



Urban greenery and air quality in Florence

Il verde urbano e la qualità dell'aria a Firenze

Jacopo Manzini ^{(a)(b)} - Elena Paoletti ^{(a)(c)(*)} - Barbara B. Moura ^{(a)(c)} - Pierre Sicard ^(d)
Beatrice Sorrentino ^(e) - Yasutomo Hoshika ^{(a)(c)}

^(a) Istituto di Ricerca sugli Ecosistemi Terrestri (IRET), Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Via Madonna del Piano 10, 50019 Sesto Fiorentino, Italy.

^(b) Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali (DAGRI), Università degli studi di Firenze, Piazzale delle Cascine, 18, 50144, Firenze, Italy.

^(c) National Biodiversity Future Center (NBFC), Palermo 90133, Italy.

^(d) ACRI-ST, 260 route du Pin Montard, 06904 Sophia-Antipolis, Francia.

^(e) National Agency for New Technologies, Energy, and Sustainable Economic Development (ENEA), CR Casaccia, Via Anguillarese 301, 00123 Rome, Italy.

^(*) Corresponding author: elena.paoletti@cnr.it

Abstract: Billions of people are exposed to levels of urban pollution that exceed regulatory standards for health protection. Urban greenery can certainly reduce the concentrations of major air pollutants such as particulate matter (PM), nitrogen dioxide (NO₂), and ozone (O₃), although the choice of tree species plays a prominent role. The FlorTree model was developed for species selection. FlorTree classified 221 species considering stomatal absorption of NO₂ and O₃, dry deposition of PM, and O₃ formation potential due to the emission of volatile organic compounds. A web APP was developed for evaluating the best species for ameliorating urban air quality. Based on these results, a small urban forest of lime, elm, maple, and cypress trees was planted in the municipality of Florence to quantify, using specific sensors, the actual removal of pollutants by the vegetation. Two-year monitoring showed a reduction in NO₂, O₃, and PM below the canopies. Compliance with the 3-30-300 rule (3 trees visible from your own apartment, 30% tree cover nearby your apartment, 300 meters of distance to green spaces) was also verified in Florence. Results show that approximately 37% of buildings do not meet any criteria, clearly demonstrating the need for new urban greening to improve air quality and human health. Florence tree cover is about 17% (for trees that are >3m tall) or 30% (when including shrubs and meadows), and can remove dangerous pollutants from the air. If Florence tree cover is 30%, 57 premature deaths for air pollution would be prevented every year relative to the year 2019.

Key words: air quality; green infrastructure; human health; pollution; urban greening.

Citation: Manzini, J., Paoletti, E., Moura, B. B., Sicard, P., Sorrentino, B., & Hoshika, Y. (2026). Il verde urbano e la qualità dell'aria a Firenze. *L'Italia Forestale e Montana*, 81(1), 3–15. <https://doi.org/10.36253/ifm-1194>

Received: 17/11/2025 **Revised version:** 18/03/2026 **Published online:** 02/04/2026

1. INTRODUZIONE

Cambiamento climatico ed inquinamento atmosferico sono tra le maggiori sfide che l'umanità deve fronteggiare in questo secolo (Afi-fa et al., 2024). Entro il 2050, più di 5 miliardi di persone vivrà in città e, secondo alcune stime, l'inquinamento atmosferico causerà 4,3 milioni di morti premature all'anno (Lelieveld et al., 2015). In ambiente urbano, è presente una moltitudine di inquinanti, ma i più pericolosi per la salute umana, gli ecosistemi e la biodiversità risultano essere l'ozono troposferico (O_3), il particolato (PM) ed il biossido di azoto (NO_2). Il PM, nella sua componente più fine ($PM_{2,5}$) o grossolana (PM_{10}), così come l' NO_2 sono direttamente emessi da varie attività, come ad esempio il traffico veicolare (Zhang & Batterman, 2013) e processi di combustione di fonti fossili e biomasse (Jyethi, 2016). Al contrario, l' O_3 è un inquinante gassoso secondario che si origina da reazioni fotochimiche fra ossidi di azoto, come l' NO_2 , e composti organici volatili (VOC), di origine antropica o biogenica (Nguyen et al., 2022; Donzelli & Suarez-Varela, 2024). L' O_3 è un inquinante stagionale fortemente influenzato dall'elevato irraggiamento e dalle alte temperature, pertanto desta particolare preoccupazione in località caratterizzate da queste condizioni climatiche, come l'area mediterranea (Massagué et al., 2024).

L'inquinamento da $PM_{2,5}$, NO_2 e O_3 continua ad aumentare in varie città del mondo (Sicard et al., 2023a). L'esposizione a questi fattori di rischio comporta l'aumento di gravi patologie respiratorie acute o croniche (come l'asma), maggiore suscettibilità alle allergie e malattie cardiovascolari (Berger et al., 2021; Shahriyari et al., 2022; Zhou et al., 2024). Nonostante una riduzione significativa delle emissioni, anche in Europa la popolazione urbana è esposta a livelli di $PM_{2,5}$ e O_3 ampiamente superiori ai

valori limite per la protezione della salute, stabiliti dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS), ed il numero di morti imputabili all' O_3 è aumentato in media di 0,55 per milione di abitanti all'anno (Sicard et al., 2021).

A livello urbano, le infrastrutture verdi (ad esempio, parchi, giardini ed alberate stradali) sono alleati preziosi dato che offrono importanti servizi ecosistemici quali la regolazione del micro-clima, lo stoccaggio di anidride carbonica, l'incremento e la protezione della biodiversità, la riduzione del rumore e dell'erosione del suolo ed un aumento del benessere mentale, fisico e sociale per le persone (Cheng et al., 2021; Liang & Huang, 2023). Inoltre, il verde cittadino, in special modo nella sua componente arborea ed arbustiva, riveste un'importanza fondamentale per ripulire l'atmosfera dagli inquinanti (Grylls & Van Reeuwijk, 2022). Tuttavia, le specie legnose mostrano distinte capacità di rimozione degli inquinanti atmosferici con alcune che, addirittura, possono peggiorare la qualità dell'aria emettendo composti organici volatili biogenici (bVOC) precursori dell' O_3 e del PM (Sicard et al., 2018). Isoprene e monoterpeni sono i principali bVOC prodotti dalla vegetazione ed il loro rilascio è modulato sia da fattori abiotici (luce, temperatura e disponibilità idrica) che di stress biotico, come ad esempio attacchi patogeni (Fitzky et al., 2019, 2023). Dall'altro lato, il parametro chiave, determinante per l'assorbimento di gas nocivi, quali NO_2 e O_3 , è la conduttanza stomatica (g_s). La g_s regola infatti gli scambi gassosi pianta-atmosfera tramite l'apertura e la chiusura degli stomi, è influenzata dalle condizioni ambientali ed è altamente specie-specifica (Merilo et al., 2014; Hoshika et al., 2018). Al contrario, il PM non viene significativamente assorbito attraverso gli stomi ma la sua principale via di rimozione è la deposizione secca sulle foglie (Mori et al., 2018) e secondariamente su rami e fusti. In-

terventi di forestazione urbana sono, quindi, fortemente indicati per fronteggiare il problema dell'inquinamento atmosferico, ma la scelta delle specie riveste un ruolo di primo piano per ottimizzarne l'efficacia.

Attraverso la "Nature Restoration Law" (Regolamento UE 2024/1991), l'Unione europea mira a ripristinare gli ecosistemi urbani (articolo 8) - azzerando la perdita netta di spazi verdi e copertura arborea entro il 2030 e favorendone l'espansione dal 2031 - e a piantare 3 miliardi di nuovi alberi (articolo 13) (Ciccarese et al., 2025). Sebbene non sia ancora stata definita la quota parte per ogni Stato membro, è evidente che l'impegno a realizzare interventi significativi di piantagione riguarda anche il nostro Paese, con le città chiamate a promuovere campagne di riforestazione urbana, come accade a Milano con "Forestami", e, a livello nazionale, con "RiforestAzione", progetto del Ministero dell'Ambiente che mira a piantare 4,5 milioni di alberi in 13 città metropolitane. Restrungendo il campo al Comune di Firenze, l'ultimo censimento arboreo, effettuato nel primo semestre del 2024, ha fatto registrare più di 79000 individui per la componente pubblica, con circa 9000 alberi in più rispetto al 2019. In questo solco si inserisce il progetto europeo AIRFRESH "AIR pollution removal by FoRESts for a better human well-being" (LIFE19 ENV/FR/000086), supportato dal programma LIFE, lo strumento di finanziamento europeo per azioni su ambiente e clima. Il progetto, iniziato nell'autunno del 2020, ha riforestato un'area verde, dislocata all'interno del quartiere 4 del Comune di Firenze, utilizzando alcune specie arboree ritenute altamente performanti nel fitorisanamento dell'aria al fine di valutarne l'impatto positivo sulla rimozione dei principali inquinanti atmosferici.

Obiettivo di questo lavoro è sintetizzare le esperienze del progetto AIRFRESH cercando di fare luce su (i) la scelta delle specie al fine

di massimizzare la rimozione degli inquinanti atmosferici a Firenze, (ii) la quantificazione del filtraggio degli inquinanti operato dalle chiome di giovani individui in seguito a un'opera di riforestazione, (iii) l'attuale copertura arborea cittadina ed il rispetto della regola 3-30-300 per la futura pianificazione del verde urbano.

2. QUALI SPECIE SCEGLIERE PER UN'ARIA PIÙ PULITA

Anche per il miglioramento della qualità dell'aria, vale l'affermazione: "l'albero giusto nel posto giusto". Infatti, il clima influenza fortemente sia l'adattabilità di una specie a un determinato ambiente sia le sue capacità di fitorimedio dell'aria. Inoltre, alcune zone urbane sono più inquinate ed è, quindi, necessario piantare specie più performanti nel migliorare la qualità dell'aria rispetto ad altre. Per soddisfare queste esigenze è stato sviluppato FlorTree, un modello innovativo in grado di stimare il flusso di inquinanti atmosferici per singolo albero/arbusto e di supportare la selezione delle specie più idonee al verde urbano (Manzini et al., 2023). Il modello utilizza come input dati orari di concentrazione degli inquinanti atmosferici (O_3 , NO_2 e PM_{10}) e delle variabili meteorologiche (temperatura, radiazione solare, umidità relativa e velocità del vento), registrati durante un anno di osservazioni. Inoltre, FlorTree tiene conto di parametri altamente specie-specifici, come la morfologia dell'albero (altezza e area fogliare della chioma), la struttura e disposizione delle foglie/aghi, l'*habitus* vegetativo (deciduo o sempreverde) e caratteristiche eco-fisiologiche, quali massima g_s e fattori emissivi standard di bVOC (isoprene e monoterpeni). Il modello considera le dimensioni raggiunte a maturità da ciascuna specie, cresciuta isolata ed in condizioni ottimali, ed ha permesso di classificare

221 specie abitualmente utilizzate nei Comuni della Regione Toscana in funzione della loro capacità di rimuovere i principali inquinanti atmosferici. FlorTree è adesso disponibile, per stakeholders e cittadini, sotto forma di web App *user-friendly* al seguente link: <http://dev.kode-datacenter.net:56110/td-flortree-dashboard/welcome>. La web App consente di avere una panoramica sulle 221 specie presenti nel database riportando per ciascuna di esse le caratteristiche di mitigazione nei confronti degli inquinanti atmosferici considerati, classificandone il sequestro in quattro classi da 0 a 3. La web App è pensata anche per progettare aree verdi “anti-inquinamento”; il sistema permette infatti di filtrare le specie vegetali di interesse inserendo dati sulla tipologia di ambiente (montagna, collina, pianura o litorale) e sulle dimensioni del sito, suggerendo infine il tipo e il numero ideale di alberi/arbusti da piantare nell’area di intervento.

Grazie alla raccolta di dati relativi alle emissioni di bVOC, FlorTree ha calcolato per ciascuna specie il suo Potenziale di Ozono Formazione (POF) ed il bilancio netto di O_3 per pianta, cioè la differenza tra O_3 assorbito dagli stomi e O_3 prodotto dalle emissioni di bVOC. Il POF è il prodotto tra la biomassa fogliare secca di ogni singola specie, il tasso di emissione dei bVOC che questa specie emette e la reattività dei bVOC nel determinare la formazione di O_3 . Come si evince dalla figura 1, dove sono riportate le 10 specie più performanti nella rimozione dell’ O_3 , *Fraxinus excelsior* e *Fagus sylvatica* mostrano un’elevata capacità di rimuovere l’ O_3 ed un basso POF. Tuttavia, le due specie non sono ben adattate al clima di Firenze in quanto *F. sylvatica* predilige un clima più fresco e temperato (Fang & Lechowicz, 2006) mentre *F. excelsior* è una specie igrofila sensibile alla siccità; pertanto, se ne raccomanda l’inserimento in aree ombreggiate e ben irrigate (Percival et al., 2006). Le specie afferenti

al genere *Tilia* e *Acer* oltre ad essere ben adattate all’ambiente urbano di Firenze sono caratterizzate da un assorbimento netto di O_3 molto alto grazie al loro POF limitato o addirittura pari a zero come nel caso dei tigli. Al contrario, specie relative al genere *Quercus*, *Populus* ed *Eucalyptus* (Figura 2) hanno mostrato valori elevati di POF che non sono compensati dalla loro capacità di assorbimento. Interessante notare come per *Q. petraea* e *Q. ilex*, nonostante abbiano una capacità di rimozione dell’ O_3 simile a quella di tigli ed aceri, i loro elevati valori di POF hanno determinato un bilancio netto negativo di O_3 . Sempreverdi come *Q. ilex* così come le conifere sono, invece, fortemente raccomandate per la rimozione del PM anche considerando che le maggiori concentrazioni di questo inquinante si registrano nel periodo invernale quando le latifoglie decidue sono spoglie. In particolare, specie afferenti al genere *Cedrus*, grazie alle grandi chiome e alla disposizione degli aghi, possono rimuovere a maturità ingenti quantità di PM_{10} .

3. VALUTAZIONE DELLA CAPACITÀ DI ASSORBIMENTO DA PARTE DI UNA NUOVA “FORESTA URBANA”

Sulla base dei risultati proposti da FlorTree, AIRFRESH ha pianificato un intervento di riforestazione urbana con specie altamente performanti nel miglioramento della qualità dell’aria. Grazie alla collaborazione con il Comune di Firenze è stata individuata un’area posizionata nel quadrante ovest della città (San Bartolo a Cintoia, 43° 46' 38" N, 11° 11' 25" E), a lato di un’arteria di intenso traffico veicolare (Via Simone Martini). La superficie erbosa di circa 0,5 ha si trovava all’interno di un preesistente parco popolato da alberature sparse ed interessato, a sua volta, da un progetto più ampio di riqualificazio-

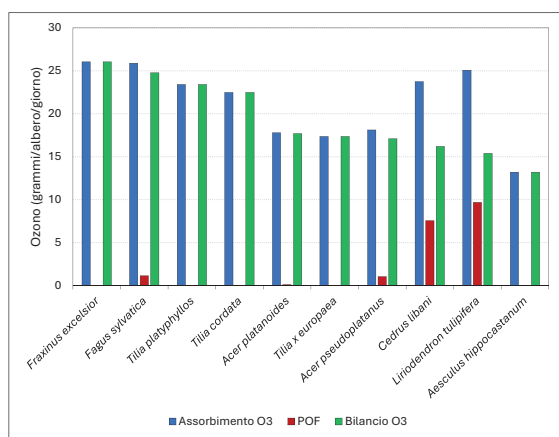


Figura 1 - Migliori 10 specie per la rimozione di O_3 secondo il modello FlorTree. Il bilancio di ozono si ottiene sottraendo il potenziale di ozono formazione (POF) all'assorbimento di ozono operato attraverso gli stomi.

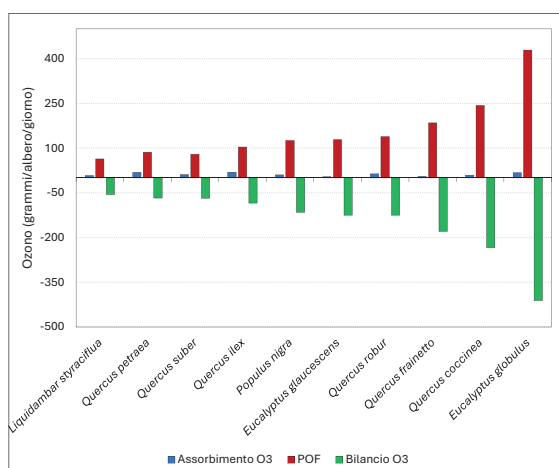


Figura 2 - Peggiori 10 specie per la rimozione di O_3 secondo il modello FlorTree. Queste specie non dovrebbero essere utilizzate in aree già inquinate da ozono.

ne. Nell'inverno del 2022, 170 giovani alberi sono stati messi a dimora e dotati di pali di supporto, protettori del tronco e sistema di irrigazione a goccia. Le specie piantate, scelte per la loro bassa o nulla emissione di bVOC, sono state *Tilia platyphyllos* Scop., *Acer rubrum* L., *Acer opalus* Mill., cloni di cipresso (*Cupressus sempervirens* L.) ed olmo (*Ulmus*

'Plinio') resistenti, rispettivamente, ai patogeni fungini responsabili del cancro del cipresso e della grafiosi dell'olmo.

Dall'estate 2022 fino a dicembre 2024, il progetto ha realizzato un monitoraggio *in situ* continuativo per quantificare, per la prima volta, la rimozione di O_3 , NO_2 , PM_{10} e $PM_{2.5}$ da parte della nuova area riforestata. Per raggiungere l'obiettivo sono state utilizzate delle innovative stazioni *low-cost* AirQino, progettate dall'Istituto per la Bioeconomia del Consiglio Nazionale delle Ricerche di Firenze per il monitoraggio ambientale (Zaldei et al., 2015). La sensoristica permette, infatti, di rilevare simultaneamente in *real-time* le concentrazioni orarie degli inquinanti target e parametri meteorologici, prestandosi perfettamente alle esigenze progettuali. Due sensori AirQino sono stati installati su pali d'acciaio posizionati sopra e sotto chioma (a circa 3,5 e 2,0 m, rispettivamente) all'interno dell'area riforestata (Figura 3) e un sensore è stato installato all'esterno, lungo la strada adibita al traffico veicolare a un'altezza di 3,5 m. Il sensore a 2,0 m non è stato utilizzato all'esterno dell'area in quanto misure precedenti all'impianto non avevano mostrato differenze significative tra i dati ottenuti nelle due posizioni. L'energia elettrica necessaria per il loro funzionamento è stata fornita da batterie (12V, 100Ah) poste in un box esterno adiacente al palo in acciaio.

Analizzando le concentrazioni medie giornaliere degli inquinanti gassosi (O_3 e NO_2), nel 2022 le stazioni AirQino non hanno rilevato differenze significative. Il risultato non sorprende ed è da imputare principalmente alle chiome ancora poco sviluppate ed allo stress post-impianto, accentuato anche da un'estate molto calda. A partire dalla primavera 2023, invece, si inizia a notare un effetto di riduzione sotto chioma sia per O_3 che NO_2 (Tabella 1). Nel dettaglio durante la stagione vegetativa del 2023, considerata indicativamente fra il 15



Figura 3 - Sensori AirQino installati all'interno dell'area sperimentale di San Bartolo a Cintoia a Firenze (estate 2022). Foto: Jacopo Manzini

aprile ed il 31 ottobre, si è registrata una differenza media di 3,0 ppb con una percentuale di riduzione del 8,5% per l'O₃. Restrungendo il campo al solo periodo estivo (giugno-settembre) quando le concentrazioni di O₃ sono più elevate, la differenza media sale a 4,1 ppb con un picco massimo di 5,0 ppb in luglio. Un effetto ancora più accentuato, sicuramente imputabile alla crescita delle chiome, si evidenzia per il 2024 (Tabella 1). L'aumento della superficie fogliare ha indotto una differenza media sopra/sotto chioma di 7,0 ppb con una percentuale di riduzione più alta rispetto all'anno precedente e pari al 17,6%. Durante l'estate, invece la differenza media si assesta su 8,8 ppb con un picco massimo di 10,5 ppb, doppio rispetto all'anno precedente. Per quanto ri-

guarda il NO₂, nelle stagioni vegetative 2023 e 2024, i risultati hanno mostrato un trend di abbattimento sotto chioma simile nei due anni, con una differenza media di circa 2-3 µg/m³ ed una riduzione stimata compresa tra il 7,3 e il 10,6%.

Il PM₁₀ e PM_{2,5} hanno rivelato un andamento simile per i due anni di monitoraggio. In particolare nel 2023, dopo un'iniziale riduzione sotto chioma (-1,9 µg/m³ per PM₁₀ e -0,6 µg/m³ per PM_{2,5}), nel mese di agosto si osserva un'inversione, con valori leggermente più bassi sopra chioma. Il risultato potrebbe essere imputabile a un "effetto risospensione" dovuto al fatto che la superficie fogliare, dopo lunghi periodi senza precipitazioni, si sia completamente saturata annullando così la capacità di cattura del PM, come osservato da Abriha-Molnar et al. (2024). La risospensione potrebbe essere anche imputabile alla morte del rivestimento erboso sottostante le chiome, causata dalla siccità estiva, con conseguente mobilitazione di particolato proveniente dal suolo, oppure ancora alla stagnazione meteorologica (Jiang et al., 2026) tipica delle estati mediterranee. Queste ipotesi, tuttavia, non possono essere validate sulla base dei dati disponibili al momento. Per il 2024, invece, il PM₁₀ mostra valori più bassi sotto chioma per tutto il periodo di riferimento con una differenza media di 2 µg/m³ ed una riduzione del 26%. La differenza di riduzione massima per PM_{2,5} è stata registrata in agosto (-1,7 µg/m³) con una media per tutta la stagione pari a 0,4 µg/m³. Queste evidenze sperimentali trovano riscontro anche nelle simulazioni condotte nell'ambito del progetto AIRFRESH, che attraverso una modellistica ad alta risoluzione a scala urbana ha dimostrato il contributo significativo della vegetazione al miglioramento della qualità dell'aria. Il modello ha confermato l'efficacia della copertura arborea nel ridurre le concentrazioni di O₃, evidenziando i bene-

Tabella 1 - Medie mensili per ciascun inquinante target (O_3 , NO_2 , PM_{10} e $PM_{2.5}$) per ogni anno di monitoraggio (2023 e 2024) sopra e sotto chioma nel bosco AIRFRESH di San Bartolo a Cintoia. I dati si riferiscono al periodo 15 aprile - 31 ottobre. L'analisi della varianza (ANOVA a una via) verifica la significatività delle differenze medie mensili sopra e sotto chioma per ciascun inquinante.

Inquinante	Anno	Posizione	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settem- bre	Ottobre
O_3 (ppb)	2023	Sopra chioma	33,5	34,4	34,8	36,5	37,5	37,1	32,2
		Sotto chioma	32,1	32,2	30,2	31,5	33,2	34,5	31,0
			n.s.	*	***	***	***	*	n.s.
	2024	Sopra chioma	37,5	40,9	40,5	41,3	42,2	39,8	32,1
		Sotto chioma	34,7	35,3	32,3	30,8	32,3	33,2	26,9
			*	***	***	***	***	***	***
NO_2 ($\mu g/m^3$)	2023	Sopra chioma	22,0	23,7	27,6	29,4	28,5	28,5	29,5
		Sotto chioma	20,4	22,0	25,0	25,5	24,4	25,1	26,3
			n.s.	*	***	***	***	***	**
	2024	Sopra chioma	24,9	24,3	24,4	23,6	23,4	25,2	28,2
		Sotto chioma	23,8	22,8	22,4	21,3	21,0	23,3	26,7
			**	***	***	***	***	***	**
PM_{10} ($\mu g/m^3$)	2023	Sopra chioma	7,6	6,6	8,2	11,4	7,4	8,2	13,1
		Sotto chioma	4,5	4,9	6,0	10,9	8,6	9,2	11,9
			**	n.s.	***	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	2024	Sopra chioma	5,6	7,0	7,8	7,2	8,9	7,8	10,2
		Sotto chioma	3,9	5,2	4,8	5,0	6,8	6,2	8,8
			n.s.	*	**	***	***	*	n.s.
$PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)	2023	Sopra chioma	3,2	4,2	4,9	5,1	4,0	4,2	5,9
		Sotto chioma	2,8	2,9	4,3	5,0	4,0	4,3	6,1
			n.s.	*	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	2024	Sopra chioma	2,2	2,9	2,8	4,2	5,7	3,6	4,8
		Sotto chioma	2,4	3,1	2,8	3,2	4,0	3,3	4,7
			n.s.	n.s.	n.s.	***	***	n.s.	n.s.

n.s.: differenza non significativa; * p -value ≤ 0.05 , ** p -value < 0.01 , *** p -value < 0.001 .

fici ambientali e sanitari delle infrastrutture verdi in ambito periurbano; nelle simulazioni con maggiore copertura arborea rispetto allo scenario di controllo, si osserva una diminuzione media su scala cittadina di -0,8 ppb (pari a -1,7%) sulla base delle medie stagionali analizzate (Figura 4).

4. LA COPERTURA ARBOREA E LA REGOLA “3-30-300” A FIRENZE

La “Nature Restoration Law” raccomanda un minimo del 10% di copertura arborea per le città europee, ma nuovi studi hanno suggerito che raggiungere il 30% sarebbe ideale per migliorare micro-clima, qualità dell'aria e salute umana (Astell-Burt & Feng, 2020; Lungman et al., 2023). Come riportato da Sicard et al. (2025), in Europa nel periodo 2000-2019, la copertura arborea media era del 18,5% (14,2% in Italia) con un aumento nei centri urbani dello 0,22% all'anno (+ 0,68% in Italia). Lo studio ipotizza inoltre come una crescita della copertura arborea fino al 30%, rispetto al valore del 2019, comporterebbe un rilevante beneficio sanitario con una diminuzione del numero di morti premature di 9,5 per centomila abitanti. Per quanto riguarda Firenze, il progetto AIRFRESH ha sviluppato un approccio basato su telerilevamento da immagini satellitari che ha permesso di individuare e classificare alberi posizionati sia in aree pubbliche che private (Sicard et al., 2023b). Per l'area di studio (pari al 78,4% dell'intera città) i risultati evidenziano come, considerando anche le zone a prato, l'attuale copertura verde sia del 30,3% e che circa l'85% degli alberi sia dislocata in terreni privati. Nel dettaglio il numero degli alberi identificati è stato di 553446 con le seguenti specie più rappresentate: *Quercus* spp. (728 ha), *Tilia x europaea* (492,5 ha), *Celtis australis* (338 ha), *Pinus*

spp. (278 ha), *Cupressus sempervirens* (176 ha), *Platanus x acerifolia* (90 ha), *Olea europaea* (88 ha) e *Acer* spp. (61,5 ha).

L'Amministrazione Comunale ha recentemente approvato il nuovo Piano del Verde (<https://ambiente.comune.fi.it/pagina/piano-del-verde-e-degli-spazi-aperti>), con lo scopo di aumentare non solo la presenza di alberi ma di portare tutti i quartieri al 30% di copertura arborea. Il piano si ispira a una nuova linea guida, basata su evidenze scientifiche, per lo sviluppo di ambienti urbani sempre più verdi, resilienti e sani: la cosiddetta “regola 3-30-300” (Konijnendijk, 2023). Come primo punto, la regola impone che siano visibili dalla propria abitazione, posto di lavoro o scuola almeno 3 alberi alti più di 3 m e con una copertura minima di 25 m². A livello di quartiere (entro 500 m da casa), invece, dovrebbe essere garantita una copertura arborea minima del 30% e laddove questo non sia possibile, ad esempio in climi aridi dove gli alberi crescono più difficilmente, questa percentuale dovrebbe essere raggiunta utilizzando qualsiasi tipologia di vegetazione. Infine, l'ultima condizione da rispettare è quella che ogni cittadino possa accedere facilmente a un ampio spazio verde pubblico (con un'estensione maggiore di 0,5 ha) entro 300 metri dalla propria residenza, all'incirca 5 minuti a piedi. Il rispetto della regola 3-30-300 è stato associato alla riduzione della temperatura dell'aria (Torkfar & Russo, 2023), alla prevenzione delle morti premature e a minore morbilità (Kondo et al., 2020), per esempio da ipertensione e malattie cardiovascolari. Inoltre, comporta una migliore salute mentale, recupero psicologico e senso di benessere, legato sia alla possibilità di condurre attività fisica all'aperto, che all'opportunità di interazioni sociali (Nieuwenhuijsen et al., 2022; Zheng et al., 2024).

Nell'ambito del progetto AIRFRESH, integrando tecniche di telerilevamento e GIS, ci si

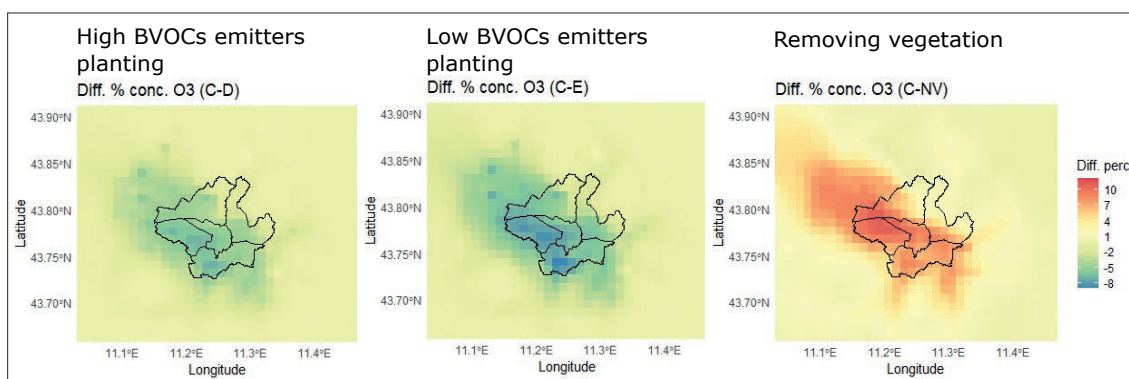


Figura 4 - Variazioni percentuali notturne di O_3 rispetto all'attuale copertura vegetale. La figura mostra le differenze nelle concentrazioni medie notturne di O_3 tra lo scenario di controllo, che rappresenta le condizioni reali di vegetazione, e tre differenti strategie arboree per la città di Firenze: sostituire il 50% della vegetazione con specie che emettono alte quantità di composti organici volatili (BVOC), sostituire il 50% della vegetazione con specie che emettono basse quantità di BVOC, oppure rimuovere il 100% della vegetazione esistente.

è posti l'ambizioso obiettivo di verificare quale sia, ad oggi, il rispetto della regola 3-30-300 all'interno del Comune di Firenze anche per fornire una mappatura su dove sia più urgente ricorrere ad opere di rinverdimento. Come riportato dagli autori dello studio (Lopez et al., 2025), sono state inizialmente utilizzate immagini satellitari ad altissima risoluzione per rilevare gli alberi e stimare la copertura della chioma (Componenti 3 e 30). Successivamente, sono stati integrati dati OpenStreetMap per valutare la vicinanza agli spazi verdi (Componente 300). Lo studio, condotto su un'area di circa 75 km² centrata su Firenze (78% del territorio comunale), ha evidenziato come il 38% degli edifici rispetta la componente 3, il 10% la componente 30 ed il 41% la componente 300. Pertanto, circa un terzo (37%) degli edifici a Firenze non rispetta nessuno dei tre criteri, il 40% ne rispetta almeno uno, il 19% ne rispetta due mentre solo il 4% li rispetta tutti e tre (Figura 5).

Seppur con alcune inevitabili imprecisioni, la mappatura geospaziale risultante offre un interessante strumento innovativo, utile a identificare le aree prioritarie da rinverdire a Firenze con un effetto benefico anche su qualità dell'aria e mitigazione dell'isola di calore.

Questi strumenti sono pertanto cruciali per aiutare gli amministratori locali a prendere decisioni, basate su evidenze scientifiche, su dove è essenziale intervenire per promuovere una pianificazione urbana sostenibile e resiliente.

5. CONCLUSIONI E PROSPETTIVE FUTURE

Gli effetti del cambiamento climatico e dell'inquinamento atmosferico incidono pesantemente sulle città contribuendo a milioni di morti premature a livello mondiale. Il verde urbano, e gli alberi in particolare, offrono una molteplicità di servizi ecosistemici, inclusa la capacità di migliorare la qualità dell'aria che respiriamo. L'incremento della copertura arborea in contesti antropizzati è ormai una necessità prioritaria, sebbene la selezione delle specie rappresenti ancora un nodo cruciale. Strumenti come FlorTree possono supportare decisioni più consapevoli e scientificamente fondate, tuttavia è necessario un continuo ampliamento e aggiornamento dei database specie-specifici. L'esperimento condotto nel parco AIRFRE-SH di San Bartolo a Cintoia ha dimostrato che la scelta di idonee specie "mangia-smog"

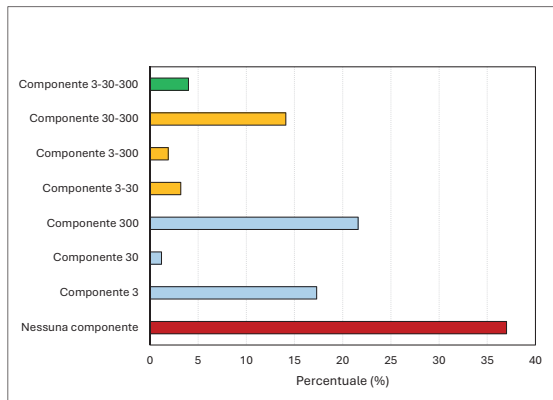


Figura 5 - Percentuale di edifici che non rispettano (barra rossa) o rispettano uno (barre azzurre), due (barre gialle) o tre (barra verde) criteri della regola “3-30-300” a Firenze, cioè 3 alberi visibili dalla propria abitazione, 30% di copertura arborea nelle vicinanze, 300 m di distanza da spazi verdi.

ha effettivamente portato a un miglioramento della qualità dell'aria con una riduzione sotto chioma di tutti gli inquinanti monitorati già dopo un anno dalla piantagione. L'area riforestata del progetto AIRFRESH copre circa 0,5 ha all'interno di un parco periurbano. Si tratta attualmente di un sito dimostrativo con piante giovani utile per effettuare un monitoraggio locale e simulazioni modellistiche ma sarà interessante seguirne l'evoluzione fino a maturità per verificarne i benefici anche su scala urbana. I risultati mostrano che se Firenze raggiungesse il 30% di copertura arborea, come richiesto a livello comunitario, si potrebbero ricondurre gli inquinanti sotto i limiti OMS e prevenire così un numero cospicuo di morti premature per inquinamento atmosferico all'anno (-57 morti premature per inquinamento atmosferico all'anno rispetto al 2019, secondo Sicard et al., 2025). Inoltre, l'introduzione della regola 3-30-300, comporta la pianificazione di città sempre più sostenibili e mappature del territorio, come quelle già disponibili per Firenze grazie al progetto AIRFRESH, possono aiutare gli amministratori locali a decidere dove

è meglio piantare. Infine, occorre sottolineare come la politica sia urgentemente chiamata a fare scelte coraggiose ma che potrebbero rivelarsi decisive e lungimiranti in futuro, poiché investire oggi nel verde urbano significa ridurre i costi sanitari ed ambientali domani.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano il progetto LIFE AIRFRESH “AIR pollution removal by FoRESts for a better human well-being” (LIFE19 ENV/FR/000086) per il supporto finanziario e tutti i partner del progetto. Inoltre, si ringrazia il Comune di Firenze per aver contribuito alla manutenzione dell'area sperimentale di San Bartolo a Cintoia. La pubblicazione è stata realizzata con il cofinanziamento dell'Unione europea - Next Generation EU - Missione 4, “Istruzione e Ricerca” - Componente 2, “Dalla ricerca all'impresa” - Linea di investimento 3.1, “Fondo per la realizzazione di un sistema integrato di infrastrutture di ricerca e innovazione” - Progetto IR0000032 - ITINERIS - Italian Integrated Environmental Research Infrastructures System - CUP B53C22002150006, Linea di Investimento 1.4 - Avviso N. 3138 del 16 dicembre 2021 rettificato con D.D. n.3175 del 18 dicembre 2021 del Ministero dell'Università e della Ricerca, Codice progetto CN_00000033, Decreto Direttoriale MUR n. 1034 del 17giugno 2022 di concessione del finanziamento, CUP B83C22002930006, titolo progetto “National Biodiversity Future Center - NBFC”, Spoke 5. Gli autori ringraziano le Infrastrutture di Ricerca che partecipano al progetto ITINERIS con i loro nodi italiani, in particolare AnaEE. I risultati qui riassunti sono stati presentati alla giornata di studio “Il verde urbano e la qualità dell'aria a Firenze” organizzata l'11 settembre 2025 presso l'Accademia Italiana di Scienze Forestali.

RIASSUNTO

Miliardi di persone sono esposte a livelli di inquinamento cittadino eccedenti gli standard normativi per la protezione della salute. Il verde urbano può certamente aiutare ad abbassare le concentrazioni dei principali inquinanti atmosferici quali particolato (PM), biossido d'azoto (NO_2) e ozono (O_3) anche se la scelta delle specie arborea risulta basilare. Il modello FlorTree ha permesso di classificare 221 specie considerando l'assorbimento stomatico di NO_2 ed O_3 , la deposizione del PM e il potenziale di formazione dell' O_3 derivante dalle emissioni di composti organici volatili. Una web APP è stata sviluppata per individuare le specie migliori per la qualità dell'aria cittadina. In base a questi risultati, è stato piantato all'interno del Comune di Firenze un piccolo bosco urbano con tigli, olmi, aceri e cipressi per quantificare, tramite apposita sensoristica, la rimozione effettiva degli inquinanti da parte della vegetazione. Il monitoraggio biennale ha evidenziato una riduzione sotto chioma per NO_2 , O_3 e PM. Inoltre, si è verificato il rispetto della regola 3-30-300 (3 alberi visibili dalla propria abitazione, 30% di copertura arborea nelle vicinanze, 300 metri di distanza da spazi verdi) a Firenze. I risultati hanno mostrato come il 37% degli edifici non rispetti nessun criterio, dimostrando chiaramente come il rinverdimento urbano sia necessario per migliorare la qualità dell'aria e la salute delle persone. A Firenze la copertura arborea è circa il 17% (se consideriamo gli alberi più alti di 3 m) o 30% (se consideriamo anche arbusti e prati), ed è in grado di rimuovere dall'atmosfera inquinanti pericolosi. Se Firenze raggiungesse il 30% di copertura arborea, si potrebbero prevenire 57 morti premature per inquinamento atmosferico all'anno rispetto al 2019.

BIBLIOGRAFIA

- Abriha-Molnár, V. É., Szabó, S., Magura, T., Tóthmérész, B., Abriha, D., Sipos, B., & Simon, E. (2024). Environmental impact assessment based on particulate matter, and chlorophyll content of urban trees. *Scientific Reports*, 14(1), 19911. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70664-4>
- Afifa Arshad, K., Hussain, N., Ashraf, M. H., & Saleem, M. Z. (2024). Air pollution and climate change as grand challenges to sustainability. *Science of The Total Environment*, 928, 172370. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172370>
- Astell-Burt, T., & Feng, X. (2020). Urban green space, tree canopy and prevention of cardiometabolic diseases: A multilevel longitudinal study of 46 786 Australians. *International Journal of Epidemiology*, 49(3), 926–933. <https://doi.org/10.1093/ije/dyz239>
- Berger, M., Bastl, M., Bouchal, J., Dirr, L., & Berger, U. (2021). The influence of air pollution on pollen allergy sufferers. *Allergologie Select*, 5(01), 345–348. <https://doi.org/10.5414/ALX02284E>
- Cheng, X., Van Damme, S., & Uyttenhove, P. (2021). A review of empirical studies of cultural ecosystem services in urban green infrastructure. *Journal of Environmental Management*, 293, 112895. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112895>
- Ciccarese, L., Rastelli, V., Iovino, F., & Piovesan, G. (2025). Regolamento dell'Unione europea per il Ripristino della Natura: Considerazioni per la sua attuazione nel settore forestale. *L'Italia forestale e montana*, 80(3), 135–159. <https://doi.org/10.36253/ifm-1182>
- Donzelli, G., & Suarez-Varela, M. M. (2024). Tropospheric Ozone: A Critical Review of the Literature on Emissions, Exposure, and Health Effects. *Atmosphere*, 15(7), 779. <https://doi.org/10.3390/atmos15070779>
- Fang, J., & Lechowicz, M. J. (2006). Climatic limits for the present distribution of beech (*Fagus* L.) species in the world. *Journal of Biogeography*, 33(10), 1804–1819. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01533.x>
- Fitzky, A. C., Kaser, L., Peron, A., Karl, T., Graus, M., Tholen, D., ... & Rewald, B. (2023). Same, same, but different: Drought and salinity affect BVOC emission rate and alter blend composition of urban trees. *Urban Forestry & Urban Greening*, 80, 127842. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.127842>
- Fitzky, A. C., Sandén, H., Karl, T., Fares, S., Calfa-pietra, C., Grote, R., ... & Rewald, B. (2019). The Interplay Between Ozone and Urban Vegetation - BVOC Emissions, Ozone Deposition, and Tree Ecophysiology. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2, 50. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2019.00050>
- Grylls, T., & Van Reeuwijk, M. (2022). How trees affect urban air quality: It depends on the source. *Atmospheric Environment*, 290, 119275. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119275>
- Hoshika, Y., Osada, Y., De Marco, A., Peñuelas, J., & Paoletti, E. (2018). Global diurnal and nocturnal parameters of stomatal conductance in woody

- plants and major crops. *Global Ecology and Biogeography*, 27(2), 257–275. <https://doi.org/10.1111/geb.12681>
- Jungman, T., Cirach, M., Marando, F., Pereira Barboza, E., Khomenko, S., Masselot, P., ... & Nieuwenhuijsen, M. J. (2023). Cooling cities through urban green infrastructure: A health impact assessment of European cities. *The Lancet*, 401(10376), 577–589. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(22\)02585-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(22)02585-5)
- Jiang, B., Cai, Y., Shi, Y., Zhai, Q., Huang, H., Peng, L., & Zhan, J. (2026). Characterization, sources, and driving factors of particulate matter (PM) pollution in a desert hinterland city: Insights from Hotan, China. *Journal of Environmental Sciences*, 161, 209–219. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2025.10.024>
- Jyethi, D. S. (2016). Air Quality: Global and Regional Emissions of Particulate Matter, SO_x, and NO_x. In U. Kulshrestha & P. Saxena (Eds.), *Plant Responses to Air Pollution* (pp. 5–19). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1201-3_2
- Kondo, M. C., Mueller, N., Locke, D. H., Roman, L. A., Rojas-Rueda, D., Schinasi, L. H., ... & Nieuwenhuijsen, M. J. (2020). Health impact assessment of Philadelphia's 2025 tree canopy cover goals. *The Lancet Planetary Health*, 4(4), e149–e157. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(20\)30058-9](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(20)30058-9)
- Konijnendijk, C. C. (2023). Evidence-based guidelines for greener, healthier, more resilient neighbourhoods: Introducing the 3–30–300 rule. *Journal of Forestry Research*, 34(3), 821–830. <https://doi.org/10.1007/s11676-022-01523-z>
- Lelieveld, J., Evans, J. S., Fnais, M., Giannadaki, D., & Pozzer, A. (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature*, 525(7569), 367–371. <https://doi.org/10.1038/nature15371>
- Liang, D., & Huang, G. (2023). Influence of Urban Tree Traits on Their Ecosystem Services: A Literature Review. *Land*, 12(9), 1699. <https://doi.org/10.3390/land12091699>
- Lopez, M. A., Marco, A. D., Anav, A., Sorrentino, B., Paoletti, E., Manzini, J., ... & Sicard, P. (2025). The 3–30–300 rule Compliance: A geospatial tool for urban planning. *Landscape and Urban Planning*, 261, 105396. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2025.105396>
- Manzini, J., Hoshika, Y., Carrari, E., Sicard, P., Watanabe, M., Tanaka, R., ... & Nicese, F. P. (2023). FlorTree: A unifying modelling framework for estimating the species-specific pollution removal by individual trees and shrubs. *Urban Forestry & Urban Greening*, 85, 127967. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.127967>
- Massagué, J., Torre-Pascual, E., Carnerero, C., Escudero, M., Alastuey, A., Pandolfi, M., ... & Gangoi, G. (2024). Extreme ozone episodes in a major Mediterranean urban area. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24(8), 4827–4850. <https://doi.org/10.5194/acp-24-4827-2024>
- Merilo, E., Jõesaar, I., Brosché, M., & Kollist, H. (2014). To open or to close: Species-specific stomatal responses to simultaneously applied opposing environmental factors. *New Phytologist*, 202(2), 499–508. <https://doi.org/10.1111/nph.12667>
- Mori, J., Fini, A., Galimberti, M., Ginepro, M., Burchi, G., Massa, D., & Ferrini, F. (2018). Air pollution deposition on a roadside vegetation barrier in a Mediterranean environment: Combined effect of evergreen shrub species and planting density. *Science of The Total Environment*, 643, 725–737. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.217>
- Nguyen, D. H., Lin, C., Vu, C. T., Cheruiyot, N. K., Nguyen, M. K., Le, T. H., ... & Bui, X. T. (2022). Tropospheric ozone and NO_x: A review of worldwide variation and meteorological influences. *Environmental Technology & Innovation*, 28, 102809. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102809>
- Nieuwenhuijsen, M. J., Dadvand, P., Márquez, S., Bartoll, X., Barboza, E. P., Cirach, M., ... & Zijlema, W. L. (2022). The evaluation of the 3-30-300 green space rule and mental health. *Environmental Research*, 215, 114387. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114387>
- Percival, G. C., Keary, I. P., & AL-Habsi, S. (2006). An assessment of the drought tolerance of Fraxinus genotypes for urban landscape plantings. *Urban Forestry & Urban Greening*, 5(1), 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2006.03.002>
- Shahriyari, H. A., Nikmanesh, Y., Jalali, S., Tahery, N., Zhiani Fard, A., Hatamzadeh, N., ... & Mohammadi, M. J. (2022). Air pollution and human health risks: Mechanisms and clinical manifestations of cardiovascular and respiratory diseases. *Toxin Reviews*, 41(2), 606–617. <https://doi.org/10.1080/15569543.2021.1887261>
- Sicard, P., Agathokleous, E., Anenberg, S. C., De Marco, A., Paoletti, E., & Calatayud, V. (2023a). Trends in urban air pollution over the last two decades: A global perspective. *Science of The To*

- tal Environment*, 858, 160064. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160064>
- Sicard, P., Agathokleous, E., Araminiene, V., Carrari, E., Hoshika, Y., De Marco, A., & Paoletti, E. (2018). Should we see urban trees as effective solutions to reduce increasing ozone levels in cities? *Environmental Pollution*, 243, 163–176. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.08.049>
- Sicard, P., Agathokleous, E., De Marco, A., Paoletti, E., & Calatayud, V. (2021). Urban population exposure to air pollution in Europe over the last decades. *Environmental Sciences Europe*, 33(1), 28. <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00450-2>
- Sicard, P., Coulibaly, F., Lameiro, M., Araminiene, V., De Marco, A., Sorrentino, B., Anav, A., Manzini, J., Hoshika, Y., Moura, B. B., & Paoletti, E. (2023b). Object-based classification of urban plant species from very high-resolution satellite imagery. *Urban Forestry & Urban Greening*, 81, 127866. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.127866>
- Sicard, P., Pascu, I.-S., Petrea, S., Leca, S., Marco, A. D., Paoletti, E., Agathokleous, E., & Calatayud, V. (2025). Effect of tree canopy cover on air pollution-related mortality in European cities: An integrated approach. *The Lancet Planetary Health*, 9(6), e527–e537. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(25\)00112-3](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(25)00112-3)
- Torkfar, P., & Russo, A. (2023). Assessing the benefits of climate-sensitive design with nature-based solutions for climate change adaptation in urban regeneration: A case study in Cheltenham, UK. *Sustainability*, 15(22), Articolo 15855. <https://doi.org/10.3390/su152215855>
- Zaldei, A., Vagnoli, C., Di Lonardo, S., Gioli, B., Gualtieri, G., Toscano, P., Martelli, F., & Matese, A. (2015). *AIRQino, a low-cost air quality mobile platform* (EGU General Assembly Conference Abstracts, p. 6158). <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2015EGUGA..17.6158Z>
- Zhang, K., & Batterman, S. (2013). Air pollution and health risks due to vehicle traffic. *Science of The Total Environment*, 450–451, 307–316. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.074>
- Zheng, Y., Lin T., Hamm N. A. S., Liu, J., Zhou, T., Geng, H., Zhang, J., & Zhou, Y. (2024). Quantitative evaluation of urban green exposure and its impact on human health: A case study on the 3–30–300 rule. *Building and Environment*, 247, Articolo 111005. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171461>
- Zhou, X., Sampath, V., & Nadeau, K. C. (2024). Effect of air pollution on asthma. *Annals of Allergy, Asthma & Immunology*, 132(4), 426–432. <https://doi.org/10.1016/j.anai.2024.01.017>