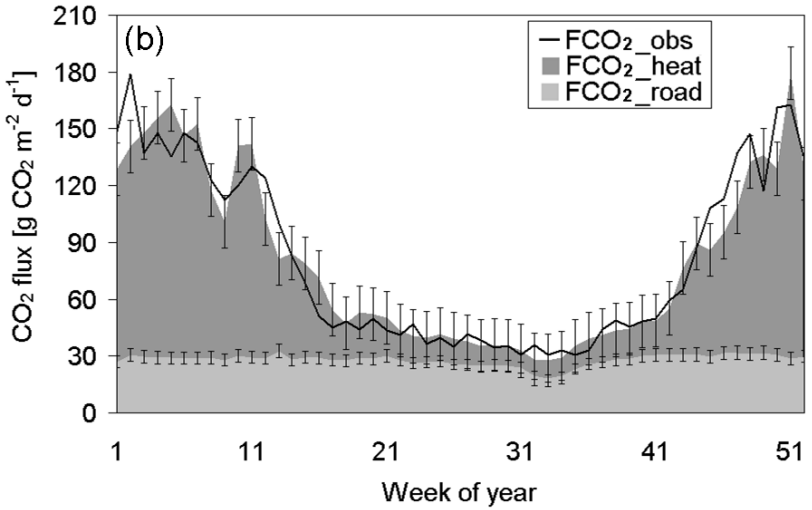
- CO_2: **2021 – ongoing**



2. DATA ANALYSIS: Anthropogenic drivers of CO_2 & CH_4 fluxes

Flux source partition: CO_2

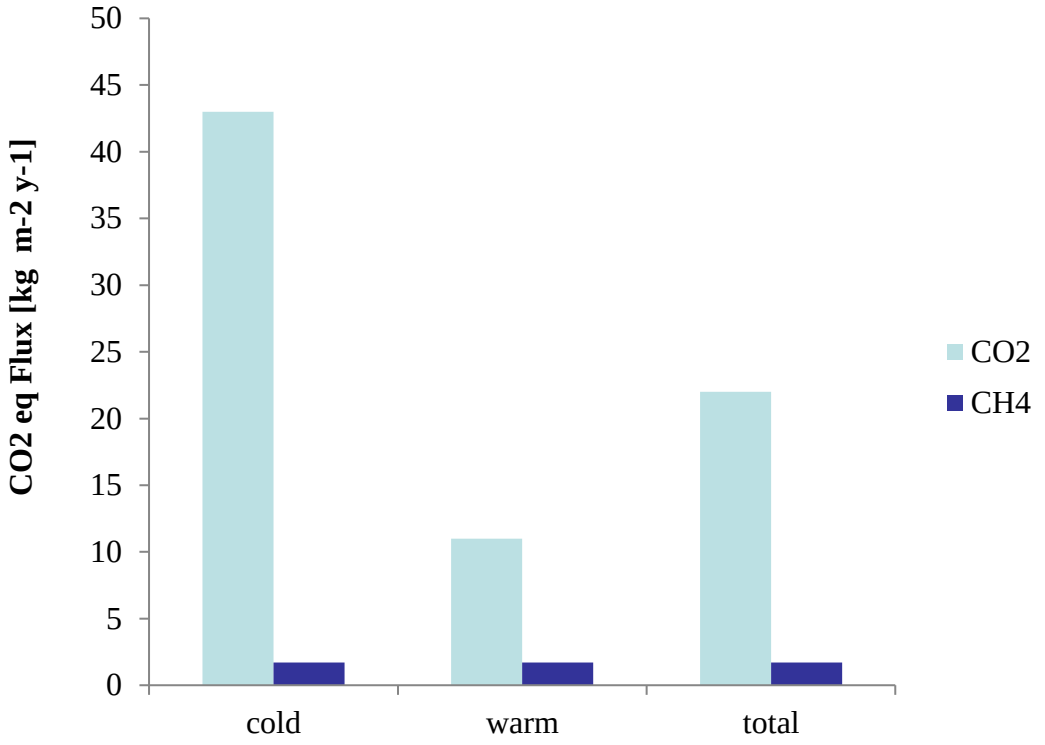




Partition factors.
Derived from emission factors and inventorial normalized proxies (road traffic amounts & gas network flow-rates) through multi-regressive approach.

Road traffic → 32%
Domestic heating → 68%

GHG balance (CO_2 equivalent)

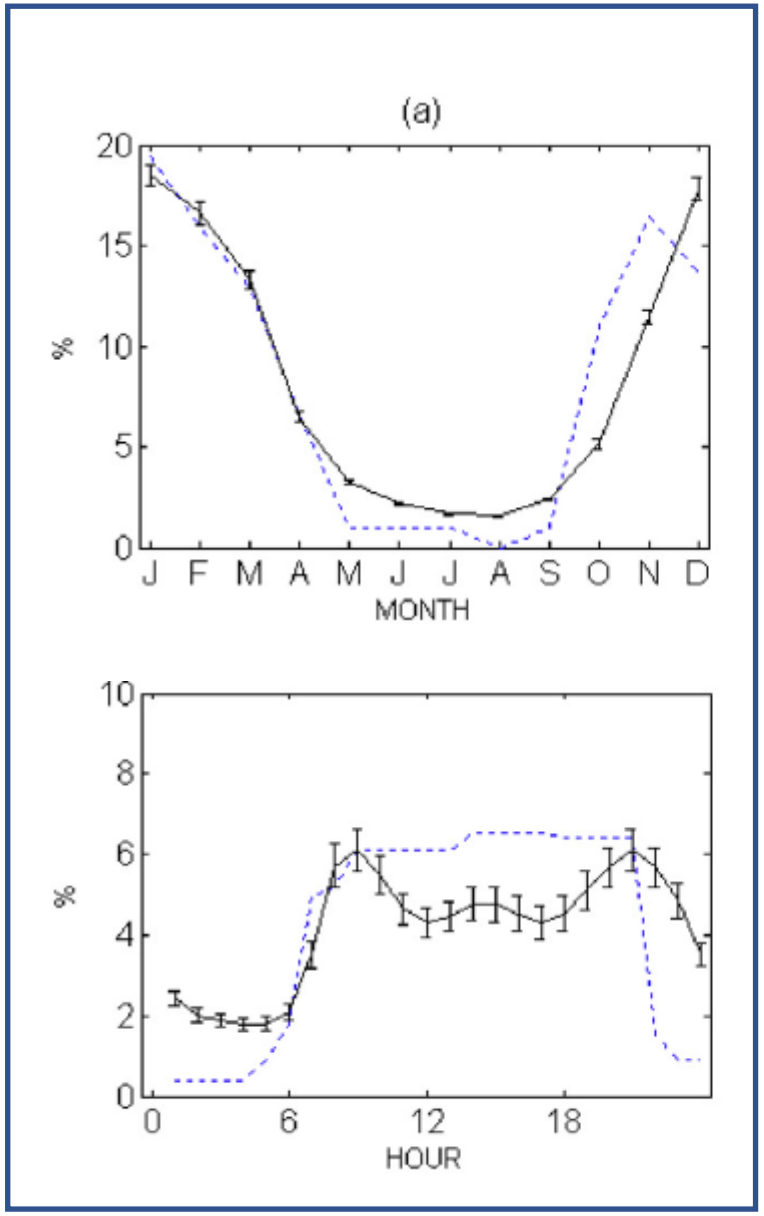


CH_4 GWP = 8% CO_2 GWP

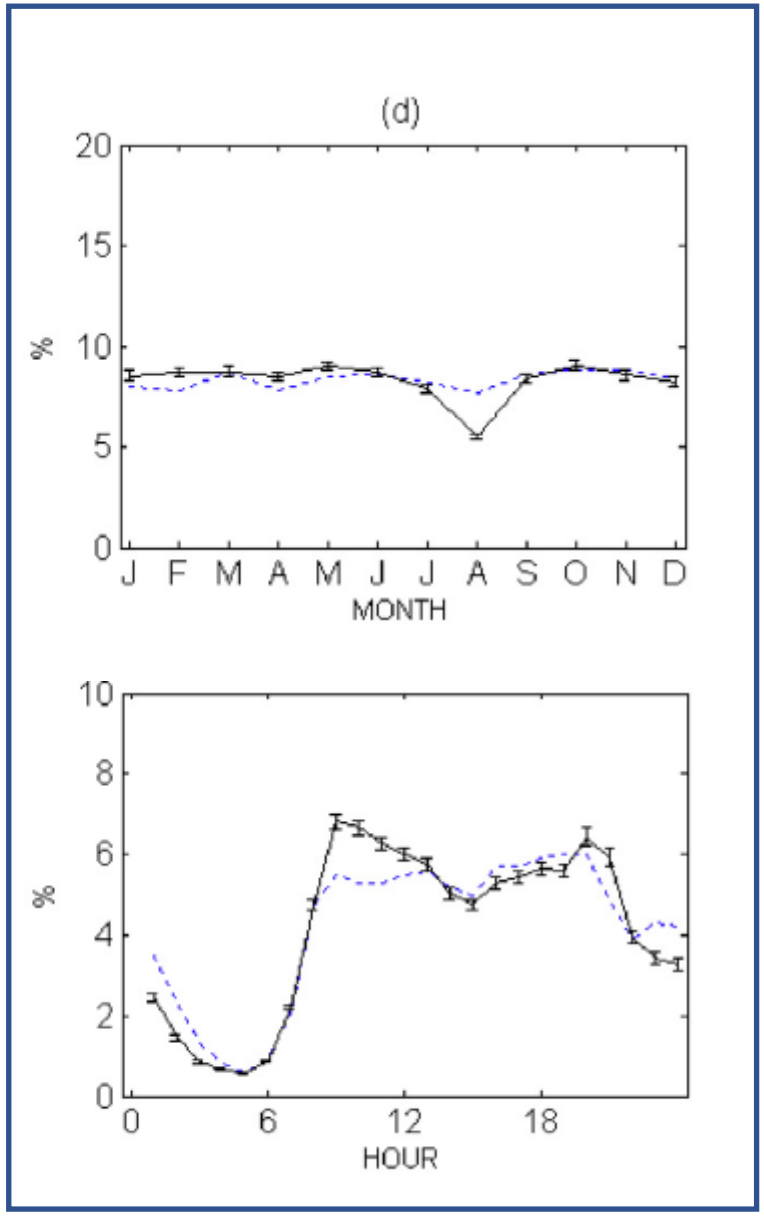
(Matese et al 2009)
(Gioli et al 2012)

3. Measured Data vs Inventory

NATURAL GAS



ROAD TRAFFIC



Mmonthly and hourly ffCO2 fluxes (Florence):

- official city scale inventories (blu dots)
- measured by eddy covariance (black line)

When assimilating eddy covariance temporal variability, fCO2 emission inventories are improved 26 to 47%

(Gioli et al, 2015)

Contents lists available at ScienceDirect

Atmospheric Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/atmosenv

Improving high resolution emission inventories with local proxies and urban eddy covariance flux measurements

Beniamino Gioli [a, *], Giovanni Gualtieri [a], Caterina Busillo [b], Francesca Calastrini [a], Alessandro Zaldei [a], Piero Toscano [a]

[a] Institute of Biometeorology (CNR–IBIMET), Via Caproni 8, 50145 Firenze, Italy
[b] LaMMA Consortium, Via Madonna del Piano 10, 50019 Sesto Fiorentino, Italy

3. City scale C-balance (Firenze, 2013)

Landscape and Urban Planning 120 (2013) 138–146

Contents lists available at ScienceDirect

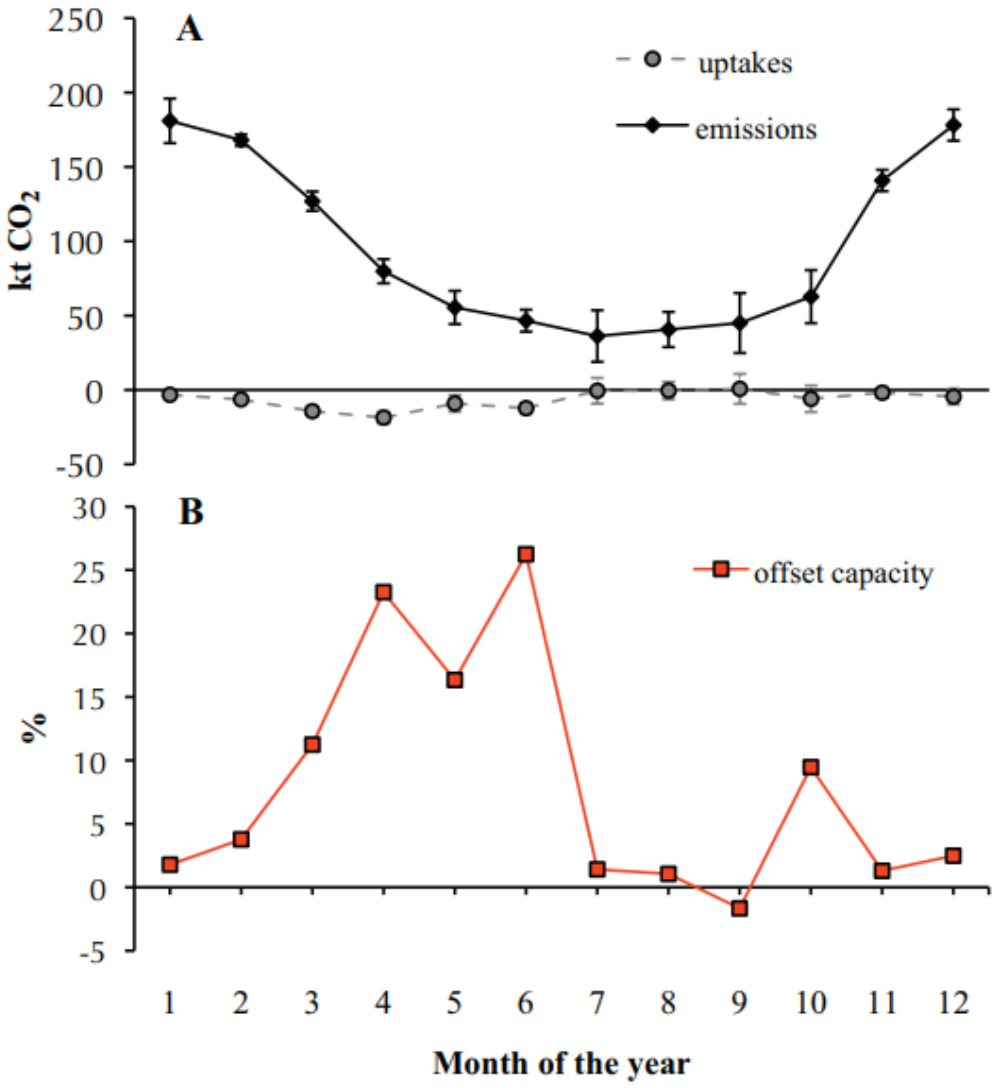
Landscape and Urban Planning

journal homepage: www.elsevier.com/locate/landurbplan

Carbon dioxide balance assessment of the city of Florence (Italy), and implications for urban planning

Francesco Primo Vaccari[a,*], Beniamino Gioli[a], Piero Toscano[a,c], Camilla Perrone[b]

[a] Institute of Biometeorology (IBIMET), National Research Council (CNR), Via G. Caproni, 8, 50145 Florence, Italy
[b] Department of Urban and Regional Planning (DUPT), University of Florence, Via P.A. Micheli, 2, 50121 Florence, Italy
[c] Department of Agricultural and Environmental Sciences, University of Udine, Via delle Scienze, 206, 33100 Udine, Italy



(Vaccari et al 2013)

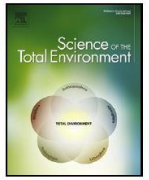
4. City scale C-balance (Prato, 2022)

Science of the Total Environment 842 (2022) 156843

Contents lists available at ScienceDirect

Science of the Total Environment

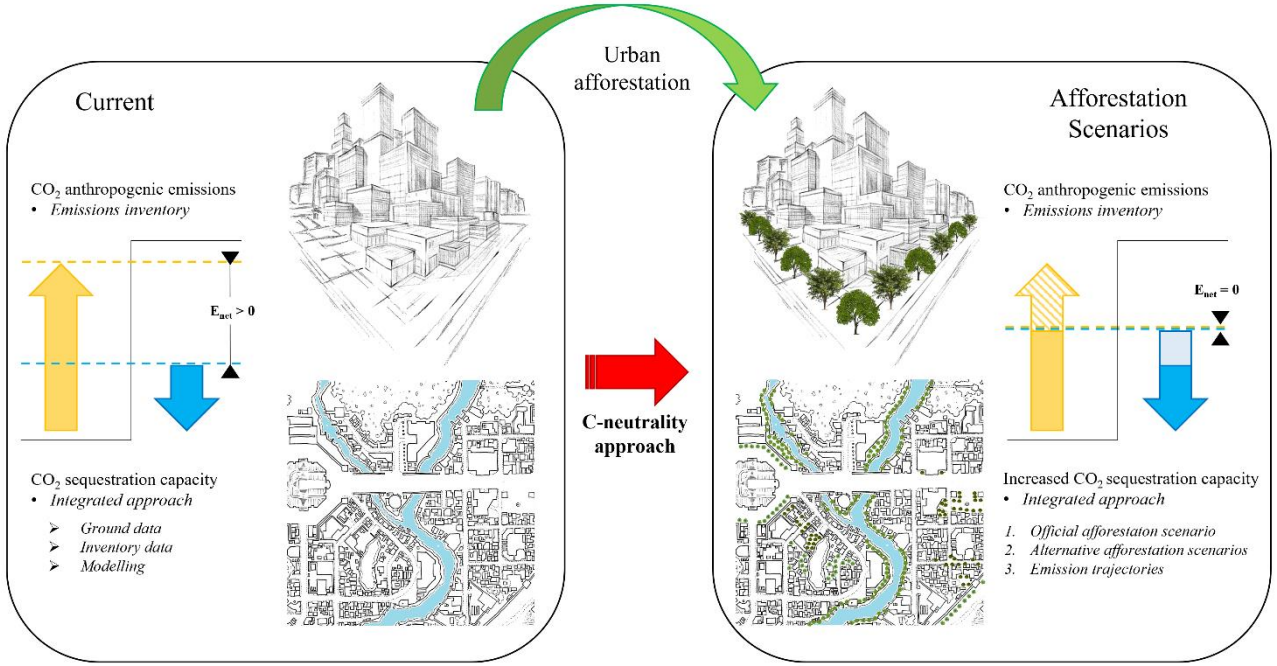
journal homepage: www.elsevier.com/locate/scitotenv



An integrated approach to estimate how much urban afforestation can contribute to move towards carbon neutrality

L. Brilli *, F. Carotenuto, M. Chiesi, E. Fiorillo, L. Genesio, R. Magno, M. Morabito, M. Nardino, A. Zaldei, B. Gioli

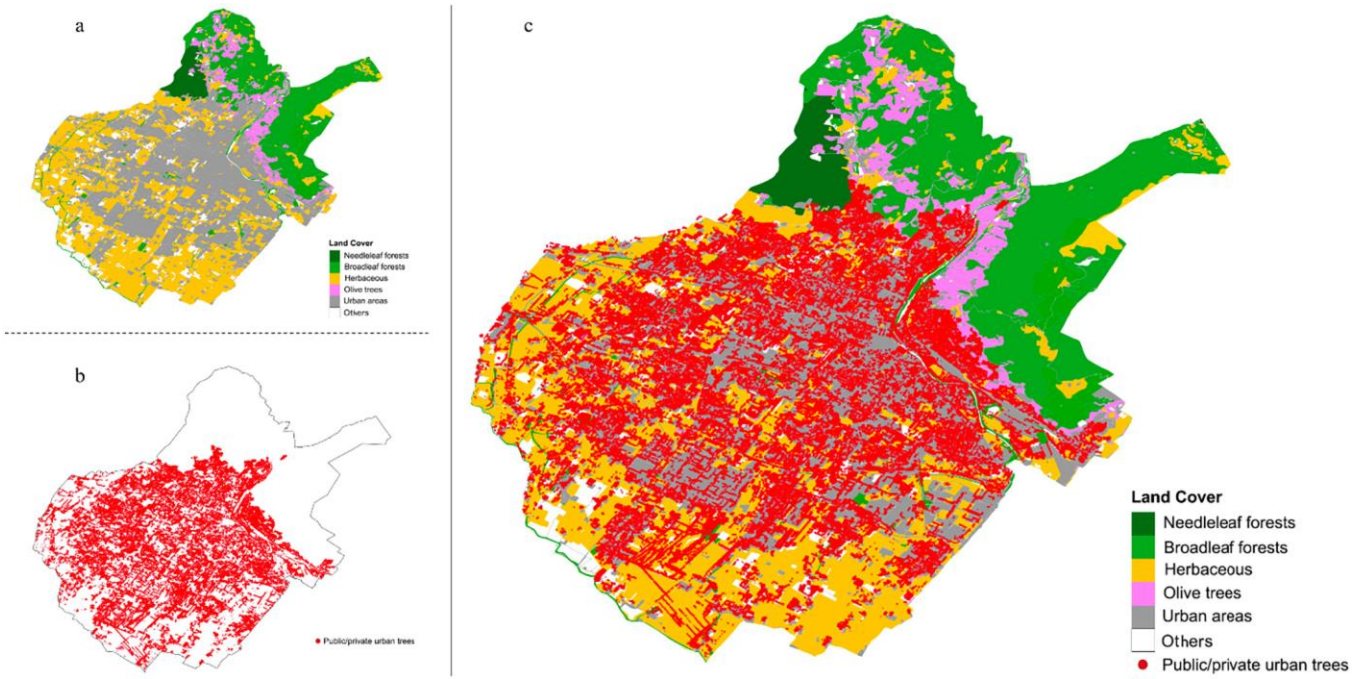
CNR-IBE, National Research Council of Italy, Institute of Bioeconomy, Via Madonna del Piano 10, 50145 Sesto Fiorentino, Italy

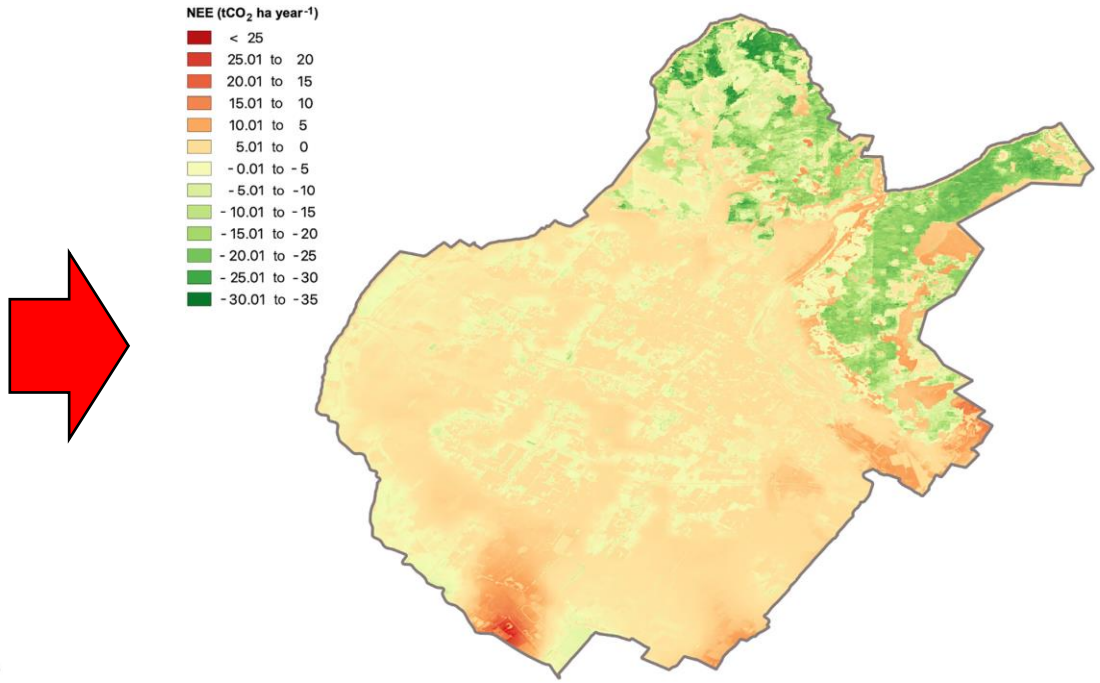


- **Land use and tree cover analysis:** To identify type and extent of the forest areas falling within the municipality.
- **Tree volumes and urban forest area:** The tree volumes and C-stock were calculated for all urban trees to improve modelling estimates of the net carbon fluxes.
- **Emission inventory (IRSE):** provides regional estimates of pollutants emissions from industrial, civil, and natural sources at different spatial resolutions (1-km to municipal level).
- **Modelling approach:** The CO_2 sequestration capacity was estimated based on the use of two models, C-Fix and BIOME-BGC, as proposed by Maselli et al. (2009a, 2009b) and Chirici et al. (2022).

(Brilli et al 2022)

4. City scale C-balance (Prato, 2022)





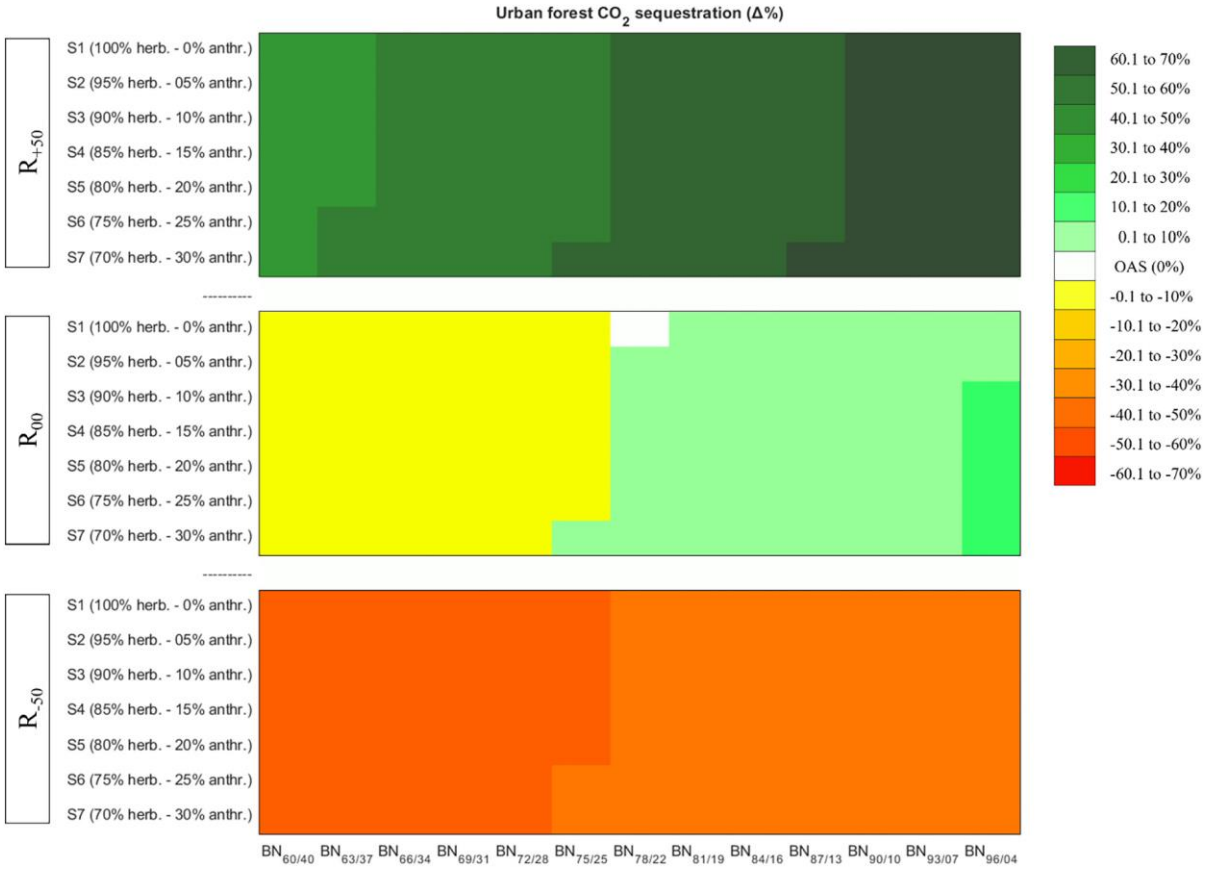
LU classification of the Prato Municipality according to seven classes:

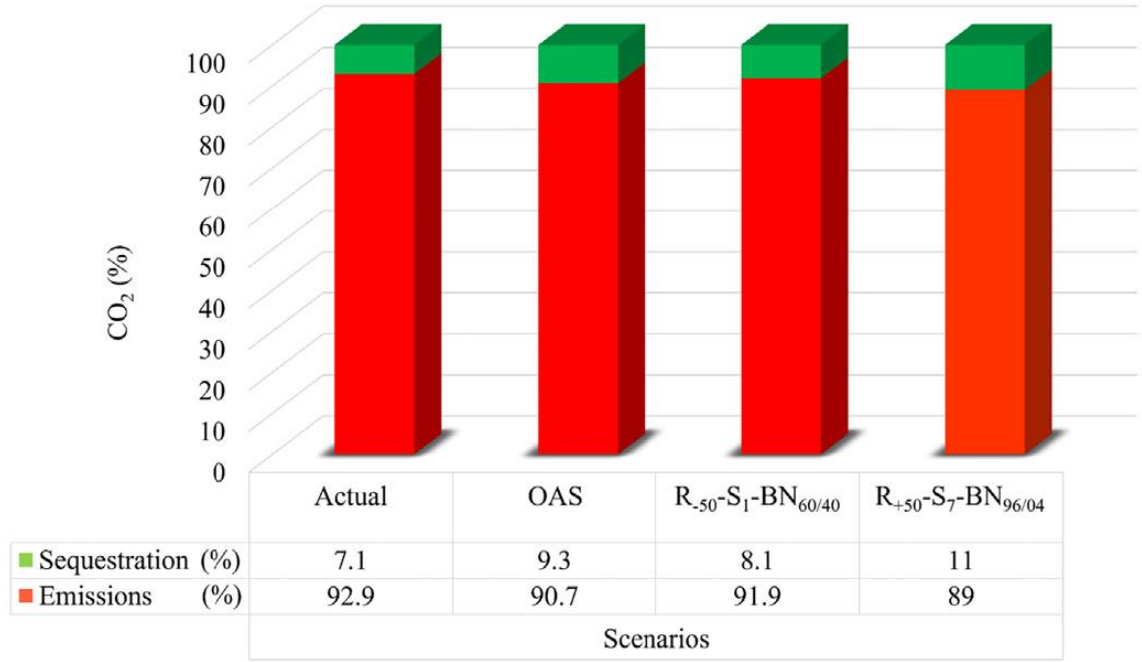
1. *needleleaf forest (light green);*
2. *broadleaf forest (dark green);*
3. *herbaceous areas (yellow);*
4. *Olive trees (pink);*
5. *urban areas (grey);*
6. *Other areas (white)*
7. *Public and private trees (red dots).*

Map of NEE for the Municipality of Prato.

(Brilli et al 2022)

4. City scale C-balance (Prato, 2022)



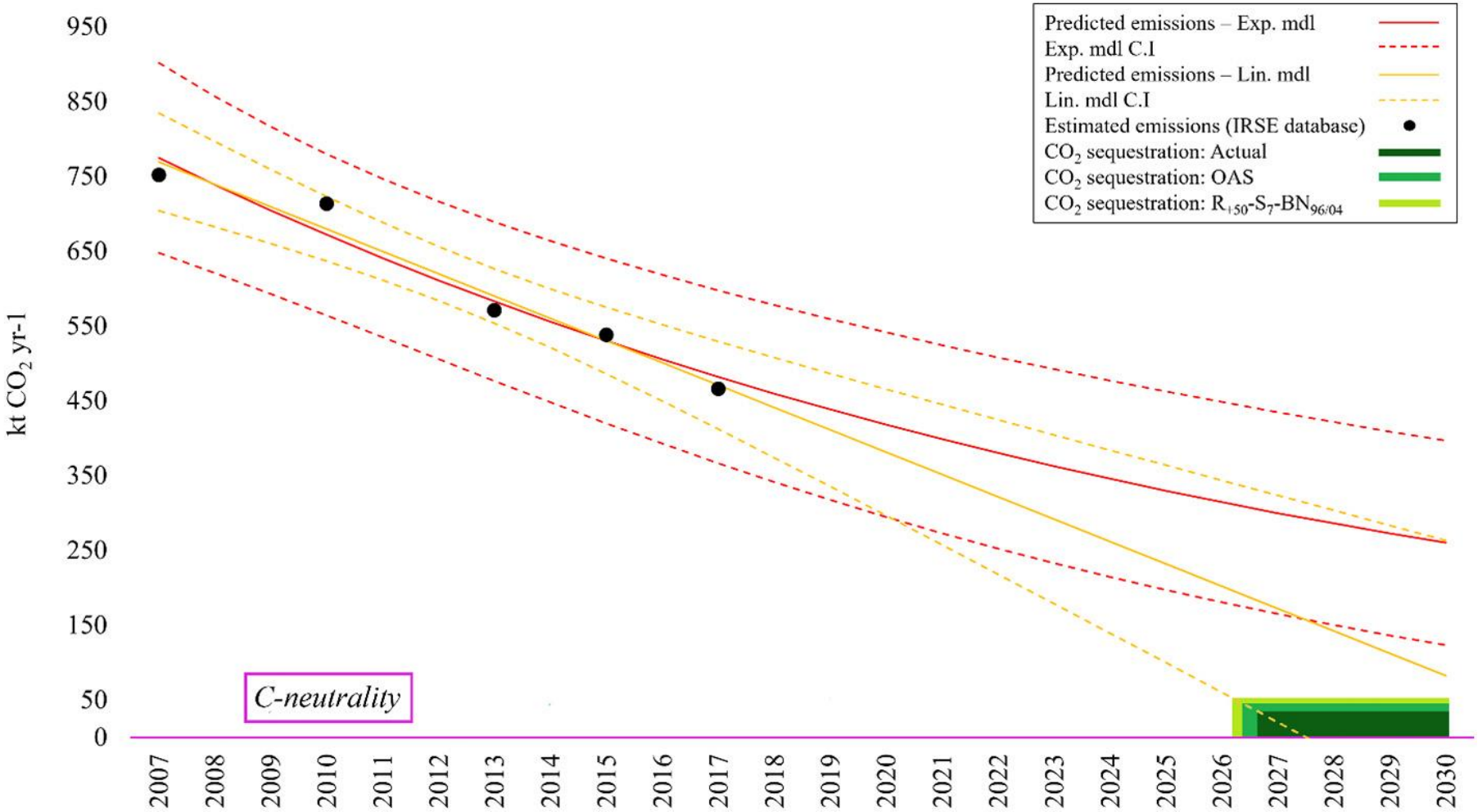


Map of ΔCO2 sequestration between official and 272 (on 1191) alternative afforestation scenarios. The comparison was proposed considering only the reference, the maximum (+50 %) and the minimum (−50 %) surface to be forested included in the analysis and evaluating ΔCO2 sequestration grouping scenarios by 10 % classes.

Emissions offset within the study area according to the Actual, Afforestation scenario, and extremes (minimum and maximum) CO2 sequestration afforestation scenarios

(Brilli et al 2022)

5. City scale trajectories towards C-neutrality (Prato, 2022)



Emissions offset within the study area according to the Actual, Afforestation scenario, and extremes (minimum and maximum) CO2 sequestration afforestation scenarios

5. Conclusions

a) Needs to built infrastructures and networks of eddy covariance sites on urban land-use.

b) Needs to implement and maintain existing eddy covariance sites on urban LU.

c) Eddy covariance infrastructures on urban LU (with and without integrated modelling approach) may provide better estimates of emissions contribution and cities C-balance.

d) Outcomes may be used to plan and develop suitable urban adaptation measures to approach carbon neutrality (Neutral city)

Allegato 3

Brilli, L., Carotenuto, F., Gualtieri, G., Vagnoli, C., Zaldei., A, Gioli, B. I *siti urbani eddy covariance quali strumenti per la misurazione delle traiettorie verso la carbon neutrality – il caso studio Firenze-Prato.* Conferenza ICOS Italy, 2022, Roma, 27-28 Settembre 2022.

Consiglio Nazionale delle Ricerche

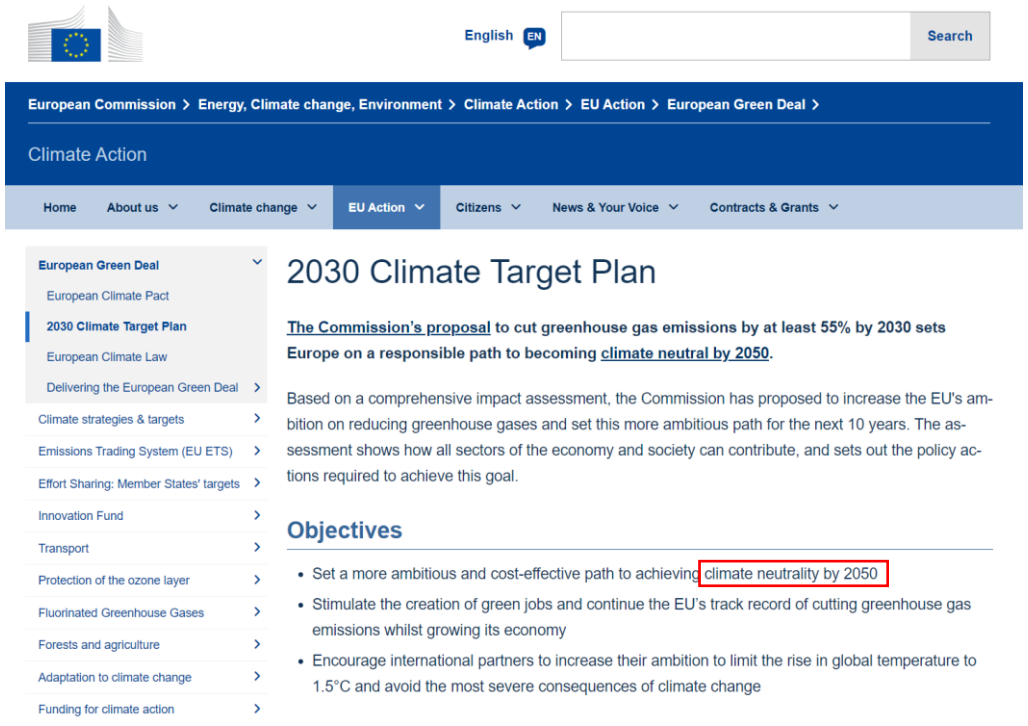
An integrated approach to assess cities carbon neutrality target

L. Brilli, F. Carotenuto, M. Chiesi, G. Gualtieri, F. Martelli, F. Maselli, R. Magno, C. Vagnoli, A. Zaldei and B. Gioli.

CNR-IBE
Via G. Caproni, 8 - 50144, Firenze, Italy.
E-mail: lorenzo.brilli@ibe.cnr.it

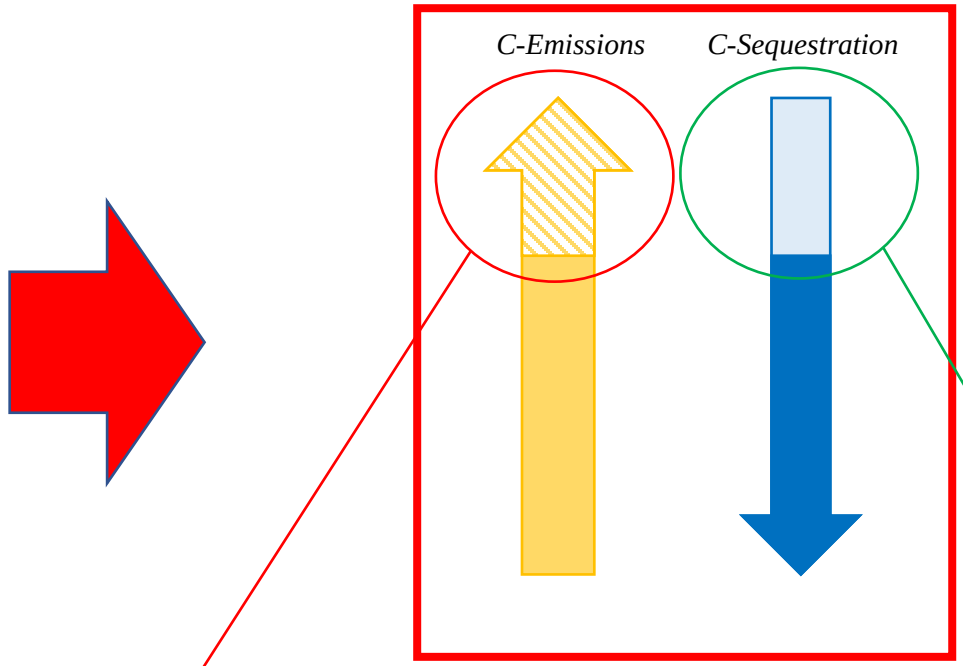
Air pollution and climate change effects on plant ecosystems: from cell to ecosystem
Session 2. Urban green: sinks or sources of air pollution and climate change

Air Pollution & Plants, Paphos 11-15 October 2021



EU website: 2030 climate target plan

C-balance



C-Emissions reduction

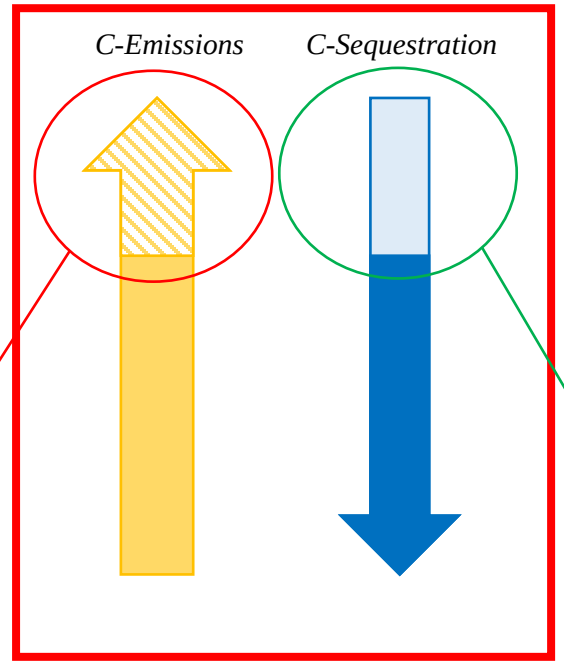
- *Combustion in energy and transformation industries*
- *Non–industrial combustion plants*
- *Combustion in manufacturing industry*
- *Production processes*
- *Extraction and distribution of fossil fuels and geothermal energy*
- *Solvent and other product use*
- *Road transport*
- *Other mobile sources and machinery*
- *Waste treatment and disposal*
- *Agriculture*

C-Sequestration increase

- *Land use change*
- *Reforestation*
- *Afforestation*
- *Bioenergy*

Urban reforestation





C-Emissions reduction

- *Combustion in energy and transformation industries*
- *Non–industrial combustion plants*
- *Combustion in manufacturing industry*
- *Production processes*
- *Extraction and distribution of fossil fuels and geothermal energy*
- *Solvent and other product use*
- *Road transport*
- *Other mobile sources and machinery*
- *Waste treatment and disposal*
- *Agriculture*

C-Sequestration increase

- *Land use change*
- *Reforestation*
- *Afforestation*
- *Bioenergy*



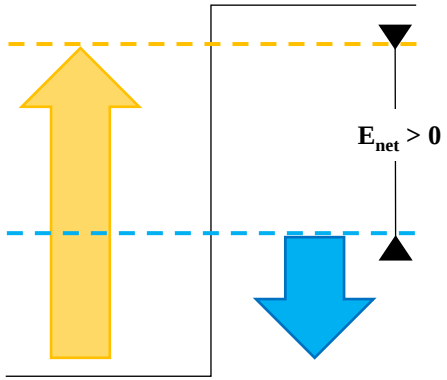
NBS

How we can evaluate the contribution of urban reforestation plans in the way to reach the C-neutrality target?

Urban reforestation

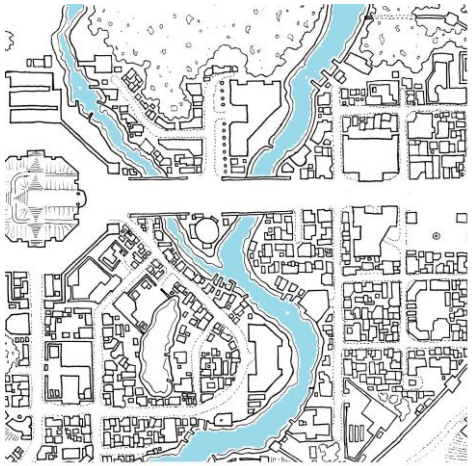
Current

Carbon anthropogenic emissions
- *Emissions inventory*



C-sequestration capacity
- *Current conditions*

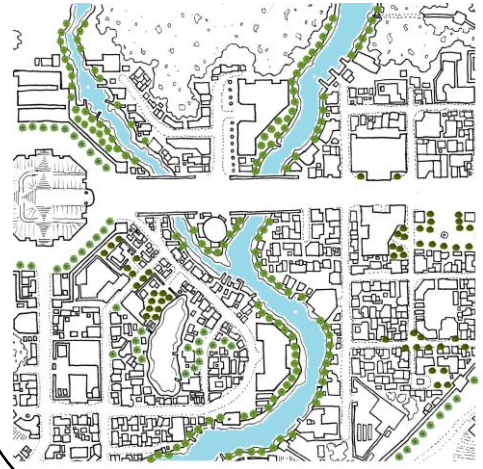




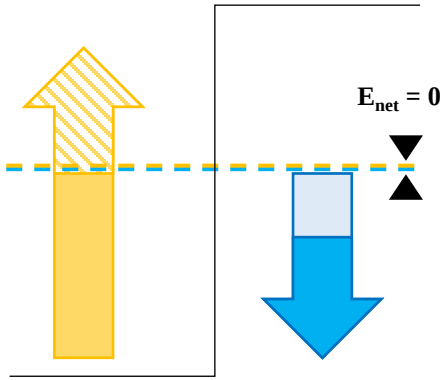
C-neutrality

Reforestation Scenario





Carbon anthropogenic emissions
- *Emissions inventory*



Increased C-sequestration capacity
- *Official reforestation scenario*

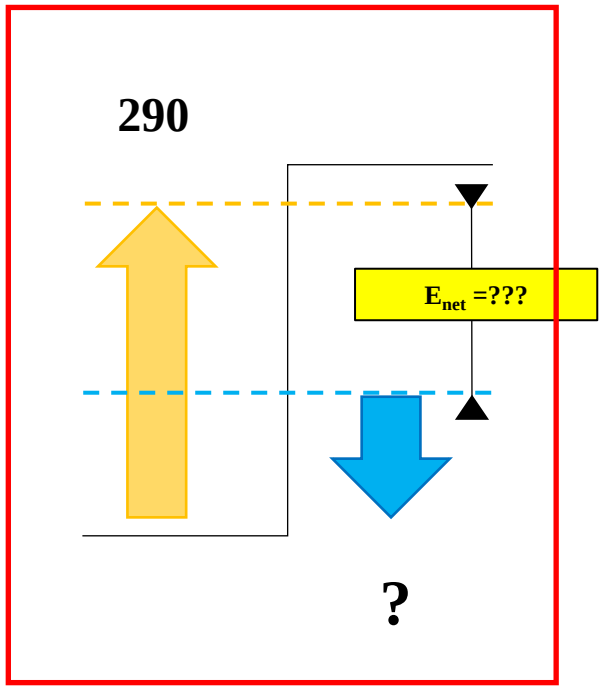
Current

C-emission

CO_2 emission inventory (macrocategories)

Combustion in energy and transformation industries	60
Non–industrial combustion plants	20
Combustion in manufacturing industry	30
Production processes	10
Extraction and distribution of fossil fuels and geothermal energy	5
Solvent and other product use	0
Road transport	72
Other mobile sources and machinery	58
Waste treatment and disposal	0
Agriculture	0
Other sources and sinks	35
Total	**290**

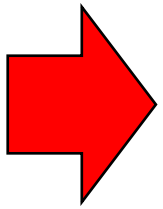
example



C-sequestration

Integrated approach

(ground observation-inventory-modelling)



?

Integrated approach

(ground observation-inventory-modelling)

INPUT DATA
- Daily weather data and solar radiation (250m resolution)
- FPAR from NDVI images (Sentinel 2 - 10 m resolution)
- SOC and tree volumes maps

GIS:
- Land use analysis

Modelling:
- C-Fix (GPP)
- Biome (Reco)

Trees volume

Ground observation:
- Trees inventory (diam., H., .)
- Coniferous (%)
- Deciduous (%)

Remote sensing:
- Fotointerpretation

(tree characteristics: species, crown size...)

CURRENT C-sequestration

NEE

Classes of vegetation

OFFICIAL REFORESTATION SCENARIO C-sequestration

NEE

Reforested area (ha)

Scenario 400.000 trees

Average tree spatial coverage (m^{-2})
- Coniferous
- Deciduous



Is it the best scenario ?

Integrated approach

(ground observation-inventory-modelling)

INPUT DATA
- Daily weather data and solar radiation (250m resolution)
- FPAR from NDVI images (Sentinel 2 - 10 m resolution)
- SOC and tree volumes maps

GIS:
- Land use analysis

Modelling:
- C-Fix (GPP)
- Biome (Reco)

Trees volume

Ground observation:
- Trees inventory (diam., H., .)
- Coniferous (%)
- Deciduous (%)

Remote sensing:
- Fotointerpretation

(tree characteristics: species, crown size...)

Classes of vegetation

NEE

CURRENT C-sequestration

Average tree spatial coverage (m^{-2})
- Coniferous
- Deciduous

Scenario 400.000 trees

Reforested area (ha)

NEE

OFFICIAL REFORESTATION SCENARIO C-sequestration

ALTERNATIVE REFORESTATION SCENARIOS C-sequestration

1. Reforestation surface: changes in reforested area (ha) compared to the official scenario
2. Land use: changes in land use for urban reforestation compared to the official scenario
3. Vegetation type: changes in deciduous/coniferous ratio compared to the actual scenario



NEE

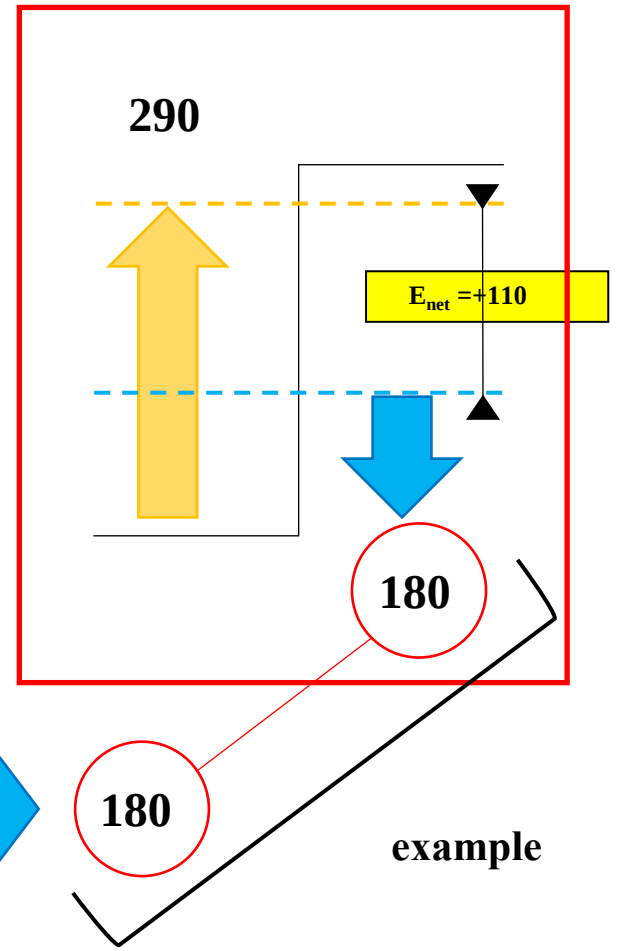
Integrated approach – Step 1
Current Scenarios

C-emission

CO_2 emission inventory (macrocategories)

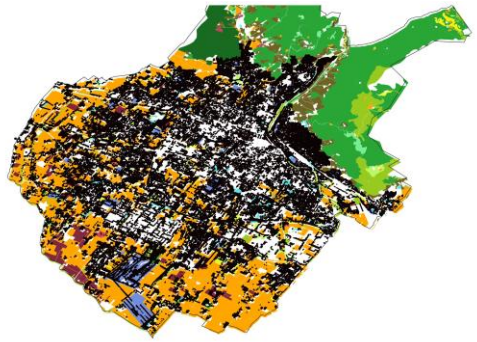
Combustion in energy and transformation industries	60
Non–industrial combustion plants	20
Combustion in manufacturing industry	30
Production processes	10
Extraction and distribution of fossil fuels and geothermal energy	5
Solvent and other product use	0
Road transport	72
Other mobile sources and machinery	58
Waste treatment and disposal	0
Agriculture	0
Other sources and sinks	35
Total	**290**

example



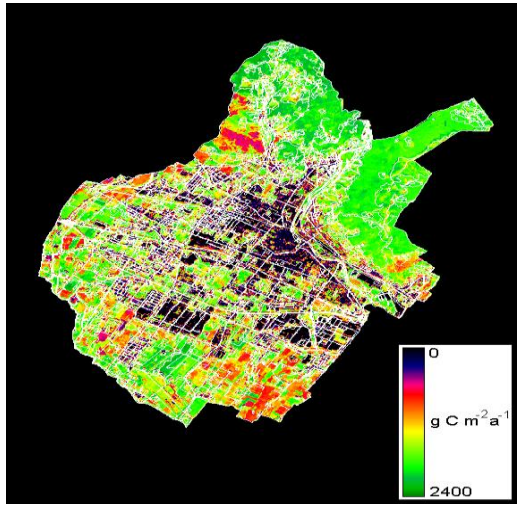
C-sequestration

GIS + Remote sensing + trees inventory



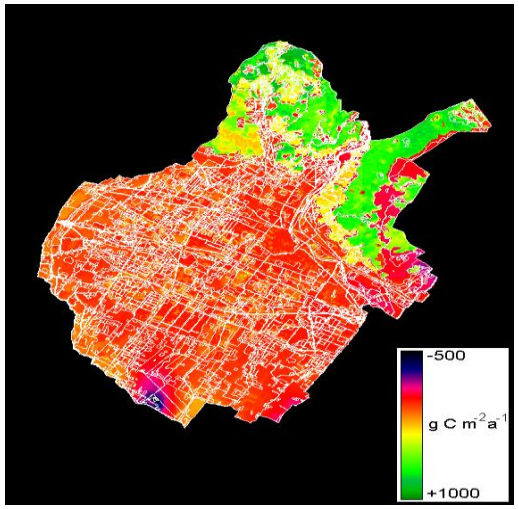
- Land use assessment
- Land use vegetational categories
- Trees volume estimates
- Crown tree estimates

C-Fix



GPP

Biome



NEE

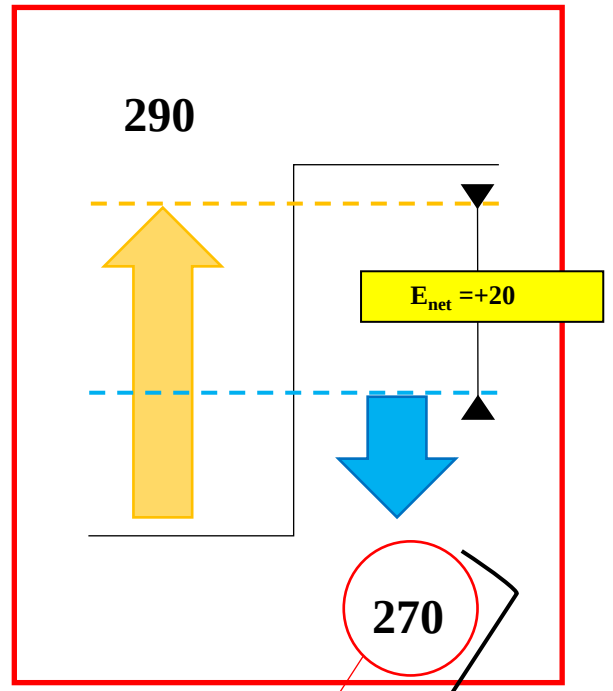
CO_2 emission inventory (macrocategories)

Integrated approach – Step 2
Official Reforestation Scenarios

C-emission

Combustion in energy and transformation industries	60
Non–industrial combustion plants	20
Combustion in manufacturing industry	30
Production processes	10
Extraction and distribution of fossil fuels and geothermal energy	5
Solvent and other product use	0
Road transport	72
Other mobile sources and machinery	58
Waste treatment and disposal	0
Agriculture	0
Other sources and sinks	35
Total	**290**

example



C-sequestration

Ground observation:
- Trees inventory (diam., H., .)
- Coniferous (%)
- Deciduous (%)

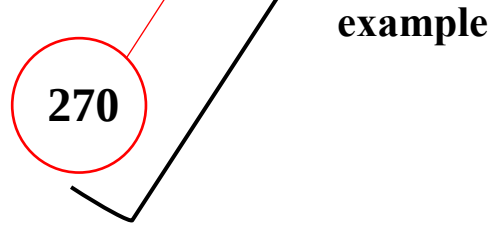
Remote sensing:
- Fotointerpretation

(tree characteristics: specie, crown dimension..)

Average tree spatial coverage (m-2)
- Coniferous
- Deciduous

Official scenario:
+400.000 trees

Reforested area (ha)



example

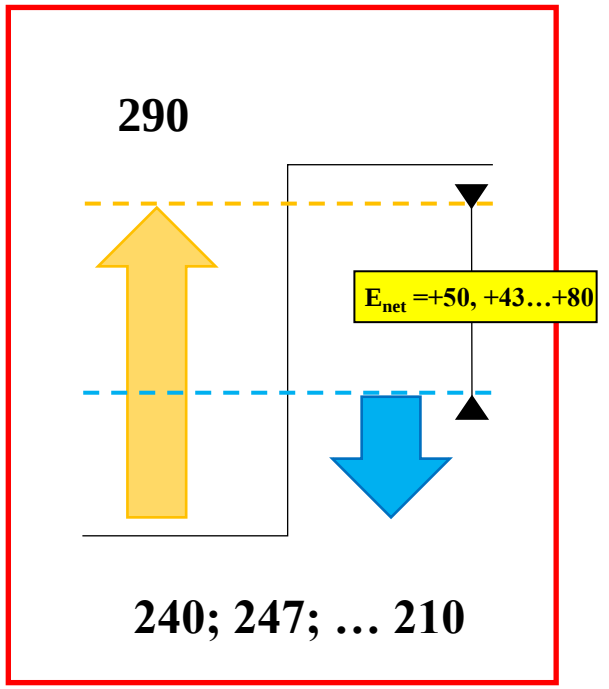
CO_2 emission inventory (macrocategories)

Integrated approach – Step 3
Alternative Reforestation Scenarios

C-emission

Combustion in energy and transformation industries	60
Non–industrial combustion plants	20
Combustion in manufacturing industry	30
Production processes	10
Extraction and distribution of fossil fuels and geothermal energy	5
Solvent and other product use	0
Road transport	72
Other mobile sources and machinery	58
Waste treatment and disposal	0
Agriculture	0
Other sources and sinks	35
Total	**290**

example



C-sequestration

Reforestation scenario 1	→	**240**
Reforestation scenario 2	→	**247**
…….	→	**…..**
…….	→	**…..**
Reforestation scenario X	→	**210**

example

Conclusions

Estimate of increased C-sequestration capacity of a municipality considering:

1. Close-to-reality approach
2. Multiple C-sequestration projections
3. Comparison with officially adopted urban reforestation scenario



Estimates



Assessment of C-emissions that need to be reduced in order to approach C-neutrality:

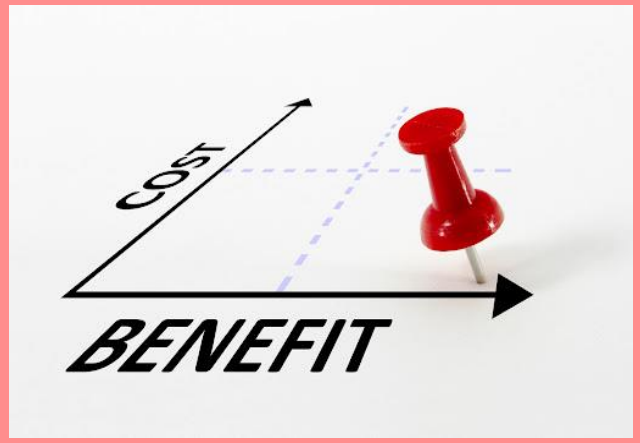
1. Identification of the main contributing sectors
2. C-emissions reduction target to reach sector-by-sector

Suggestions

Feasibility analysis



Cost-benefit analysis



Mandatory