



Consiglio Nazionale delle Ricerche
Istituto di Biometeorologia

Progetto di riqualificazione del territorio

il ruolo del verde nella mitigazione ambientale

A cura dei ricercatori IBIMET

Rita Baraldi - Luisa Neri - Giulia Carriero - Osvaldo Facini



SEDE Bologna
Via Piero Gobetti, 101 - 40129 Bologna
Tel. +39 0516399014 Fax. +39 0516399024

Indice

	Pag.
RIASSUNTO	3
1. Inquinanti atmosferici e qualità dell'aria	4
1.1. Il particolato atmosferico	4
1.2. Ossidi di azoto (NOx)	6
1.3. Ozono (O ₃)	6
2. Il ruolo dell'anidride carbonica (CO ₂)	7
3. Le piante come filtro dell'aria	7
3.1. Intercettazione e assorbimento di inquinanti	7
3.2. Riduzione delle isole di calore urbane	9
4. Emissione di composti organici volatili biogenici (COV) e formazione di O ₃	10
5. Scelta delle piante per la mitigazione in ambiente urbano	11
5.1. Indagini ecofisiologiche e micromorfologiche	12
5.2. Allergenicità delle piante	13
6. Dalla scienza all'applicazione: proposta di mitigazione ambientale nel comparto industriale del Bargellino	22
7. Elenco delle specie rappresentative dell'area metropolitana di Bologna scelte in base alla loro efficacia nella mitigazione ambientale	26
 Bibliografia	 28

Riassunto

I cambiamenti climatici in atto sono gli effetti sempre più evidenti delle attività umane. Le emissioni di origine antropica derivanti dai prodotti della combustione, dal traffico veicolare, dalle industrie e dal riscaldamento domestico hanno portato all'accumulo di inquinanti e all'aumento di anidride carbonica (CO₂) in atmosfera, innalzando le temperature medie globali. Le polveri sono considerate di maggiore impatto nelle aree urbane per i loro effetti sul clima e in particolare sulla salute, essendo responsabili dell'aumento delle malattie dell'apparato respiratorio, cardio-circolatorio, e delle malattie allergiche e, in casi più gravi, della mortalità della popolazione residente in città. Il crescente interesse della comunità scientifica nella ricerca di piani di contrasto ai cambiamenti climatici è finalizzato all'adozione di strategie sia per l'eliminazione delle loro cause principali sia per la mitigazione degli effetti. Tra le strategie di mitigazione adottate negli ultimi anni, il verde urbano ha assunto un'importanza sempre più rilevante per il ruolo svolto nel miglioramento ambientale e della qualità della vita. Le piante possono indubbiamente rappresentare una soluzione ecocompatibile e al tempo stesso biosostenibile di mitigazione ambientale in quanto sono in grado di sequestrare la CO₂ dall'atmosfera attraverso i processi fotosintetici e di comportarsi come veri e propri filtri naturali, assorbendo o trattenendo gli inquinanti grazie alla peculiarità delle strutture fogliari. Inoltre, possono contenere l'innalzamento delle temperature urbane che portano alla formazione delle così dette "isole di calore" in città, attraverso l'ombreggiamento naturale e attraverso il fenomeno dell'evapotraspirazione dalle foglie dell'acqua assorbita dal terreno con le radici. Nella progettazione del verde urbano è importante operare una scelta oculata delle specie da impiegare per massimizzare i servizi ecosistemici della vegetazione e ridurre i disservizi tra i quali anche le allergicità. E' inoltre indispensabile garantire idonei e sistematici interventi di gestione e manutenzione.

La realizzazione di questo opuscolo ha lo scopo di fornire informazioni dettagliate sulle specie vegetali da impiegare nella progettazione del verde urbano e sub-urbano per coadiuvare le scelte e le azioni delle amministrazioni pubbliche e private. In questa guida, il gruppo di ricerca dell'IBIMET-CNR di Bologna propone inoltre soluzioni concrete per la mitigazione ambientale nella zona industriale del Bargellino che prevedono un'oculata progettazione del verde e, al tempo stesso, il controllo della qualità dell'aria attraverso una rete di monitoraggio.

1. Inquinanti atmosferici e qualità dell'aria

I cambiamenti climatici in atto sul nostro pianeta sono conseguenza di un progressivo aumento del riscaldamento globale causato dalle emissioni di anidride carbonica (CO₂) e dalla presenza in atmosfera di polveri e di inquinanti gassosi prodotti dalle attività antropiche. Spesso questi inquinanti si concentrano nelle aree urbane, dove le loro emissioni derivano dalle attività industriali, dal traffico veicolare, dal riscaldamento domestico e, in generale, dai prodotti della combustione. Tali attività portano pertanto ad un incremento della concentrazione di gas serra in atmosfera (vapore acqueo, anidride carbonica (CO₂), metano (CH₄) e ozono (O₃)), artefici dei cambiamenti climatici sul nostro pianeta (IPCC, 2007).

Gli inquinanti atmosferici vengono definiti primari se sono emessi da sorgenti specifiche durante la combustione di qualsiasi natura (e.g. ossidi di zolfo (SO_x), ossidi di azoto (NO_x), monossido di carbonio (CO), idrocarburi, tra cui il benzene e gli Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA), e particolato, o secondari, se invece si formano in atmosfera in seguito a reazioni chimiche (e.g. ozono). Gli inquinanti alterano la normale composizione chimica dell'atmosfera e rappresentano un pericolo per la salute.

E' stato riscontrato che l'incremento di inquinanti provoca anche un aumento delle allergie respiratorie. Infatti la presenza di ingenti quantità nell'aria di ossidi di azoto e anidride solforosa, porta a un peggioramento dei disturbi di rinite allergica; mentre l'O₃ determina iperattività bronchiale e amplifica

la sintomatologia dell'asma allergica, aumenta la risposta infiammatoria e la conseguente riacutizzazione clinica (Ferrante et al., 2013).

Il consenso scientifico attorno al riscaldamento globale e le previsioni di innalzamento delle temperature hanno spinto varie nazioni ad adottare delle misure per cercare di limitare questo fenomeno. Le contromisure correttive più immediate si articolano intorno alla riduzione della concentrazione di CO₂ in atmosfera attraverso due possibili azioni: utilizzo di energie alternative o rinnovabili e sequestro di CO₂ in atmosfera tramite le specie vegetali.

1.1. Particolato atmosferico (PM)

Il particolato atmosferico è un inquinante primario considerato di elevato impatto nelle aree urbane per la sua pericolosità (WHO 2015; EEA, 2016). Il particolato indica l'insieme di particelle solide di origine naturale (polveri, batteri, spore etc.) o antropica (attività industriali, riscaldamento o traffico veicolare) che tende a permanere negli strati bassi dell'atmosfera e che ha un diametro che va da pochi nanometri fino ai 500 µm e oltre (Bell et al., 2013) (Figura 1).

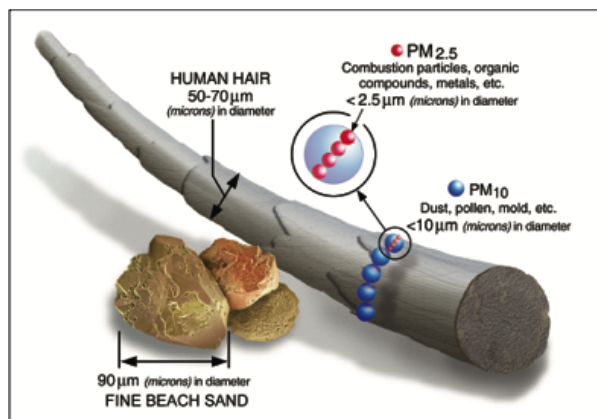


Figura 1. Confronto dimensionale tra PM, granello di sabbia e capello umano (immagine tratta da EPA, office of research and development).

La dimensione media delle particelle determina il loro grado di penetrazione nell'apparato respiratorio e la conseguente pericolosità per la salute umana (Figura 2).

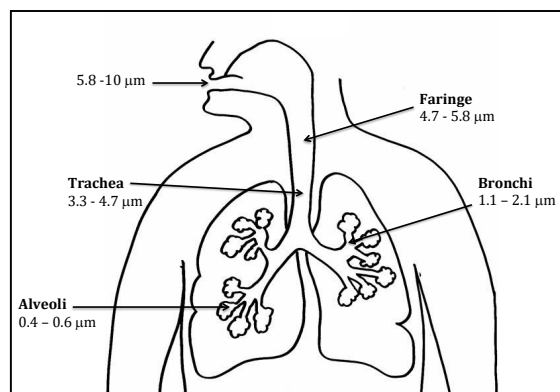


Figura 2. Profondità di penetrazione del particolato nel sistema respiratorio a seconda della dimensione (Carriero G.).

Le polveri PM10 hanno un diametro aerodinamico inferiore a 10 µm. Sono in genere trattenute dalla parte superiore dell'apparato respiratorio (naso, laringe, faringe e trachea). Le PM2.5 sono il particolato di diametro inferiore a 2.5 µm e sono in grado di entrare profondamente nei polmoni.

Per dimensioni ancora inferiori si parla di polvere respirabile, che può penetrare nei polmoni fino agli alveoli. Infine le PM0.1 sono nano polveri, con un diametro inferiore a 0.1 µm. I dati forniti dall' Organizzazione Mondiale della Sanità indicano che nel 2016 l'esposizione all'inquinamento da PM ha causato 7 milioni di morti nel mondo, pari a 7,6% della mortalità mondiale, posizionandosi al quinto posto nella classifica dei principali fattori di rischio per mortalità. Secondo la stima, l'aria inquinata è causa del 24% di tutte le morti per attacco cardiaco, del 25% degli ictus mortali, del 43% delle morti per malattie polmonari ostruttive e del 29% dei tumori al polmone. Nel 2016 l'Agenzia Europea dell'Ambiente ha stimato in 436.000 le morti premature riconducibili solo alle polveri sottili (EEA 2016). La riduzione del particolato è un obiettivo della politica europea e mondiale. L'organizzazione mondiale della sanità nel 2006 ha riconosciuto la correlazione tra l'esposizione a PM2.5 e l'insorgenza di malattie cardiovascolari e ha abbassato i livelli di concentrazione massimi "consigliati" a 20 e 10 µg m⁻³ rispettivamente per PM10 e PM2.5. In generale i limiti per la concentrazione di PM nell'aria sono stabiliti dalla nuova direttiva (2008/50/EC) che detta i limiti di qualità dell'aria con riferimento anche alle PM2.5. Tale direttiva è stata recepita dalla legislazione italiana con il Decreto Legislativo 13 agosto 2010, n. 155 (Tabella 1).

Tabella 1. Limiti di riferimento per le concentrazioni di PM₁₀ e PM_{2.5} nell'aria in Italia e in Europa (D.Lgs. 155/2010).

	Valore massimo annuale (µg m ⁻³)	Valore massimo giornaliero (µg m ⁻³)	Numero di superamenti consentiti in un anno
PM ₁₀	40	50	35
PM _{2.5}	25	--	--

Sia i limiti annuali che giornalieri risultano spesso violati nelle grandi città in Italia, specialmente al nord, come anche in larga parte d'Europa. Nel 2013 la commissione europea ha adottato nuovi obiettivi strategici con una revisione della direttiva sui limiti nazionali di emissione (direttiva 2016/2284/UE), con limiti nazionali più severi, che dovrebbero portare entro il 2030 alla riduzione del 50% delle morti premature causate ogni anno dall'inquinamento atmosferico.

1.2. Ossidi di azoto (NO_x)

Gli ossidi di azoto (NO_x) sono inquinanti primari che comprendono il monossido (NO) e il biossido di azoto (NO₂) e derivano prevalentemente da processi di combustione di sostanze contenenti azoto (autoveicoli, attività industriali e impianti di riscaldamento domestico) ma anche da processi naturali (scariche temporalesche e prodotti dell'attività microbica). Nuociono alla salute in quanto formano particolato secondario. Le sorgenti di NO_x sono concentrate soprattutto nelle aree industrializzate e densamente popolate dove la presenza di agglomerati urbani e industriali incide fortemente sullo stato di inquinamento dell'aria. I NO_x sono,

inoltre, uno dei principali elementi responsabili dell'aumento dei livelli di smog fotochimico. Infatti, combinandosi con i composti organici volatili (COV) in presenza di un forte irraggiamento solare portano alla formazione di ozono (O₃) troposferico.

A tutela della salute umana il limite che l'organizzazione mondiale della sanità (OMS) suggerisce di non superare è di 40 µg m⁻³, come media annuale, e di 200 µg m⁻³, come concentrazione media oraria. L'NO₂, in particolar modo, è tra i vari ossidi di azoto quello più pericoloso per l'uomo in quanto può indurre problemi all'apparato cardiovascolare. Inoltre, gli NO_x possono giungere facilmente agli alveoli polmonari e originare acido nitroso e nitrico, diminuendo drasticamente le difese polmonari con conseguente aumento del rischio di infezioni alle vie respiratorie.

1.3. Ozono (O₃)

L'ozono (O₃) è una molecola composta da tre atomi di ossigeno ed è un componente naturale dell'atmosfera. Nella stratosfera (O₃ stratosferico) ha la funzione di assorbire i raggi ultravioletti provenienti dal sole, nella troposfera (O₃ troposferico) è uno dei principali componenti dello smog prodotto dalle attività antropiche nelle grandi città. E' prodotto da processi fotochimici che coinvolgono gli ossidi di azoto (NO_x) e i composti organici volatili (COV), pertanto è considerato un inquinante secondario che si genera soprattutto nei mesi estivi e nelle ore diurne in concomitanza di un intenso irraggiamento solare. Diversamente dall'O₃ stratosferico, quello troposferico può provocare grossi disturbi alla salute umana, oltre che danneggiare le piante

(influenzandone la fotosintesi e la crescita). L'O₃ provoca vari tipi di patologie polmonari. I valori limite per le concentrazioni di O₃ nell'aria sono riportati in Tabella 2.

Tabella 2. Limiti di riferimento per le concentrazioni di ozono in Italia (D.Lgs. 155/2010).

	Media massima oraria	Media giornaliera su 8 h	Numero di superamenti consentiti in un anno
O ₃ [$\mu\text{g m}^{-3}$]	180	120	25

A causa dei cambiamenti globali in atto e del crescente aumento della quantità di NO_x e di gas serra in atmosfera, la concentrazione di O₃ troposferico sta subendo un rapido incremento che, secondo alcuni studi, arriverà al 50% della concentrazione attuale entro il 2100. Le aree del bacino Mediterraneo sono particolarmente esposte all'incremento della concentrazione di O₃ poiché caratterizzate da un'intensa radiazione luminosa per periodi prolungati di tempo durante l'anno. Il futuro incremento della concentrazione di O₃ troposferico potrà causare perdite rilevanti di produttività nelle colture agrarie e forestali (UNECE 2004) oltre che aggravare gli effetti derivanti dai cambiamenti climatici.

2. Il ruolo dell'anidride carbonica (CO₂)

L'anidride carbonica (CO₂) è una componente fondamentale dell'atmosfera terrestre in quanto trattiene le radiazioni solari e partecipa al ciclo del carbonio (scambio di carbonio tra gli esseri viventi e l'ambiente). La CO₂ è però anche uno dei principali gas serra, aumentato in atmosfera a partire dalla rivoluzione industriale a causa

delle attività antropiche, provocando il surriscaldamento globale e i cambiamenti climatici. Nell'era preindustriale la concentrazione di questo gas era di 280 ppm mentre nel 2018 ha raggiunto un valore di 405.5 ppm (WMO 2018).

La combustione di combustibili fossili, quali carbone e petrolio, e la deforestazione sono la causa principale dell'aumento di CO₂ in atmosfera. A livello mondiale già da molti anni si stanno adottando delle politiche per contenere le emissioni delle sostanze considerate alteranti i meccanismi naturali del clima. Dapprima con il Protocollo di Kyoto nel 1997, poi con la conferenza sul clima di Parigi (COP21) nel dicembre 2015, i governi hanno concordato di limitare le emissioni medie di inquinanti per mantenere l'aumento medio della temperatura mondiale al di sotto dei 2°C e procedere a rapide riduzioni in conformità con le soluzioni scientifiche più avanzate disponibili.

3. Le piante come filtro dell'aria

3.1. Assorbimento di CO₂ e intercettazione di inquinanti

Oggi circa 3,4 miliardi di persone (50% della popolazione mondiale) vivono nelle città e secondo una stima aumenteranno fino a 6,3 miliardi entro il 2050 (World Population Prospects: The 2017 Revision. New York: United Nations). Uno studio recente ha dimostrato che il tasso di mortalità dovuto a patologie cardiovascolari correlate all'inquinamento si riduce in aree urbane con maggiore presenza di verde residenziale (Gascon et al., 2016).



Figura 3. Bosco verticale a Milano (Baraldi R.).

Per questi motivi, la presenza di aree verdi urbane è importante per la mitigazione climatica e per il miglioramento della qualità dell'aria come contemplato dal Protocollo di Kyoto e dall'accordo di Parigi COP21. Le piante infatti fungono da veri e propri polmoni verdi e da filtri purificatori. Infatti, attraverso il processo fotosintetico sequestrano e accumulano la CO_2 atmosferica nei tessuti vegetali (Figura 4). Si stima che un albero di dimensioni medie riesca ad accumulare durante il suo ciclo vitale circa 2-6 tonnellate di CO_2 (www.lifegaia.eu).

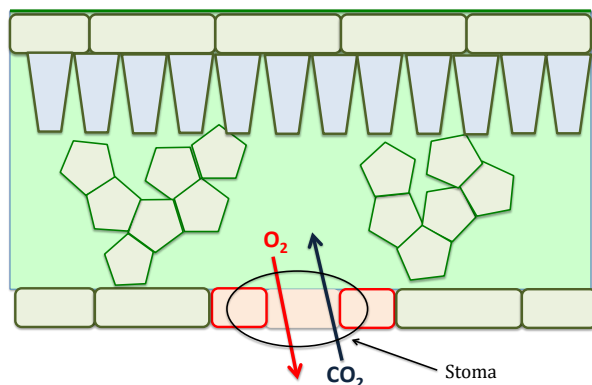


Figura 4. Rappresentazione schematica dell'assorbimento di CO_2 attraverso gli stomi e rilascio di O_2 durante il processo di fotosintesi (Carriero G.).

Inoltre, la vegetazione riduce l'inquinamento urbano tramite l'assorbimento e la

successiva metabolizzazione degli inquinanti. Gli inquinanti gassosi vengono assorbiti attraverso gli stomi presenti sulla superficie fogliare oppure possono diffondere attraverso la cuticola e le cere (adsorbimento). Le sostanze idrosolubili come l' O_3 , gli NO_x , e l'anidride solforosa (SO_2), vengono assorbite tramite gli stomi e seguono la via di diffusione della CO_2 (Figura 4). Ad una maggiore densità stomatica generalmente corrisponde una maggiore capacità di assorbimento. Le sostanze lipofile (e.g. idrocarburi aromatici come benzene e toluene) penetrano nella foglia interagendo con lo strato epidermico ed in particolar modo con la superficie cerosa (costituita in prevalenza da alcani, alcoli, aldeidi, chetoni, acidi ed esteri) che funge da trappola per gli inquinanti. In questo caso l'adsorbimento degli inquinanti da parte delle foglie dipende dalla loro idrosolubilità e dalla loro capacità di penetrare la membrana cellulare (Jouraeva et al., 2002). Una volta avvenuto l'assorbimento degli inquinanti, i tessuti vegetali sono in grado di inattivarli a livello della cute o negli spazi intercellulari oppure possono metabolizzarli (Dzierzanowski et al., 2011). Nel caso degli idrocarburi aromatici (benzene, toluene) la loro trasformazione consiste nell'ossidazione, con conseguente incorporazione degli atomi di carbonio in varie frazioni di composti organici (acidi organici non volatili e più limitatamente aminoacidi), parte dei quali sono emessi come CO_2 . La trasformazione è strettamente dipendente dall'attività del sistema enzimatico coinvolto e quindi la detossificazione di questi idrocarburi è specifica per ogni specie vegetale. L'effetto

della rimozione di inquinanti atmosferici da parte delle piante è stato dimostrato in diversi studi (Nowak et al., 2006; Sæbø et al., 2012). Le piante sono inoltre in grado di trattenere le polveri attraverso i peli e le cere epicuticolari presenti sulla superficie delle foglie o attraverso la rugosità della pagina fogliare (EL-Khatib et al., 2011) (Figura 5). I processi di deposizione delle polveri dipendono dalle caratteristiche morfologiche della pianta ma anche dalle condizioni meteorologiche come la temperatura, l'umidità e la radiazione solare. Una volta avvenuta la deposizione sulla superficie fogliare, le particelle inquinanti possono rimanere sulle foglie trattenute dai peli fogliari o dalle cere epicuticolari fino a quando le piogge non le dilavano a terra; oppure possono andare incontro ad assorbimento e penetrazione nella struttura fogliare, per essere poi inglobate nel metabolismo della pianta. Ogni specie vegetale è caratterizzata da una diversa capacità di cattura del particolato che dipende da una diversa morfologia. Le specie con le foglie rugose, stomi infossati o sporgenti, ricoperte di peli e di cere sono più efficienti nel catturare gli inquinanti rispetto alle specie con foglie glabre o prive di cere (EL-Khatib et al., 2011; Baraldi et al., 2010; 2018). Anche l'età e le dimensioni delle piante possono influire sulla capacità di rimozione del particolato: piante più giovani, caratterizzate da una più alta densità fogliare, e quindi da una maggiore superficie, sono più efficaci di quelle adulte nel rimuovere gli inquinanti. Inoltre l'efficacia della rimozione delle polveri risulta maggiore nelle conifere per via della complessità della loro chioma, che favorisce fenomeni di micro turbolenza dell'aria e una maggiore efficienza

nell'assorbire le particelle. Le specie sempreverdi sono inoltre più efficaci per la rimozione degli inquinanti per la presenza di foglie anche nel periodo invernale, quando l'inquinamento da polveri è più alto. Anche gli arbusti sono in grado di assorbire gli inquinanti atmosferici prodotti dal traffico. Il loro apparato fogliare, che parte dal suolo e si sviluppa su una superficie verticale, la disposizione delle foglie e la vicinanza alle fonti di produzione di gas e particolato, costituiscono la forza d'urto delle barriere verdi e garantiscono una significativa riduzione dell'esposizione diretta delle persone alle polveri sottili (Abhijith et al 2017).

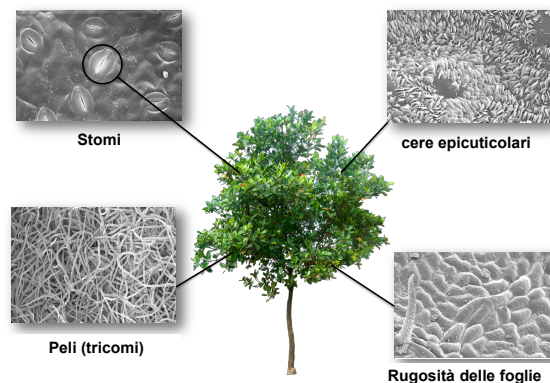


Figura 5. Caratteristiche micromorfologiche a livello delle foglie (Carriero G.).

3.2. Riduzione delle isole di calore

L'isola di calore è il fenomeno che determina un microclima più caldo all'interno delle aree urbane cittadine ed è dovuto al surriscaldamento delle superfici urbane (strade, pareti degli edifici), alle emissioni degli autoveicoli, degli impianti industriali e dei sistemi di riscaldamento e di aria condizionata ad uso domestico. L'effetto

isola di calore amplifica il surriscaldamento globale su scala locale e favorisce la formazione di inquinanti secondari, specialmente nel periodo estivo quando la radiazione solare è più intensa.

Le piante hanno la capacità di abbassare le temperature e sono quindi un valido alleato contro il surriscaldamento globale. Infatti gli alberi oltre ad ombreggiare creano un ambiente fresco grazie al processo di evapotraspirazione, riducendo la temperatura e di conseguenza la formazione di inquinanti secondari.



Figura 6. Il verde nel contesto urbano.

4. Emissione di composti organici volatili (COV) e formazione di ozono

I composti organici volatili (COV) comprendono diversi idrocarburi (aldeidi, alcoli, eteri, esteri etc.) prodotti sia in natura dalle piante che dalle attività antropiche (traffico veicolare, industrie, solventi derivati dal petrolio e combustioni). Tra i composti organici volatili antropogenici vi sono il benzene, il toluene, il metano, l'etano etc. I composti organici volatili emessi dalle piante comprendono invece principalmente i terpeni. I COV emessi dalle piante vengono definiti biogenici, sono prodotti e contenuti all'interno delle foglie, dei fiori o dei frutti, e

comprendono diverse famiglie chimiche tra cui terpeni, alcani, alcheni, chetoni, aldeidi, alcoli, eteri, esteri, e acidi carbossilici (Kesselmeier e Staudt, 1999). I terpeni rilasciati dalle piante svolgono importantissimi ruoli ecofisiologici, necessari alla sopravvivenza delle piante stesse. I COV, che in alcuni casi sono percepibili anche dall'uomo come aromi, sono soprattutto avvertiti dagli insetti, e attraggono gli impollinatori o agiscono come repellenti nei confronti di insetti dannosi. I COV sono molto importanti anche nella protezione delle piante contro altri agenti biotici (funghi) e abiotici (stress ambientali). Inoltre, alcuni terpeni hanno una funzione allelopatica che può limitare la germinazione dei semi o lo sviluppo di altre piante nelle vicinanze, contribuendo alla determinazione e strutturazione delle comunità vegetali. Le piante possono emettere COV anche per avvertire altre piante vicine di un pericolo imminente, innescando specifiche risposte difensive (Ueda et al., 2012).

Ma qual è l'importanza dei COV in ambiente urbano? La loro importanza deriva dalla loro reattività in atmosfera che è specifica di ogni composto e che può portare alla produzione di O_3 in funzione del rapporto COV/NO_x . I composti maggiormente coinvolti nella formazione di ozono sono i terpeni (Benjamin e Winer, 1998). Tra questi, l'isoprene è il composto più reattivo e rappresenta inoltre il principale componente delle emissioni biogeniche (Velikova e Loreto, 2005).

Negli ambienti naturali e nelle aree rurali caratterizzate da basse concentrazioni di inquinanti antropogenici (NO_x), la produzione di O_3 è limitata da un elevato rapporto COV/NO_x (> 15) e i COV stessi, reagendo

con l'O₃, possono contribuire alla sua diminuzione in atmosfera (si dice che i COV puliscono l'atmosfera). In ambienti urbani o suburbani o in presenza di industrie dove le sorgenti di NO_x sono elevate, i COV giocano un ruolo strategico nella formazione di O₃ (Figura 7): basse o nulle emissioni di COV biogenici determinano un basso rapporto COV/NO_x (<4) limitando la produzione di O₃; al contrario, alte emissioni di COV spostano il rapporto COV/NO_x verso un valore ottimale per la formazione di O₃ (15>COV/NO_x>4), valore che si può riscontrare anche nelle zone di transizione come le aree peri-urbane (Calfapietra et al., 2013).

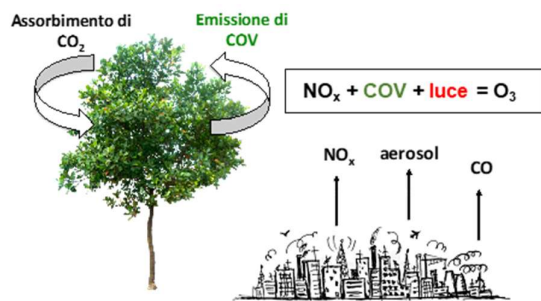


Figura 7. Il ruolo delle piante nella formazione di O₃ in presenza di NO_x e luce in ambiente urbano (Carriero G.).

Per questo si evince come sia erronea l'opinione comune che elevati livelli di O₃ siano necessariamente presenti in aree urbane fortemente inquinate, perché è proprio la circolazione delle masse d'aria che, trasportando i diversi composti antropogenici e biogenici, può significativamente influenzare i processi fotochimici che sottendono alla formazione di O₃. Per meglio stimare il contributo delle piante alla formazione di O₃ è stata quindi

sviluppata un'equazione per il calcolo del Potenziale di Formazione di Ozono (OFP) per ogni specie vegetale (Benjamin e Winer, 1998), che tiene conto del tasso di emissione specie-specifico e della tipologia di COV emessi permettendo così di individuare quelle specie che, avendo una bassa emissione e quindi un basso OFP, risultano preferibili in ambiente fortemente inquinato. Esistono vari metodi di misura dei tassi di emissione e dei flussi di COV sia a livello di singola pianta che a livello di ecosistema. A livello di singola pianta, le emissioni vengono misurate attraverso degli appositi strumenti composti da camere per la misura degli scambi gassosi (Portable photosynthesis systems) nelle quali vengono inseriti un ramo (branch-enclosure) o una foglia (leaf cuvette). A livello di ecosistema si utilizzano tecniche come quella dei palloni frenati (tethered balloon). I COV vengono campionati su fasi adsorbenti e successivamente analizzati con tecniche gas cromatografiche e di spettrometria di massa (TD-GC-MS). Un altro metodo per la misura delle emissioni è la spettrometria di massa a trasferimento protonico (PTR-MS) che consente di ottenere misure in tempo reale.

5. Scelta delle piante per la mitigazione in ambiente urbano

Per affrontare la sfida dei cambiamenti climatici, dell'inquinamento atmosferico e degli eventi climatici estremi, è necessario costruire città resilienti, cioè capaci di adattarsi al cambiamento. E' quindi importante valutare bene la scelta delle piante da utilizzare sulla base delle loro caratteristiche agronomiche e morfo-fisiologiche.



Figura 8. Viale urbano alberato (Carriero G.).

5.1. Indagini micro-morfologiche e mitigazione di inquinanti e CO₂

L'Istituto di Biometeorologia del Consiglio Nazionale delle ricerche di Bologna (IBIMET-CNR), conduce ricerche relative alla selezione e alla valutazione di piante da utilizzare per affrontare problemi legati all'inquinamento. Si è occupato del progetto LIFE GAIA (Green area Inner City Agreement, www.lifegaia.eu) di forestazione urbana per il contrasto dei cambiamenti climatici tramite la messa a dimora di alberi sul territorio comunale di Bologna attraverso una partnership pubblico-privata, e del progetto di ricerca nazionale PRIN SENSE sull'utilizzo di piante erbacee sugli edifici urbani (tetti verdi) per la mitigazione ambientale (Baraldi et al., 2018). In entrambi gli studi, IBIMET ha effettuato indagini micro-morfologiche ed ecofisiologiche e si è avvalso sia di un modello che di algoritmi per stimare il sequestro e l'immagazzinamento di CO₂, il potenziale di assorbimento di O₃ e la

cattura del particolato. Il modello matematico utilizzato è i-Tree Eco, realizzato dal Servizio Foreste del Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti d'America (Nowak e Crane, 2000). E' un modello progettato essenzialmente per essere utilizzato nei paesi del Nord America, Canada, Australia e Gran Bretagna, ma il database può essere implementato con informazioni relative alla propria area di studio, alle specie presenti, alle precipitazioni e all'inquinamento atmosferico locali. Tramite i-Tree il gruppo di ricerca è stato in grado di stimare la quantità di carbonio accumulata nella biomassa legnosa. Il calcolo è stato eseguito combinando i dati strutturali della vegetazione con quelli delle condizioni meteo permettendo di valutare gli effetti del verde urbano sulla rimozione di CO₂. Attraverso lo stesso modello e l'applicazione di specifici algoritmi il gruppo di ricerca ha inoltre stimato l'assorbimento di O₃ e la rimozione delle PM10. Il gruppo IBIMET ha in questo modo stimato la compensazione annuale degli inquinanti operata dai grandi boschi urbani presenti in Emilia Romagna. Le stime effettuate su un bosco di 40 ettari hanno ad esempio evidenziato come sia in grado di sequestrare annualmente circa 170 tonnellate di CO₂, compensando le emissioni di 100 auto di media cilindrata, oltre che di rimuovere circa 200 kg di PM10, compensando le emissioni di polveri prodotte da 3900 auto. Per quanto riguarda invece le indagini micro-morfologiche, il gruppo di ricerca IBIMET si è occupato di stimare la capacità delle piante di rimuovere gli inquinanti dall'atmosfera. Attraverso il microscopio elettronico a scansione ha analizzato la micro-morfologia fogliare ed in

particolare modo i tricomi (peli), gli stomi (aperture che permettono gli scambi gassosi tra l'atmosfera e la pianta) e le cere. Tra le latifoglie analizzate le specie con maggiore capacità di catturare polveri sono *Malus domestica*, *Robinia pseudoacacia*, *Cercis siliquatum*, *Gingko biloba*, *Parrotia persica*, *Robinia pseudoacacia* e *Tilia platyphyllos*; tra le specie erbacee *Gaura lindheimeri* e *Salvia nemorosa*, sono risultate le più efficienti per l'abbondante presenza di peli e/o cere sulle foglie (Figura 9-11). Nelle tabelle 3-4-5 viene riportato l'elenco di alcune specie arboree, arbustive ed erbacee che sono state analizzate dai ricercatori dell'IBIMET e che sono state classificate sulla base della loro capacità di migliorare la qualità dell'aria. I risultati del sequestro e dell'immagazzinamento di CO₂ sono stati ottenuti con il modello i-Tree Eco mentre quelli relativi alla rimozione di PM₁₀ e O₃ sono stati calcolati con algoritmi per il calcolo della deposizione degli inquinanti. I risultati di questo studio dovranno essere in futuro implementati per acquisire ulteriori informazioni da utilizzare per l'analisi dell'impatto ambientale anche per le specie mancanti e idonee per le coperture a verde.

5.2 Allergenicità delle piante

Nella progettazione del verde urbano non si può prescindere dal considerare un altro aspetto fondamentale che alcune specie vegetali possono determinare e cioè l'allergenicità. Infatti, in questi ultimi decenni si è osservato un incremento delle sensibilizzazioni ai pollini responsabili delle tipiche manifestazioni cliniche stagionali. I cambiamenti climatici insieme al peggioramento della qualità dell'aria hanno

sicuramente un ruolo in questo fenomeno: infatti i cambiamenti climatici possono aver determinato il prolungamento e la severità della stagione pollinica mentre l'inquinamento atmosferico, provocando danni all'apparato respiratorio, ha reso la popolazione più sensibile alle pollinosi con conseguente aggravamento dei sintomi delle malattie respiratorie, quali la rinite, l'asma bronchiale allergica e le bronco pneumopatie croniche (Prof. Ricci Progetto "Città Allergy Safe"- comunicazione personale). I dati epidemiologici attuali fanno prospettare che, entro il 2025, metà dell'intera popolazione nell'Unione Europea (UE) sarà affetta da queste malattie croniche.

Le politiche di prevenzione delle patologie allergiche respiratorie nelle città devono necessariamente basarsi sulla riduzione del tasso dei principali inquinanti atmosferici ma anche sul contenimento della carica di pollini allergizzanti. Per la progettazione di un "verde ipoallergenico" occorre quindi tenere conto delle proprietà allergeniche delle specie vegetali. Generalmente, le piante allergeniche con impollinazione *anemofila* (impollinazione che utilizza come mezzo di dispersione il vento) creano maggiori problemi di allergenicità dato l'elevato numero di granuli pollinici prodotti. Meglio quindi prediligere quelle piante che, per loro natura, presentano una diffusione pollinica *entomofila*, affidata cioè agli insetti e con pollini a basso o nullo potere allergenico. Ciò non significa che si debba procedere ad abbattimenti di piante in aree verdi già esistenti, piuttosto è necessario effettuare scelte oculate nella sostituzione di fine vita di specie esistenti e soprattutto nella progettazione di nuove aree verdi. Ad

esempio, si dovrebbe evitare di mettere a dimora specie arboree ad alto rischio di reazioni allergiche come il cipresso, l'olivo, e le betulacee tra cui l'ontano, la betulla, il nocciolo e il carpino, mentre sarebbe necessario escludere tra gli arbusti il viburno tino e la ginestra, oltre ad alcune graminacee e composite. Per informazioni maggiori e più specifiche si rimanda a Frenguelli (2005) e Frenguelli e Passaleva (2003). In ambienti urbani è quindi consigliabile: (1) favorire la presenza di piante a bassa allergenicità come pruni, ippocastani, robinie, abeti, pini, meli, robinie, sambuchi, tamerici, olmi, ginkgo biloba, magnolie, corbezzoli, bossi e noci; (2) per le specie dioiche, cioè con organi riproduttivi maschili e femminili su piante distinte, utilizzare: a) piante femmine, poiché gli individui maschili liberano in primavera abbondante polline che presenta un certo grado di allergenicità, come nel caso degli aceri; b) piante maschili che liberino in inverno poco polline, raramente allergico, come ad esempio il *Populus* spp., (Frenguelli e Passaleva, 2003).

Molta attenzione va anche posta nella scelta delle piante erbacee, evitando le graminacee (*Cynodon dactylon*, *Lolium perenne*, *Phleum pratense*, *Holcus lanatus*, *Anthoxanthum odoratum*, *Ammofila arenaria*), le urticacee (*Parietaria officinalis*, *Urtica dioica*), e le composite (*Ambrosia artemisiifolia*, *Artemisia vulgaris*, *Taraxacum officinale*, *Chrysanthemum leucanthemum*) responsabili della maggior parte dei casi di allergia per la presenza di pollini ad alto potere allergenico (Prof. Ricci "Città Allergy Safe"- comunicazione personale).

Sul sito dell'Associazione Italiana di Aerobiologia (www.ilpolline.it) e dell'ARPAE

(www.arpae.it/index.asp?idlivello=117) sono disponibile i monitoraggi degli allergeni aerodiffusi che misurano la concentrazione in atmosfera dei principali pollini di interesse allergologico.

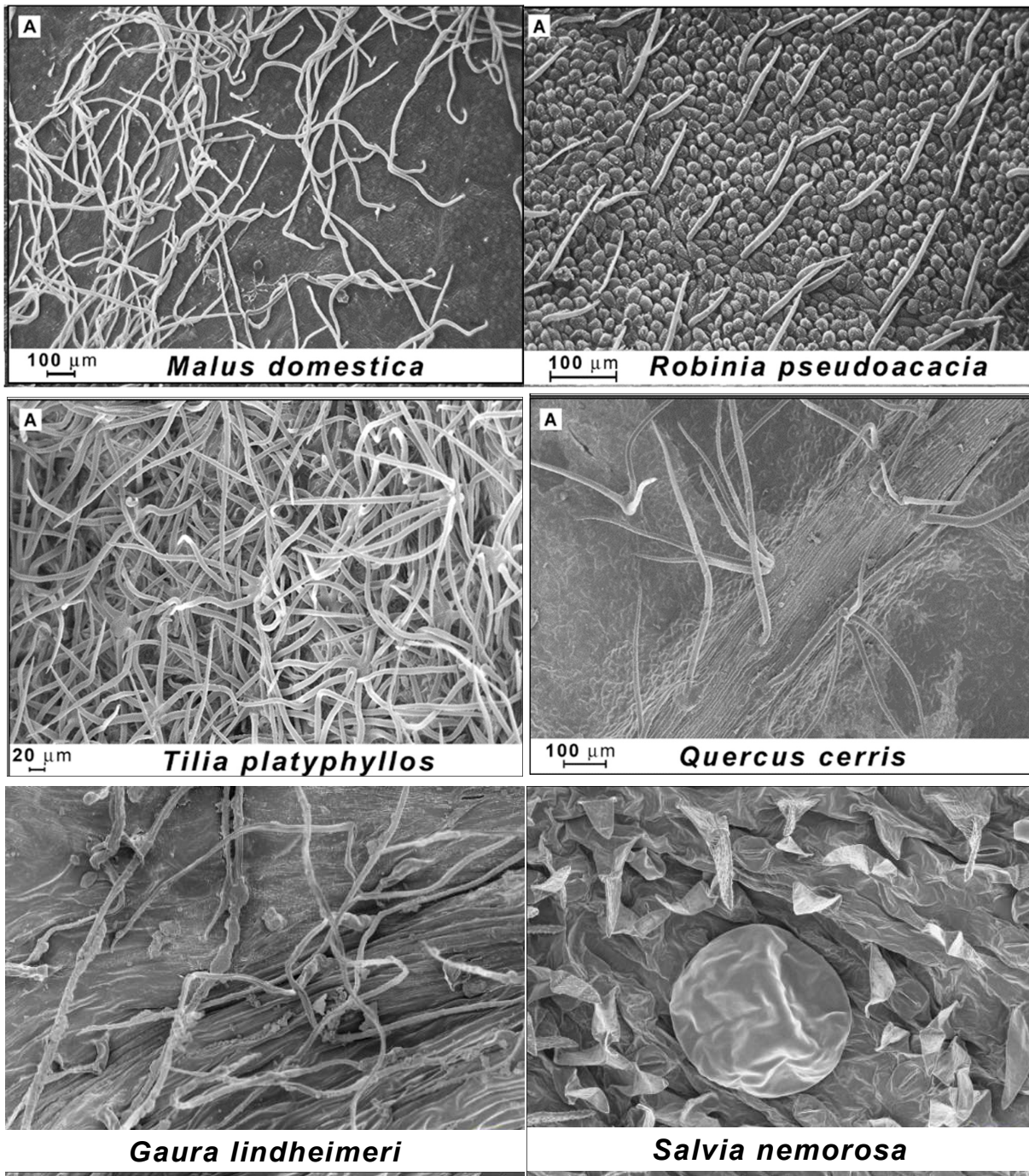


Figura 9. Immagini al microscopio elettronico dei tricomi presenti sulla superficie fogliare di alcune piante arboree (A) ed erbacee analizzate.

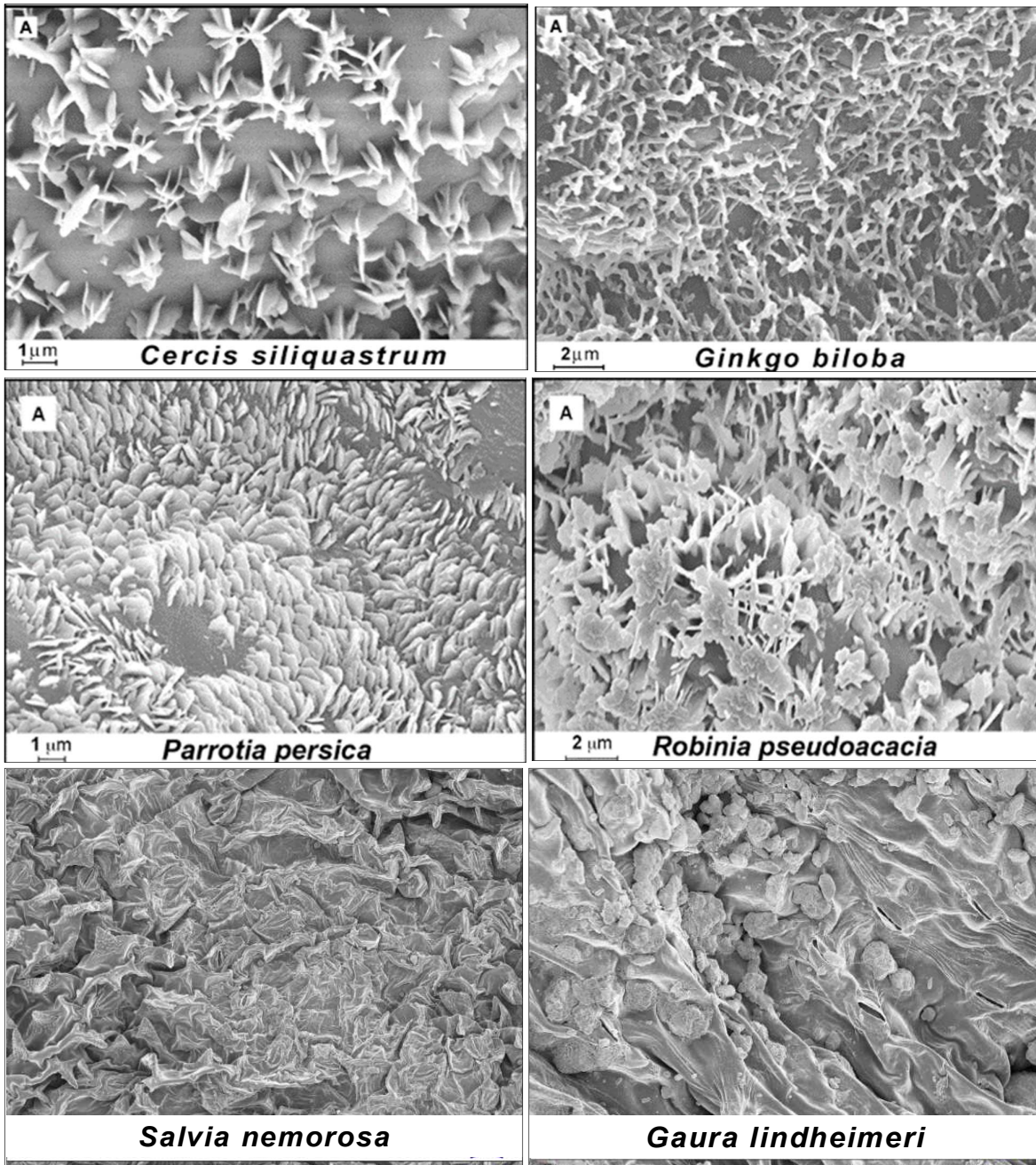


Figura 10. Immagini al microscopio elettronico delle cere presenti sulla superficie fogliare delle piante arboree (A) ed erbacee analizzate.

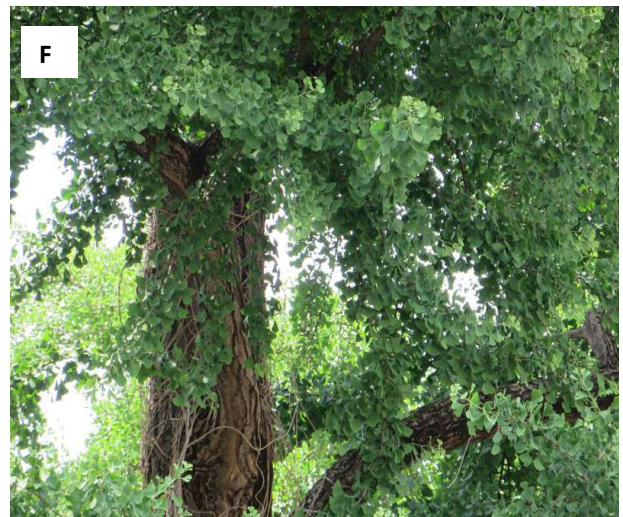
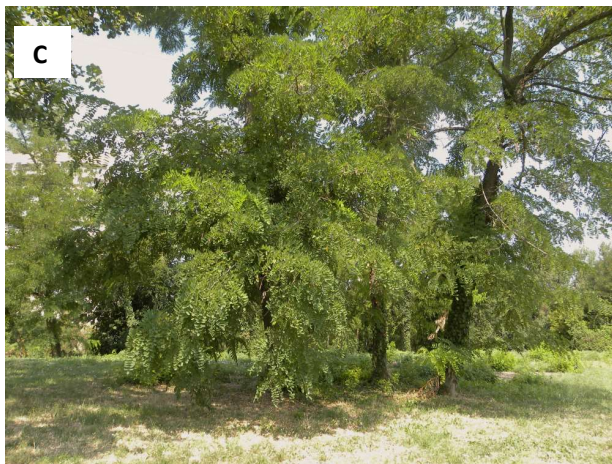


Figura 11. Foto di alcune delle piante arboree analizzate dall'IBIMET: A) *Quercus*; (B) *Tilia*; (C) *Robinia*; (D) *Cercis*; (E) *Prunus*; (F) *Ginkgo*. (Foto Carriero G.).

Classi di valori per CO₂, PM₁₀ e O₃ (tabelle 3-5)

	CO ₂ accumulata	CO ₂ sequestrata	PM ₁₀ rimosso	O ₃ assorbito
	kg pianta ⁻¹	kg pianta ⁻¹ anno ⁻¹	g pianta ⁻¹ anno ⁻¹	g pianta ⁻¹ anno ⁻¹
++++	800-700	>70	>100	>130
+++	700-600	60-70	70-90	110-130
++	600-500	40-50	40-70	90-110
+	50-40	<10<15	<10<20	50-70

Classi di valori per la formazione di ozono:

- ooo >10 (alto)
- oo <1<10 (medio)
- o <1 (basso)

Tabella 3. Elenco delle specie arboree ed arbustive analizzate e loro capacità di mitigazione ambientale (* = Piante ad elevata allergenicità).

Specie	nome comune	CO ₂ accumulata	CO ₂ sequestrata	PM ₁₀ rimosso	O ₃ assorbito	formazione potenziale di O ₃
* <i>Acer campestre</i>	acero campestre	++++	+++	++++	++++	-
<i>Acer platanoides</i>	acero riccio o platanoide	++++	+++	++++	++++	-
* <i>Alnus glutinosa</i>	ontano nero	++++	+++	++	+++	-
* <i>Carpinus betulus</i>	carpino bianco	+++	+++	++	++++	-
<i>Catalpa bungei</i>	catalpa	+++	+++	++	+++	-
<i>Celtis australis</i>	bagolaro	+++	+++	++++	++++	0
<i>Cercis siliquastrum</i>	albero di giuda	++++	+++	++	+++	000
<i>Crataegus monogyna</i>	biancospino	+++	+++	+	+	-
* <i>Fraxinus excelsior</i>	frassino maggiore	+++	++	+++	+++	-
<i>Fraxinus ornus</i>	orniello	+++	++	+++	+++	-
<i>Ginkgo biloba</i>	gingko	++++	+++	++	++	-
<i>Koelreuteria paniculata</i>	koelreuteria	++++	+++	+++	++++	-
<i>Liquidambar styraciflua</i>	liquidambar	+++	++	+++	++	00
<i>Liriodendron tulipifera</i>	tulipifero	++	++	++++	+++	00
<i>Malus domestica</i>	melo	+++	+++	++	++	-
<i>Morus alba</i>	gelso bianco	+++	+++	++	+++	-
<i>Prunus cerasifera</i>	mirabolano	++++	+++	+++	++	-
<i>Parrotia persica</i>	parrotia	++++	++++	++	++	-
* <i>Quercus cerris</i>	cerro	++++	++++	++	+++	-
<i>Robinia pseudoacacia</i>	robinia	++++	+++	+++	+++	-
<i>Sambucus nigra</i>	sambuco	+++	+++	+	+	-
<i>Sophora japonica</i>	sofora	++++	+++	++	+++	000
<i>Tilia cordata</i>	tiglio selvatico	++	++	+++	++	0
<i>Tilia platyphyllos</i>	tiglio nostrano	++	++	+++	+++	00
<i>Ulmus minor</i>	olmo campestre	++	++	+++	+++	-
<i>Laurus nobilis</i>	alloro	+	+	+	+	-
* <i>Ligustrum japonicum</i>	ligustro giapponese	+	+	+	+	-
<i>Photinia x fraseri</i>	photinia	+	+	+	+	-
<i>Viburnum tinus</i>	viburnum	+	+	+	+	-

Tabella 4. Risultati dell'analisi micro-morfologica delle piante arboree ed arbustive urbane analizzate (* = Piante ad elevata allergenicità).

Specie	tricomi	cere
<i>*Acer campestre</i>	presenti	-
<i>Acer platanoides</i>	scarsi	abbondanti
<i>*Alnus glutinosa</i>	-	presenti
<i>*Carpinus betulus</i>	presenti	-
<i>Catalpa bungei</i>	presenti	-
<i>Celtis australis</i>	presenti	presenti
<i>Cercis siliquastrum</i>	-	abbondanti
<i>Crataegus monogyna</i>	presenti	presenti
<i>*Fraxinus excelsior</i>	scarsi	-
<i>Fraxinus ornus</i>	presenti	presenti
<i>Ginkgo biloba</i>	-	presenti
<i>Koelreuteria paniculata</i>	presenti	presenti
<i>Liquidambar styraciflua</i>	scarsi	-
<i>Liriodendron tulipifera</i>	-	abbondanti
<i>Malus domestica</i>	abbondanti	-
<i>Morus alba</i>	presenti	-
<i>Prunus cerasifera</i>	presenti	-
<i>Parrotia persica</i>	presenti	presenti
<i>*Quercus cerris</i>	presenti	presenti
<i>Robinia pseudoacacia</i>	presenti	abbondanti
<i>Sambucus nigra</i>	presenti	-
<i>Sophora japonica</i>	presenti	presenti
<i>Tilia cordata</i>	-	abbondanti
<i>Tilia platyphyllos</i>	abbondanti	-
<i>Ulmus minor</i>	presenti	presenti
<i>Laurus nobilis</i>	-	abbondanti
<i>*Ligustrum japonicum</i>	scarsi	abbondanti
<i>Photinia x fraseri</i>	-	presenti
<i>Viburnum tinus</i>	-	presenti

Tabella 5. Elenco delle specie erbacee analizzate, analisi micro-morfologica e loro capacità di mitigazione ambientale.

specie	nome comune	CO ₂ assimilata	PM ₁₀ rimosso	formazione potenziale di O ₃	tricomi	cere
<i>Achillea millefolium</i>	achillea	+++	+	-	presenti	presenti
<i>Campanula persicifolia</i>	campanula	++	+	-	-	-
<i>Erigeron karvinskianus</i>	cespica karvinskiana	+++	+	-	presenti	presenti
<i>Filipendula purpurea</i>	filipendula	+	+	-	presenti	presenti
<i>Filipendula vulgaris kaome</i>	filipendula	++	++	-	abbondanti	presenti
<i>Gaura lindehimeri</i>	gaura	+++	+++	-	abbondanti	abbondanti
<i>Hypericum moserianum</i>	iperico	+	+++	o	-	abbondanti
<i>Lonicera pileata</i>	lonicera	++	+	-	presenti	presenti
<i>Origanum vulgare</i>	origano	++	++	-	presenti	-
<i>Rudbeckia sullivantii</i>	rudbeckia	+++	++	-	presenti	presenti
<i>Salvia nemorosa</i>	salvia	+++	++	-	abbondanti	-
<i>Satureja repandens</i>	santoreggia	+	+++	-	presenti	-
<i>Sedum spectabile</i>	sedum	+	++	-	-	abbondanti
<i>Solidago praecox</i>	solidago	++	+	-	presenti	presenti
<i>Veronica longifolia</i>	veronica	+++	++	-	presenti	presenti

6. Dalla scienza all'applicazione: proposta di progetto per la mitigazione ambientale nel comparto industriale di Bargellino

La pianificazione dello sviluppo degli ambiti urbani deve dare uguale valenza alla progettazione degli spazi costruiti e di quelli da adibire al verde. Gli interventi strategici di mitigazione climatica per il miglioramento della vivibilità locale devono prevedere una pianificazione territoriale del verde che tenga in considerazione non solo la scelta delle piante che possano svolgere più efficacemente il loro ruolo di mitigazione ambientale e sopravvivere nelle aree definite, ma anche la corretta localizzazione delle aree da destinare a verde pubblico rispetto alle sorgenti emissive e alle condizioni microclimatiche del territorio.

Il comparto industriale Bargellino in provincia di Bologna si sviluppa su un'area caratterizzata da diverse fonti di emissione di inquinanti atmosferici, essendo situato all'interno di una zona con grande attività industriale, nelle vicinanze di una strada provinciale ad alto traffico e dell'aeroporto Guglielmo Marconi di Bologna, principale scalo della regione. Il Comitato per la sicurezza e lo sviluppo del Bargellino, storicamente impegnato nella riqualificazione del comparto, ha in atto una collaborazione con l'IBIMET-CNR di Bologna per individuare soluzioni eco-sostenibili per il miglioramento dell'ambiente e della qualità della vita.

Da alcune misure effettuate con la centralina AirQuino, sviluppate da IBIMET-Firenze e descritte nell'azione A1 riportata di seguito, in prossimità di imprese del comparto industriale Bargellino situate in quattro zone diverse, si sono evidenziati valori di PM elevati rispetto ai limiti di riferimento definiti dalla normativa sugli indicatori della qualità dell'aria (D.Lgs.155/2010). I valori registrati sono tuttavia stati ottenuti da misure puntuali e non dalla media giornaliera come invece vengono espressi i limiti di riferimento, per cui per avere la situazione completa occorrono misure a lungo termine.

Il gruppo di ricerca IBIMET, sulla base della propria esperienza scientifica e applicativa, propone un progetto di forestazione attraverso l'applicazione della tecnica del fitorimedia, cioè l'utilizzo di specie vegetali per la mitigazione dell'aria e quindi per il miglioramento dell'ambiente e della qualità della vita.

Tale progetto si sviluppa in quattro differenti azioni di intervento (A1, A2, A3, A4):

- A1.** Acquisizione dei dati sulla qualità dell'aria e del microclima del territorio *ex-ante* funzionale alla verifica *ex-post* dell'effetto di fitorimedia dell'aria che la nuova proposta di forestazione periurbana provocherà sul comparto di intervento;
- A2.** Riqualificazione delle aree verdi già presenti e ampliamento della superficie destinata alla forestazione urbana e peri-urbana;
- A3.** Calcolo della stima del sequestro di CO₂ e degli inquinanti da parte della vegetazione;

A4. Coinvolgimento e sensibilizzazione dei cittadini, degli amministratori e altri portatori di interesse per la salvaguardia ambientale e la collaborazione nell'attività di monitoraggio.

A1. In questa prima azione si acquisiranno in prima analisi i dati di qualità dell'aria da stazioni *in-situ* dell' ARPAE (Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale dell'Emilia Romagna) o presso l'adiacente aeroporto. Inoltre, si utilizzerà un sistema di acquisizione di dati micrometeorologici e della qualità dell'aria attraverso l'installazione di un congruo numero di centraline AirQuino sviluppate dall'IBIMET-CNR di Firenze, basate su una piattaforma mobile integrata, realizzata con tecnologia a basso costo e open source Arduino (Figura 12). Queste stazioni, che non si vogliono sostituire a quelle ufficialmente riconosciute dell'ARPAE, permettono, attraverso il confronto dei dati con quelli misurati dalle centraline dell'ARPAE, di ampliare il sistema di monitoraggio ambientale con l'individuazione di eventuali "hot spot" anche temporanei. La loro installazione dovrà essere effettuata prima della messa a dimora delle piante per la verifica *ex-ante* della qualità dell'aria. Le stazioni verranno installate dal personale esperto dell'IBIMET-CNR in punti strategici e garantiranno il monitoraggio in tempo reale delle concentrazioni di inquinanti e di altri parametri funzionali nell'area di interesse. In seguito alla messa a dimora delle piante, altre centraline verranno installate anche all'interno della nuova area verde per la misura *ex-post* dello stato dell'aria. Per una più diretta e facile informazione al cittadino, tali centraline potranno essere dotate di un visualizzatore degli inquinanti funzionante come un "semaforo ambientale" che cambierà colore in relazione alle concentrazioni (dal verde al rosso). Le stazioni AirQuino monitoreranno i parametri ambientali, gli inquinanti (rumore, umidità, temperatura, PM2.5, PM10, CO, CO₂, O₃, NO₂, VOC) e gli indici di benessere (indice di calore). I dati verranno acquisiti con cadenza semi oraria e trasmessi in tempo reale al centro di controllo.

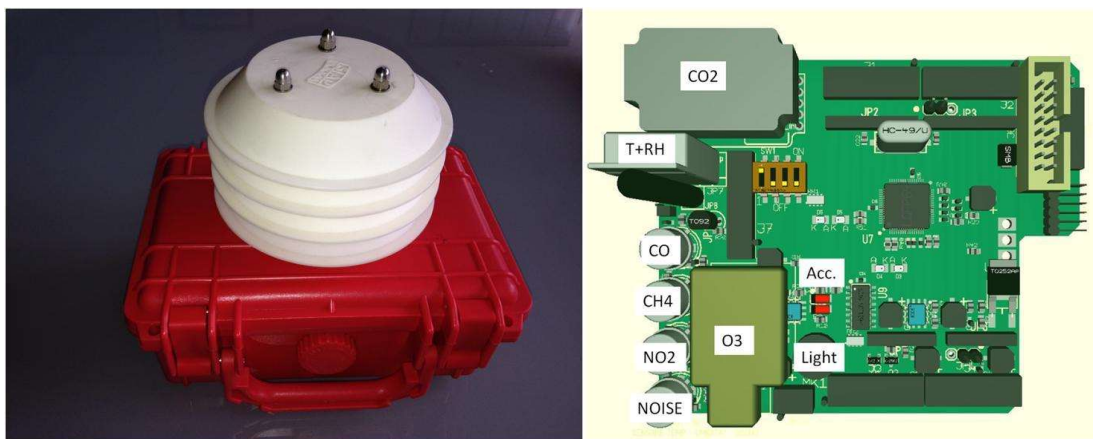


Figura 12. Centralina di monitoraggio assemblata e scheda sensori qualità dell'aria AirQuino.

In un recente incontro-studio presso la Sede delle Aziende del Gruppo CER del Bargellino, è stata effettuata una prova pratica della centralina AirQuino precedentemente descritta, che verrà successivamente installata nell'area interessata dal progetto di forestazione. La Centralina AirQuino attraverso i suoi sensori, ha monitorato in tempo reale i parametri micrometeorologici (umidità e temperatura dell'aria), i principali inquinanti presenti nell'aria, (PM2.5, PM10, CO, O₃, NO₂, VOC), il gas serra (CO₂), gli inquinanti acustici (il rumore) e gli indici di benessere (indice di calore). I dati acquisiti sono stati inviati tramite SIM dedicata ad un server centrale situato presso l'IBIMET-CNR di Firenze, per l'elaborazione e la visualizzazione tramite piattaforma internet. Dato il basso costo delle centraline si suggerisce, per un completo monitoraggio di tutta l'area di interesse, di posizionare almeno quattro centraline tenendo conto che le stesse, essendo di ridotte dimensioni e peso e totalmente autonome, possono essere montate anche su supporti mobili (biciclette, ecc). Nel costo delle centraline AirQuino è compresa l'installazione, il training per l'uso, la gestione dei dati ed il report finale.

A2. Questa azione si occuperà in particolar modo della progettazione e implementazione delle infrastrutture verdi urbane dopo un'attenta valutazione della struttura dell'area di interesse, della posizione delle principali fonti di inquinamento atmosferico e delle condizioni meteorologiche locali. Il progetto paesaggistico fornirà un'analisi generale di tutte le aree coinvolte, definendo la zonizzazione, la pianificazione dello spazio e la scelta delle specie da utilizzare in base alla capacità specifica di rimuovere gli inquinanti. Terrà anche conto della rilevanza estetica e sociale delle nuove aree verdi che aumenteranno la vivibilità dell'area. La progettazione del verde considererà in primo luogo un'opportuna scelta delle specie vegetali in base alle loro caratteristiche agronomiche, ecofisiologiche e morfologiche e quindi alla loro attitudine alla mitigazione ambientale.

A3. Questa terza azione si occuperà della stima del sequestro di CO₂ e della rimozione di inquinanti (O₃, PM) da parte della singola specie e dell'intero ecosistema vegetale. Verrà utilizzato il modello i-Tree Eco (<https://www.itreetools.org/eco/>; Nowak e Crane, 2000) per il calcolo del sequestro e dell'immagazzinamento di CO₂, basandosi sui dati strutturali della vegetazione e sulle condizioni meteorologiche puntuali, che possono influenzare la dispersione degli inquinanti, fornite dalle stazioni AirQuino e dalle stazioni ARPAE esistenti,. La rimozione di O₃ e di PM verrà stimata attraverso algoritmi che calcolano l'assorbimento e la deposizione secca da parte delle piante (Benjamin et al. 1998; Nowak, 2006; Manes et al., 2016). Pertanto, saranno fornite informazioni complete sulla capacità di mitigazione del verde urbano.

A4. La quarta azione garantirà una gestione sostenibile e collaborativa nel tempo delle nuove aree verdi, istituendo un approccio innovativo, con amministratori, gruppi di cittadini, associazioni o altri portatori di interesse adeguatamente formati, che si prenderanno cura delle aree verdi insieme all'amministrazione comunale. La rete di monitoraggio coinvolgerà cittadini, associazioni

etc. e l'ARPAE nel rilievo della qualità dell'aria ("adotta" una centralina) e darà un contributo valido e importante alla mappatura della qualità dell'aria, con possibilità di individuare velocemente e facilmente le fonti d'inquinamento nell'area. Verrà inoltre sviluppata un'applicazione su smartphone per consentire agli interessati di reperire informazioni sulle caratteristiche botaniche e fisiologiche delle piante messe a dimora. Attraverso tale applicazione si potrà identificare la specie e reperire ulteriori informazioni circa la sua capacità di mitigazione ambientale e il suo potenziale di formazione di ozono.

In conclusione, il progetto fornirà una nuova infrastruttura urbana in grado di rispondere alle esigenze sia ambientali che sociali. La nuova rete di forestazione urbana aiuterà la vivibilità della città, migliorando la qualità dell'aria e dello spazio.

7. Elenco delle specie rappresentative dell'area metropolitana di Bologna scelte in base alla loro efficacia nella mitigazione ambientale

Le piante ornamentali arboree, arbustive ed erbacee di seguito elencate sono risultate essere tra le più idonee alla riduzione dell'inquinamento in città. La scelta delle specie botaniche impiegate, in prevalenza autoctone e quindi rappresentative del patrimonio vegetale nel territorio di Bologna, è stata fatta in funzione del loro valore estetico, in relazione alla loro capacità di sequestrare CO₂ e di catturare polveri sottili e della bassa allergenicità. Infatti dalle analisi eseguite dall'IBIMET-CNR di Bologna, queste specie hanno mostrato una elevata capacità di mitigazione ambientale dovuta alle loro caratteristiche eco-fisiologiche e micro-morfologiche.

1. Piante arboree ornamentali decidue: queste piante sono molto efficaci nella riduzione degli inquinanti gassosi poiché l'abbondante presenza di foglie durante i mesi estivi favorisce la rimozione di ozono (O₃) troposferico. Infatti, soprattutto durante l'estate, in concomitanza di un intenso irraggiamento solare, le concentrazioni di ozono raggiungono spesso i livelli più alti, che possono essere dannosi per la salute umana. Queste piante sono anche molto efficaci nell'assorbire altri inquinanti gassosi (e.g. NO_x, SO_x etc.) grazie alla presenza degli stomi (piccole aperture sulla superficie fogliare). La presenza di peli (tricomi) e cere sulla superficie fogliare favorisce inoltre la cattura del particolato atmosferico (PM₁₀, PM_{2.5}). Le piante arboree decidue più efficaci nella mitigazione ambientale sono:

- acero platanoide (*Acer platanoides* L.)
- orniello (*Fraxinus ornus* L.),
- olmo campestre (*Ulmus minor* Mill.)
- tiglio selvatico (*Tilia cordata* Mill.)
- tiglio nostrano (*Tilia platyphyllos* Scop.)
- mirabolano (*Prunus cerasifera* Ehrh.)
- robinia (*Robinia pseudoacacia* L.)
- sambuco (*Sambucus nigra* L.)

Anche se non autoctone ma oramai ampiamente diffuse sul nostro territorio e di forte impatto estetico sono:

- Ginkgo (*Ginkgo biloba*)
- Koelreuteria (*Koelreuteria paniculata*)

2. Piante arbustive: Gli arbusti sono in grado di assorbire più efficacemente gli inquinanti atmosferici prodotti dal traffico. Infatti l'apparato fogliare, che parte dal suolo e si sviluppa su una

superficie verticale, la disposizione delle foglie e la vicinanza alle fonti di produzione di gas e particolato costituiscono la forza d'urto delle barriere verdi e garantiscono una significativa riduzione dell'esposizione diretta delle persone alle polveri sottili. Tra le specie arbustive, quelle con maggiore efficacia sono:

- alloro (*Laurus nobilis* L.)
- photinia (*Photinia x fraseri* Dress.)
- viburno (*Virburnum tinus* L.)

3. Piante sempreverdi: La loro efficacia è dovuta alla presenza di foglie anche nel periodo invernale, quando l'inquinamento è più alto. Tra queste soprattutto le conifere hanno una maggiore efficienza nella rimozione delle particelle per via della complessità della loro chioma, che favorisce fenomeni di micro turbolenza dell'aria. Molto diffuse nel territorio bolognese sono:

- pino nero (*Pinus nigra* J.F. Arnold)
- abete bianco (*Abies alba* Mill.)

Anche se non autoctona ma oramai ampiamente diffusa sul nostro territorio e di forte impatto estetico è:

- magnolia (*Magnolia grandiflora* L.)

4. Piante erbacee: Anche queste possono contribuire, seppure in misura inferiore rispetto alle piante arboree ed arbustive, alla rimozione degli inquinanti atmosferici. In particolare le piante di seguito elencate sono molto indicate per la costituzione dei cosiddetti "tetti verdi", spesso impiegati nell'architettura verde urbana, per la loro capacità di sopravvivenza in ambienti confinati come i tetti e gli edifici urbani.

- achillea (*Achillea millefolium* L.)
- cespica karvinskiana (*Erigeron karvinskianus* DC.)
- gaura (*Gaura lindheimeri* Engelm. & A. Gray)
- rudbeckia (*Rudbeckia sullivantii* Goldsturm)
- salvia (*Salvia nemorosa* L.)
- santoreggia (*Satureja repandens* L.)
- veronica (*Veronica longifolia* L.)

Anche i prati influiscono significativamente al miglioramento dell'ambiente urbano, contribuendo alla riduzione dell'effetto "isola di calore" aumentando la riflessione della radiazione solare diretta, attraverso la traspirazione fogliare che riduce la temperatura dell'aria e tramite l'assorbimento degli inquinanti. Negli interventi di arredo urbano è importante tenere conto delle proprietà allergeniche delle piante, prediligendo sempre piante a bassa allergenicità e lo sfalcio prima della spigatura/fioritura (specialmente di alcune piante erbacee) per ridurre la carica pollinica.

Bibliografia

- Abhijith, K.V., Kumar, P., Gallagher, J., McNabola, A., Baldauf, R., Pilla, F., Broderick, B., Di Sabatino, S., Pulvirenti, B., 2017. Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyons environment – A review. *Atmospheric Environment* 162, 71-86.
- Baraldi, R., Rapparini, F., Tosi, G., Ottoni, S., 2010. New aspects on the impact of vegetation in urban environment. *ISHS. Proceedings of the Second International Conference on Landscape and Urban Horticulture. Acta Horticulturae* 881, 543-546.
- Baraldi, R., Neri L., Costa F., Facini O., Rapparini, F., Carriero, G., 2018. Ecophysiological and micromorphological characterization of green roof vegetation for urban mitigation. *Urban Forestry & Urban Greening*
- Baraldi, R., Chieco, C., Neri, L., Facini, O., Rapparini, F., Morrone, L., Rotondi, A., Carriero, G., (in pub). An Integrated study on air mitigation potential of urban vegetation: from a multi-trait approach to modeling.
- Bell, M.L., Zanobetti, A., Dominici, F., 2013. Evidence on vulnerability and susceptibility to health risks associated with short-term exposure to particulate matter: a systematic review and meta-analysis. *American Journal of Epidemiology* 178, 865-876.
- Benjamin, M.T., Winer, A.M., 1998. Estimating the ozone-forming potential of urban trees and shrubs. *Atmospheric Environment* 32, 53-68.
- Bottalico, F., Travaglini, D., Chirici, G., Garfi, V., Giannetti, F., et al., 2017. A spatially-explicit method to assess the dry deposition of air pollution by urban forests in the city of Florence, Italy. *Urban Forestry & Urban Greening* 27, 221-234.
- Calfapietra C., Fares S., Manes F., Morani A., Sgrigna G., Loreto F., 2013. Role of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOC) emitted by urban trees on ozone concentration in cities: A review. *Environmental Pollution* 183: 71-80
- Dzierzanowski, K., Popek, R., Grawronska, H., Sæbø, A., Gawronski, S.W., 2011. Deposition of particulate matter of different size fractions on leaf surfaces and in waxes of urban forest species. *International Journal of Phytoremediation* 13, 1037-1046.
- EEA, European Environment Agency, 2016. Air quality in Europe – 2015 report. EEA report 5/2015, 64.
- El-Khatib, A.A., El-Rahman, A.M., Elsheikh, O.M., 2011. Leaf geometric design of urban trees: Potentiality to capture airborne particle pollutants. *Journal of Environmental Studies* 7, 49-59.
- Ferrante, G., Malizia, V., Antona, R., Montalbano, L., La Grutta, S., 2013. Esposizioni ad inquinanti ambientali e rischio di allergie nel bambino. *Rivista di Allergologia e Immunologia Pediatrica* 3, 8-13.
- Freguelli, G., Passaleva, A., 2003. La scelta delle piante destinate al verde ornamentale. *Giornale Italiano di allergologia e Immunologia Clinica*, 13, 177-191.
- Freguelli, G., 2005. Un'adeguata progettazione del verde urbano per limitare le pollinosi in città. *Notiziario Allergologico* 24 (1-2), 29-32.
- Gascon, M., Triguero-Mas, M., Martinez, D., Dadvand, P., Rojas-Rueda, D., Plasencia, A., Nieuwenhuijsen, M.J., 2016. Residential green spaces and mortality: a systematic review. *Environment International*. 86, 60-67.
- Grote, R., Samson, R., Alonso, R., Amorin, J.H., Cariñanos, P., Churkina, G., Fares, S., Thiec, D.L., Niinemets, Ü., Mikkelsen, T.N., Paoletti, E., Tiwary, A., Calfapietra, C., 2016. Functional traits of urban trees: air pollution mitigation potential. *Frontiers in Ecology and the Environment* 14, 543–550.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change 2007. Working group I: the physical basis for climate change (summary for policy makers) ISBN 978-0-521-88009-1
- Jamil, S., Abhilash, P.C., Singh, A., Singh, N., Behl, H.M., 2009. Fly ash trapping and metal accumulating capacity of plants: implication for green belt around thermal power plants. *Landscape and urban planning* 92, 136-147.

- Jouraeva, V.A., Johnson, D.L., Hassett, J.P., Nowak, D.J., 2002. Differences in accumulation of PAHs and metals on the leaves of *Tilia × euchlora* and *Pyrus calleryana*. *Environ Pollution* 120, 331–338.
- Kesselmeier, J., Staudt, M., 1999. Biogenic volatile organic compounds (VOC): an overview on emission, physiology and ecology. *Journal of Atmospheric Chemistry* 33, 23-88.
- La Grutta, S., Cibella, F., Marchese, S., et al. 2011. Effetti respiratori degli inquinanti ambientali degli ambienti esterni ed interni nell'età infantile. In: D'Amato G., eds. *Inquinamento atmosferico, variazioni climatiche e patologie respiratorie*. Milano: AIPO Ricerche Edizioni, 131-150.
- Relieved, 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*
- Manes, F., Marando, F., Capotorti, G., Blasi, C., Salvatori, E., Fusaro, L., et al., 2016. Regulating ecosystem services of forests in ten Italian metropolitan cities: air quality improvement of PM₁₀ and O₃ removal. *Ecological Indicators* 67, 425-440.
- Nowak, D.J., Crane, D.E., 2000. The Urban Forest Effects (UFORE) model: quantifying urban forest structure and functions. General Technical Report (GTR), U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station. 714-720.
- Nowak, D.J., Crane, D.E., Stevens, J.C., 2006. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry and Urban Greening* 4, 115-123.
- Sæbø, A., Popek, R., Nawrot, B., Hanslin, H.M., Gawronska, H., Gawronski, H., 2012. Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. *Science of the Total Environment* 427-428, 347-354.
- Sæbø, A., Hanslin, H.M., Baraldi, R., Rapparini, F., Gawronska, H., Gawronski, S.W., 2013. Characterization of urban trees and shrubs for particulate deposition, carbon sequestration and BVOC emissions. *Acta Horticulturae* 990, 509-516.
- Ueda, H., Kikuta, Y., Matsuda, K., 2012. Plant communication: mediated by individual or blended VOCs? Review. *Plant Signaling & Behavior* 7, 222-226.
- UNECE, 2004. Air Pollution and Vegetation. ICP Vegetation Annual Report 2003/2004. UNECE ICP Vegetation Coordination Centre, CEH Bangor, UK.
- Velikova, V., Loreto, F., 2005. On the relationship between isoprene emission and thermotolerance in *Phragmites australis* leaves exposed to high temperatures and during the recovery from a heat stress. *Plant Cell & Environment* 28, pp. 318 – 327.
- WHO - World Health Organization, 2015. Health and the environment: addressing the health impact of air pollution. Sixty-eighth World Health Assembly; 2015 May 26 http://apps.who.int/gb/ebwha/pdf_files/WH/A68/A68_R8-en.pdf?ua=1 (accessed 2015 June 29).
- WMO - World Meteorological Organization, 2017. Greenhouse gas bulletin – The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2016. N. 13 30 October 2017.