

SOLUZIONI GREEN PER LA SOTTRAZIONE E LO STOCCAGGIO DI CARBONIO NEI DISTRETTI URBANI

GREEN SOLUTIONS FOR REMOVING AND STORING CARBON IN URBAN DISTRICTS

Fabrizio Tucci, Marco Giampaolletti

ABSTRACT

Il paper presenta gli sviluppi di ricerca derivati dallo studio di oltre 100 specie arboree e arbustive presenti nel bacino del Mediterraneo secondo le capacità di assorbimento e stoccaggio di carbonio, definendo un quadro sinottico utile per gli attori del settore. L'introduzione di indici tassonomici specifici di stoccaggio definisce la fase sperimentale svolta in un quartiere di edilizia residenziale pubblica di Roma, illustrando una proposta progettuale di riforestazione urbana integrata con quella complessiva di rigenerazione di quell'area della Capitale. Il tema risulta di grande rilevanza scientifica alla luce delle strategie e delle politiche nazionali ed europee illustrate rispettivamente nel Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza e nella proposta, al vaglio del Parlamento Europeo, relativa alla New EU Forest Strategy Fit for 55.

This paper presents the research developments arising from the study of more than 100 tree and shrub species present in the Mediterranean basin according to their carbon absorption and storage capacities, defining an overview of use for parties active in the sector. The introduction of specific taxonomic storage indices defines the experimental phase performed in a public housing neighbourhood in Rome, illustrating a proposed urban reforestation project integrated with the overall one for regenerating the entire area of Italy's Capital. The issue is of great scientific importance in light of the national and European strategies and policies contained respectively in the National Recovery Plan and the proposed New EU Forest Strategy – Fit for 55, currently pending in the European Parliament.

KEYWORDS

inverdimento urbano, serbatoi naturali di carbonio, neutralità climatica delle città, forestazione urbana, distretti verdi

urban greening, natural carbon sinks, climate neutrality of cities, urban forestation, green districts

Fabrizio Tucci is a Full Professor of Architecture Technology at Sapienza University of Rome (Italy), where he is Director of the Department of Planning, Design, Architecture Technology, Director of the Master of II level Environmental Technological Design, Coordinator of the Doctorate of Planning, Design, Architecture Technology. Among his research topics, there are national and international research activities in bioclimatic and bio-sustainable architecture, environmental technological design and green economy. Mob. +39 338/41.74.777 | E-mail: fabrizio.tucci@uniroma1.it

Marco Giampaolletti, Architect and PhD, is a Researcher at the PDTA Department of 'Sapienza' University of Rome (Italy) with a II level Master in Environmental Technological Design, and carries out his research activity in the field of climate mitigation strategies. Mob. +39 345/38.74.178 | E-mail: marco.giampaolletti@uniroma1.it

La trasformazione 'green' delle città e degli organismi urbani e periurbani, alla luce delle più recenti proposte politiche europee adottate in materia di clima, energia, uso del suolo, trasporti e gestione responsabile delle risorse, in distretti¹ resilienti, flessibili, adattivi e sostenibili, è divenuta questione non più rinviabile. Di fronte ai cambiamenti climatici, all'aumentare degli impatti da emissioni carboniche, alla crescente crisi energetica europea – accentuata di recente, a causa della crisi geopolitica in atto, dall'incremento dei costi per il reperimento e approvvigionamento di gas naturale da cui i Paesi membri dipendono per oltre il 42% (EEA, 2021) – risultano necessarie politiche e azioni urgenti per rendere gli abitanti delle città maggiormente resilienti e responsabili verso gli impatti derivati dal repentino cambiamento economico, sociale e ambientale.

Le misure di mitigazione (ma anche quelle di adattamento, soprattutto se ad esse integrate) per mantenere l'aumento della temperatura globale entro 1,5 °C potrebbero evitare parte degli impatti più devastanti del cambiamento climatico in atto, ma sappiamo bene che, da una parte, la loro attuazione è in netto ritardo rispetto alla tabella di marcia auspicata nel 2015, e dall'altra, che se le temperature medie dovessero raggiungere un aumento di 1,7-1,8 °C, gli ecosistemi oggi considerati vulnerabili raddoppierebbero la probabilità di estinzione, decuplicando la stessa al raggiungimento di +3 °C (IPCC, 2022); la preoccupazione cresce, l'urgenza di una seria operazione di decarbonizzazione, in primis nelle città, aumenta.

Tra le misure di rigenerazione urbana volte alla decarbonizzazione dei distretti, possiamo annoverare le pratiche di imboschimento e riforestazione, nonché le soluzioni tecnologiche ambientali, in primis le Nature-based Solutions, capaci di offrire risposte ai cambiamenti climatici, nonché alla qualità dell'abitare, tematiche sempre più connesse alla crescita urbana (Tucci, 2018). La strategia di incentivare azioni e soluzioni di infrastrutture verdi si inserisce in un più ampio dibattito scientifico in merito allo sviluppo di metodologie e strumenti di divulgazione integrata volti alla sostenibilità delle trasformazioni urbane in un'ottica di deep renovation (Andreucci, 2017). L'originalità del contributo è individuabile nella predisposizione di quadro sinottico, utile agli attori nei settori della riforestazione urbana e della selvicoltura, di soluzioni green, con l'obiettivo primario di contribuire al dimezzamento delle emissioni di carbonio entro il 2030 e pervenire alla neutralità carbonica entro il 2050 (IPCC, 2019). Tale impostazione mira a definire e catalogare soluzioni e strategie ad oggi disponibili volte alla riduzione delle emissioni di carbonio nei distretti urbani, responsabili per il 36% del consumo finale di energia e del 39% delle emissioni totali di biossido di carbonio a livello mondiale (IPCC, 2021).

Metodologia e fasi operative della ricerca | Il contributo illustra uno dei principali risultati della ricerca il cui obiettivo generale era la realizzazione di un database delle principali specie arboree e arbustive presenti nella Città metropolitana di Roma Capitale, con elevate capacità di mitigazione ambientale e di assorbimento dei gas cli-

malteranti, che potesse essere messo a disposizione a Enti locali e utile per cittadini privati e imprese. Tale strumento metodologico è volto a far conoscere i valori di assorbimento e stoccaggio di CO₂ di ogni singola specie analizzata: nella redazione del database è stato introdotto un 'indice quali-quantitativo tassonomico di stoccaggio', volto a sensibilizzare gli attori del settore all'utilizzo di specie arboree autoctone ad alta capacità di mitigazione ambientale, che risultano quindi più sostenibili in termini di mitigazione ambientale (miglioramento del benessere termometrico dell'area di impianto nonché capacità selettive di filtraggio agli inquinanti atmosferici urbani).

La strutturazione dell'indice è stata effettuata, primariamente, sulla base di una revisione della letteratura tratta dalle sitografie di 'ActaPlantarum' e di 'Dryades', a partire rispettivamente dal 2007 e dal 2021 (Pignatti, La Rosa and Guarino, 2017; Città metropolitana di Roma Capitale, 2021) volta a conoscere le specie arboree e arbustive presenti nell'area metropolitana e a quantificarne il grado di assorbimento di carbonio. Occorre puntualizzare che da tale analisi sono state escluse le specie erbacee, data la loro ridotta capacità di assorbimento di CO₂ rispetto alle specie arboree e arbustive. Indagini sul campo nella Città metropolitana di Roma Capitale, in aree sia urbane che periurbane, hanno permesso di arricchire l'elenco rispetto a quello estratto dalla letteratura sopracitata. Successivamente, è stato creato un database utilizzando il software Excel Suite Office 2020 ove, per ciascuna specie vegetale, sono riportate le informazioni che seguono:

- 1) Nome scientifico della specie, ovvero binomio lineare (composto da: epiteto generico, epiteto specifico e patronimico, ovvero nome dell'autore che per primo ha scoperto la specie); la nomenclatura è tratta da ActaPlantarum e da Dryades a partire rispettivamente dal 2007 e dal 2021;
- 2) Fotografia della specie (da ActaPlantarum);
- 3) Numero di individui per specie presenti nella Città metropolitana di Roma Capitale (2021);
- 4) Status di esoticità (Galasso et alii, 2018): autoctona quando la presenza della specie è spontanea e non dipende dunque dalla presenza dell'uomo, o alloctona quando la sua presenza è legata, intenzionalmente o accidentalmente, all'azione dell'uomo;
- 5) Per le specie alloctone, l'epoca di introduzione secondo le due categorie attualmente riconosciute: 5a) Archeofite, specie introdotte prima del 1492, ossia prima del colonialismo europeo dopo la scoperta dell'America; 5b) Neofite, specie introdotte dopo il 1492;
- 6) Per le specie alloctone, lo status di naturalizzazione: 6a) Casuali, specie che si sviluppano e riproducono spontaneamente, ma non riescono a formare popolazioni stabili; 6b) Naturalizzate, specie che formano popolamenti stabili indipendenti dall'apporto di nuovi propaguli da parte dell'uomo; 6c) Invasive: un sottogruppo di specie naturalizzate in grado di diffondersi velocemente, a considerevoli distanze dalle fonti di propaguli originarie, e quindi con la potenzialità di diffondersi su vaste aree;
- 7) Corotipo semplificato, secondo una prima classificazione riportata da ActaPlantarum e qui riclassificata al fine di omogeneizzare le macro aree

geografiche di provenienza (Tab. 1);

8) Forma biologica, secondo la classificazione riportata da ActaPlantarum; le categorie sono definite sulla base degli adattamenti per la protezione delle gemme durante la stagione avversa: 'Fanerofite arboree' (P scap), piante legnose con portamento arboreo e gemme poste ad altezze dal suolo superiori ai due metri; 'Nano-Fanerofite' (NP), piante legnose con gemme perennanti poste tra 20 cm e 2 m dal suolo; 'Fanerofite cespugliose' (P caesp), piante legnose con portamento cespuglioso; 'Geofite rizomatose' (G rhiz), piante perenni dotate di rizoma, un fusto sotterraneo dal quale, ogni anno, si dipartono radici e fusti aerei;

9) Utilizzo, secondo le seguenti tipologie d'uso: artigianale, commestibile, cosmetico, forestale, mellifero, officinale, ornamentale, rimboschimento, schermante;

10) Capacità di assorbimento di CO₂, secondo le analisi di stoccaggio di CO₂ a 20 anni, in tonnellate, di ogni singola specie arborea/arbustiva (Regione Toscana, 2018).

Elaborazione di un 'indice qualitativo-quantitativo tassonomico di stoccaggio' (TS) | L'elaborazione di un 'indice quali-quantitativo tassonomico di stoccaggio' (TS), che sia basato sulla capacità di assorbimento di carbonio dall'atmosfera di una specie e sullo status di esoticità, è stato pensato come rapporto matematico, ponendo a numeratore il grado di assorbimento (C) e a denominatore l'esoticità (E): $TS = C / E$.

L'Indice assume, mediante rapporto tra capacità di assorbimento di carbonio in atmosfera in relazione allo status di esoticità, valori compresi tra 0 e 1, ove per valori tendenti allo 0 la scelta della specie diviene poco sostenibile, per valori tendenti a 1 la scelta è maggiormente sostenibile². Un secondo indice elaborato è l' 'indice tassonomico di stoccaggio medio' (TSm), quest'ultimo applicabile in una specifica area di studio, ricercato secondo la media di un 'indice tassonomico di stoccaggio' definito per ogni specie censita, utile quindi a confrontare aree e spazi differenti, come, ad esempio, i quartieri di una città; anche suddetto indice assume valori compresi tra 0 e 1. Riguardo la capacità di stoccaggio di CO₂ (C) – fornita in tonnellate, a 20 anni, con unità di misura in ton/anni – è stato realizzato un grafico delle frequenze di distribuzione, con il numero di specie (frequenza) in ordinata e i valori di stoccaggio in ascissa (Fig. 1). La visualizzazione della linea di tendenza polinomiale di grado 2, ha permesso di individuare 4 picchi principali di frequenza, sulla base dei quali è stata proposta una classificazione dei valori di stoccaggio in 4 categorie: Basso (range 0,02-0,129 t/20a); Medio-basso (range 0,130-0,799 t/20a); Medio-alto (range 0,800-2,799 t/20a); Alto (range >2,800 t/20a).

Riguardo l'unità di misura utilizzata per la capacità di stoccaggio (tonnellate), poiché una specie ('Pinus pinea') ha valori relativamente molto elevati rispetto a tutte le altre specie considerate, è stata convertita l'unità (t/20 anni) in Kg/trimestre per una mera necessità matematica di calcolo dell'Indice. La caratterizzazione dell'autoctonia/esoticità (E), considerando altresì i differenti livelli di autoctonia, è stata affrontata proponendo la classificazione delle varie voci illu-

| Actaplantarum chorotype | Reclassified chorotype |
|--|-----------------------------------|
| North America | Alien |
| South America | Alien |
| Asia | Alien/Eurasian |
| Western Asia | Eurasian |
| East Asia | Alien |
| Australia | Alien |
| Europe | Mediterranean |
| Southern Europe | Mediterranean |
| Asian European | Eurasian |
| Asian European, Euro-Asiann, North Africa | Eurasian |
| European-Caucasian | European-Caucasian |
| Euro-Siberian | Euro-Siberian |
| Macaronesia | Mediterranean |
| Mediterranean | Mediterranean |
| Naturalized | Eurasian/Alien/European-Caucasian |
| Countries in the tropical belt Africa and Asia | Alien |

Tab. 1 | On the right of the table the Chorotype according to the classification reported by Actaplantarum, on the left the Chorotype reclassified (credit: F. Tucci and M. Giampaolletti, 2022).

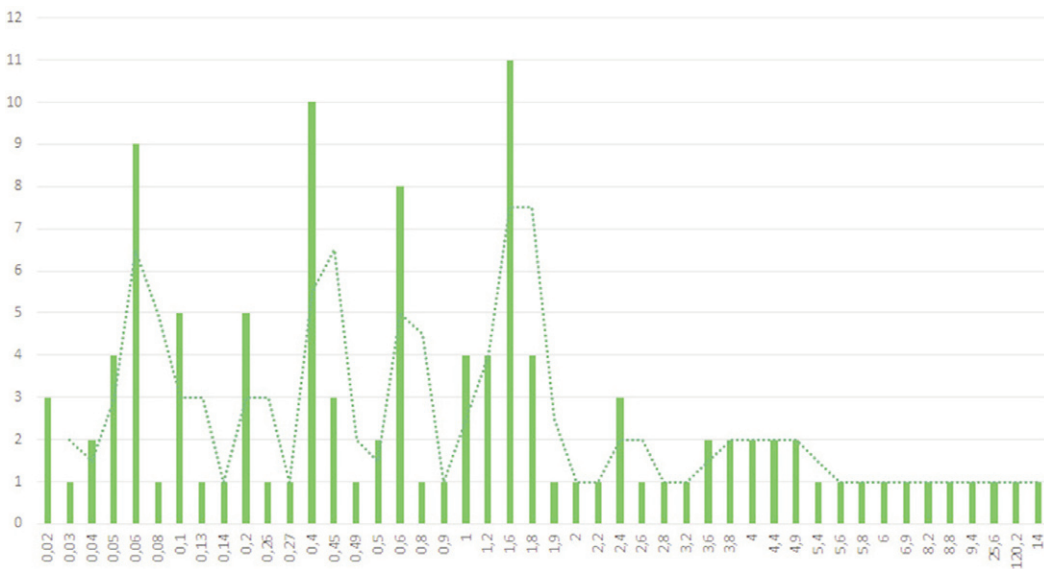


Fig. 1 | Graph of 20-year CO₂ storage distribution frequencies, in tons, of surveyed species (credit: F. Tucci and M. Giampaolletti, 2022).

| | |
|-------|---|
| 1 | Spontaneous in the territory of the Municipality of Rome |
| 1.125 | Not spontaneous in the Municipality of Rome (but native to Lazio) |
| 1.25 | Casual |
| 1.375 | Naturalize |
| 1.5 | Invasive |

Tab. 2 | Classification, through determined values, of autochthonous and spontaneous, non-spontaneous but autochthonous Latium, causal, naturalized and invasive species surveyed (credit: F. Tucci and M. Giampaolletti, 2022).

strata in Tabella 2. Relativamente alla scelta dei valori è stato dato 1 (come valore di base della classificazione) a tutte le specie autoctone e spontanee nel territorio della Città metropolitana di Roma Capitale; assegnando tale valore, si è voluto sottolineare una scelta corretta e sostenibile in termini ambientali. Riguardo alle altre tipologie esotiche, considerando che esse sono via via meno sostenibili nella scala proposta, e riferendoci alla struttura dell'indice come rapporto, sono stati assegnati valori via via crescenti in modo tale che per un maggior livello di esoticità, si avesse un minor valore dell'Indice, a indicare, conseguentemente, una scelta meno appropriata in termini di sostenibilità ambientale.

La scelta di utilizzare valori di 0,125 come passaggio da un tipo esotico a un altro (effettuata dopo numerose prove matematiche) fornisce risultati finali facilmente leggibili ed elaborabili. Nella definizione dell'Indice, il grado di assorbimento di ogni specie analizzata (C) è stato posto in rapporto con la specie a più alta capacità di stoccaggio di carbonio censita ('Pinus pinea'): $C = \text{CKg/trimestre ('Pinus pinea')} / \text{CKg/trimestre (specie analizzata)}$. Successivamente tale valore C è stato posto al numeratore per la determinazione dell' 'indice quali-quantitativo tassonomico di stoccaggio' (TS).

Restituzione grafica e risultati del censimento arboreo ed arbustivo secondo il database costituito

Completivamente sono state censite 112 specie, con una predominanza di specie arbustive, forma biologica prevalente di fanerofite scapose e status esotico alloctono. Queste ultime per il 75% (46 specie) sono costituite da Neofite e da Archeofite (25%, 15 specie), relativamente allo status complessivo tali specie sono composte in percentuali omogenee principalmente da Archeofite naturalizzate (12%, 12 specie), Neofite invasive (9%, 10 specie), Neofite naturalizzate (12%, 14 specie) e Neofite casuali (20%, 22 specie) (Fig. 2). L'analisi del corotipo semplificato (cosiddetto Spettro Corologico semplificato; Fig. 3) ha evidenziato una percentuale confrontabile per le Aliene pari al 28% (31 specie), le Euroasiatiche pari al 28% (31 specie), le Mediterranee pari al 23% (26 specie) e le Europeo-Caucasiche pari al 20% (23 specie), mentre appena l'1% è rappresentato dalle Euro-Siberiane (1 specie). Le specie Aliene (Fig. 4) sono in prevalenza di origine nord Americana con il 52% (16 specie) e, in minor misura, asiatica confermando la forte presenza di specie invasive e non native del luogo oggetto di censimento. L'analisi degli Utilizzi delle specie arboree e arbustive (Fig. 5) ha evidenziato, un utilizzo prevalente di tipo Ornamentale (25%), Officinale (21%), Forestale (20%) e Rimboschimento (11%), presentando una media di 2,7 utilizzi, segno di come molte delle stesse vengano utilizzate per molteplici scopi e funzioni.

La visualizzazione del grafico delle frequenze (Fig. 6) ha permesso di identificare, attraverso una curva esponenziale, il trend qualitativo delle specie censite. Nello specifico il valore di indice più alto è pari a 0,727, riconducibile alla specie 'Pinus pinea', specie Archeofita naturalizzata, non spontanea nella Città metropolitana di Roma Capitale, ma con elevata capacità di stoccaggio di carbonio (pari a 320 Kg/trimestre).

Complessivamente il grafico mostra un patrimonio arboreo e arbustivo presente poco sostenibile in termini ambientali e un indice estremamente basso (57 specie arboree e arbustive censite con un indice inferiore a 0,021). Tale risultato è strettamente legato alla capacità di stoccaggio e al loro grado di esoticità. Il TSm delle specie analizzate e censite risulta essere pari a 0,103.

La sperimentazione sul caso del PdZ di San Basilio a Roma | Il quartiere di edilizia residenziale pubblica di S. Basilio (progettista M. Fiorentino, 1951-1955) si trova nel municipio IV del Comune di Roma Capitale, al cui interno troviamo 4.680 alloggi ERP (Fig. 7) per una superficie complessiva di 135.574 mq di cui 53.473 mq classificati come spazi aperti. Tali alloggi sono gestiti per il 70% da ATER – Azienda Territoriale per l’Edilizia Residenziale pubblica (ex IACP – Istituto Autonomo Case Popolari) e per il 30% dal Comune, localizzandosi precisamente nell’ex PdZ 02V – San Basilio. Negli ultimi anni l’indice di affollamento si è drasticamente ridotto: i giovani nuclei familiari del quartiere stesso cercano altrove le abitazioni a causa di un forte deficit di servizi primari, nonché di un complessivo degrado degli spazi aperti, condizioni che hanno generato, nel tempo, una riduzione del valore immobiliare degli alloggi, favorendo spesso l’instaurarsi di condizioni di micro-criminalità organizzata.

Lo studio e l’analisi degli aspetti ‘green’ del PdZ (Fig. 8), a seguito di sopralluoghi in loco avvenuti in più giorni per conoscere, analizzare e censire le specie arboree e arbustive che costituiscono l’area oggetto di studio, ha permesso il censimento e la catalogazione di 22 specie arboree e arbustive, con prevalenza di ‘*Ailanthus altissima*’, ‘*Cedrus atlantica*’, ‘*Robinia pseudoacacia*’ ed ‘*Eucalyptus camaldulensis*’, per un totale di 374 individui a medio e alto fusto con uno stoccaggio complessivo pari a 360.576 KgCO_{2eq}/annuo (Tab. 3). Tali masse arboree consentono una zona d’ombra pari al 30% degli spazi aperti, quest’ultimi costituiti principalmente da superfici a prato (con prevalente presenza di specie erbacee quali ‘*Poa pratensis*’ e ‘*Festuca arundinacea*’) e terreni con destinazione urbanistica ‘a seminativo’ (Fig. 9).

Le specie censite (Fig. 10) risultano in prevalenza Alloctone (64%, 14 specie) con bassa sostenibilità ambientale, secondo lo Status di esoticità (Fig. 11) principalmente di tipo Indigena (36%, 8 specie), seguite da Neofite invasive (18%, 4 specie), Archeofite naturalizzate (18%, 4 specie), Neofite casuali (14%, 3 specie), Neofite naturalizzate (9%, 2 specie) e da Archeofite casuali (5%, 1 specie). La capacità complessiva di assorbimento di CO₂ dall’atmosfera delle masse arboree presenti e degli spazi verdi a raso è stata stimata in 360.577 KgCO_{2eq}/anno. Suddetta capacità di assorbimento (Fig. 12) risulta complessivamente di livello Medio-alto e Alto; la specie con più alto potenziale di assorbimento e stoccaggio di carbonio risulta essere il ‘*Pinus pinea*’, specie Archeofita naturalizzata e non spontanea nella Città metropolitana di Roma Capitale. Il TS applicato per le specie censite (Fig. 13) presenta una frequenza di distribuzione omogenea con il valore massimo pari a 0,727, un valore minimo pari a 0,002 e un medio pari a 0,163. Il TSm delle specie analizzate e censite risulta essere pari a 0,147, valore superiore

del 43% rispetto alla media riscontrata per il censimento arboreo e arbustivo delle specie presenti nella Città metropolitana di Roma Capitale.

Le misurazioni in loco di concentrazione di CO₂ | La conclusione della fase di censimento delle masse arboree e arbustive presenti nell’area di intervento (Fig. 14) introduce le campagne sperimentali di misurazione in loco per la rilevazione delle concentrazioni di carbonio in atmosfera avvenute in due momenti specifici dell’anno 2021: durante il solstizio d’estate, avvenuto il giorno 21 Giugno 2021 alle ore 07:00 con una temperatura rilevata pari a 25 °C, un’umidità relativa pari al 70,1%, una velocità del vento massima registrata pari a 3,2 m/s e una copertura nuvolosa del 30%; durante il solstizio d’inverno avvenuto il giorno 21 Dicembre 2021 alle ore 17:00, con una temperatura rilevata pari a 9 °C, un’umidità relativa pari al 99,1%, una velocità del vento massima registrata pari a 7,2 m/s e una copertura nuvolosa del 55%. Le superiori date sono giustificate al fine di quantificare la massima variazione, in termini di concentrazioni, di carbonio in atmosfera in virtù della presenza, per le specie caducifoglie, di un apparato fogliare in estate in grado di assorbire carbonio e di una sua assenza nel periodo invernale.

La conformazione dell’area ha permesso la definizione di 20 stazioni di rilevamento censite all’interno della viabilità locale del PdZ di S. Basilio (Fig. 15); tali informazioni sono state inserite in Google Earth, software virtuale collegato in sincrono alla piattaforma cloud Google Drive, ove i valori acquisiti sono stati successivamente esportati, con estensione .kml, in QGIS, applicazione desktop GIS open source, al fine di georeferenziare tali stazioni secondo il Sistema di Riferimento WGS84.³

Le concentrazioni rilevate dalle stazioni (in parti per milione, ppm) attraverso strumentazione scientifica (Multi Functional Air Quality Detector, mod. Temtop M2000) sono state successivamente espresse in QGIS secondo due concetti grafici: il primo, puntuale, al fine di comprendere esattamente la localizzazione del campionamento eseguito; il secondo, diffuso, mediante l’elaborazione di una mappa di concentrazione. La rilevazione sperimentale eseguita ha evidenziato nel solstizio d’estate un picco di concentrazione di CO₂ pari a 399,5 ppm, rilevato principalmente all’interno delle corti chiuse degli edifici, ove tale conformazione non permette una corretta ventilazione, e concentrazioni minori negli spazi aperti periferici al PdZ, con un valore minimo rilevato pari a 395,5 ppm (Fig. 16). La misurazione, avvenuta il giorno del solstizio d’inverno, è stata eseguita con gli stessi criteri di quella avvenuta nel solstizio d’estate, rilevando, nello specifico, un picco di concentrazione di CO₂ pari a 401,5 ppm all’interno delle corti chiuse degli edifici e del tessuto edilizio che connette il PdZ al quartiere S. Basilio (Fig. 17); tali concentrazioni risultano superiori a quelle del periodo estivo per la mancanza delle masse vegetazionali caducifoglie e per l’incremento dei consumi energetici dovuti al riscaldamento degli alloggi che costituiscono il PdZ.

Proposta di intervento di greening volto alla sottrazione di carbonio e all’aumento della qua-

lità ambientale | La proposta di intervento per l’intero PdZ di San Basilio si basa, da una parte su un mirato e progettualmente studiato (e simulato) incremento delle masse vegetazionali già esistenti, autoctone e ad alta capacità di mitigazione ambientale, eliminando specie potenzialmente alloctone e invasive, dall’altra sul recupero, rifunzionalizzazione e valorizzazione degli spazi aperti, con innalzamento della loro complessiva qualità ambientale (Fig. 18).

Lo scenario ipotizzato ha previsto il potenziamento di specie autoctone resilienti, tra le quali il ‘*Fagus sylvatica*’, ‘*Olea europaea*’, ‘*Pinus pinea*’ e l’introduzione di ulteriori 5 specie vegetazionali sostenibili e con elevate capacità di mitigazione ambientale nell’assorbimento e stoccaggio di carbonio dall’atmosfera quali il ‘*Pinus halepensis*’,

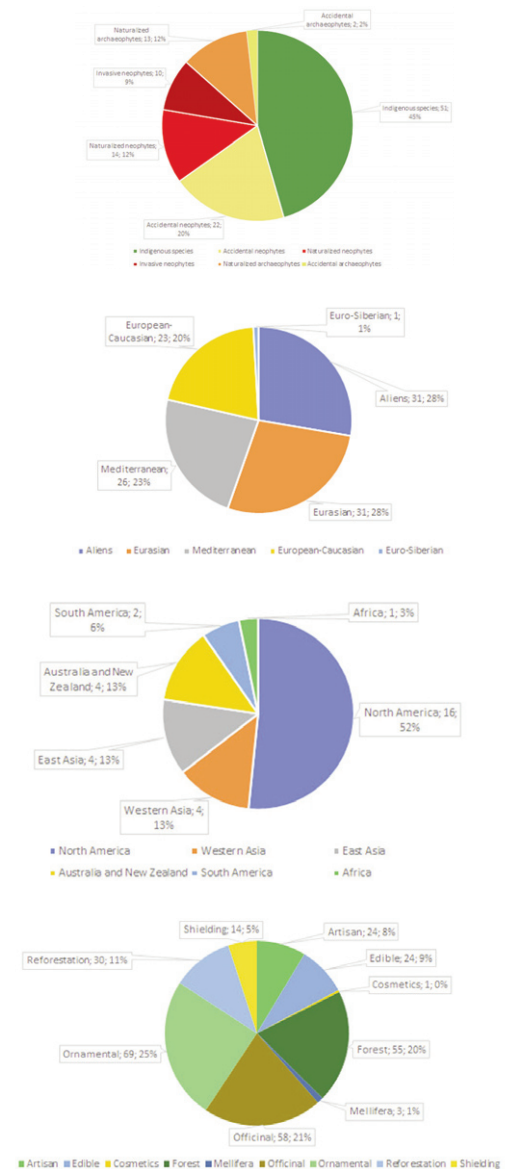


Fig. 2 | Overall status of tree and shrub species surveyed in the territory of the Municipality of Rome (credit: F. Tucci and M. Giampaolletti, 2022).

Fig. 3 | Simplified chorological spectrum of surveyed tree and shrub species (credit: F. Tucci and M. Giampaolletti, 2022).

Fig. 4 | Simplified chorological spectrum of surveyed tree and shrub species – Geographical origin of alien species (credit: F. Tucci and M. Giampaolletti, 2022).

Fig. 5 | Prevalent use of surveyed tree and shrub species (credit: F. Tucci and M. Giampaolletti, 2022).

'Populus tremula', 'Quercus pubescens', 'Quercus suber'⁴. In aggiunta si è prevista la eradicazione di n. 128 individui tra arboree e arbustive infestanti e invasive quali, ad esempio, 'Acacia dealbata', 'Ailanthus altissima', 'Junglas regia', 'Robinia pseudoacacia' nonché di specie arbustive, principalmente 'Pinus pinea', troppo vicine ai manufatti edilizi, che creavano problemi di ventilazione naturale e ombreggiamento nei sopralluoghi avvenuti nei periodi estivi e invernali, anche con evidenti problemi di pericolosità strutturale, rilevata attraverso la tecnica VTA (Visual Tree Assessment).⁵

Sono stati inoltre conservati gli oltre 70 individui arbustivi di 'Laurus nobilis' che definiscono i 200 metri di siepi e bordure stradali presenti nell'area di intervento. Complessivamente sono stati introdotti 587 nuovi individui arborei e arbustivi allocati nelle aree degradate, che in un'ottica 'greening' risultano recuperate e riqualificate con un totale di 32 generi e 961 individui arborei e arbustivi, per un assorbimento complessivo di carbonio pari a 506.816 KgCO_{2eq}/anno. Le 32 specie presenti in tale scenario di riqualificazione risultano quasi esclusivamente in prevalenza Autoctona (94%, 30 specie; Fig. 19), con un sensibile aumento della sostenibilità ambientale dimostrato, secondo lo Status di esoticità (Fig. 20), dalla costituzione di specie principalmente di tipo Indigene (91%, 29 specie), seguite da Neofite casuali (3%, 1 specie), Neofite naturalizzate (3%, 1 specie) e Archeofite naturalizzate (3%, 1 specie).

Discussione dei risultati | L'adozione delle strategie descritte in precedenza ha definito linee progettuali verificabili attraverso la quantificazione de-

gli effetti che le stesse introducono nell'area oggetto di sperimentazione. Nel dettaglio, tali soluzioni green hanno riguardato l'incremento del patrimonio arboreo e arbustivo attraverso la valorizzazione delle specie sostenibili esistenti e l'introduzione di nuove autoctone, ad alta sostenibilità ambientale e spontanee del territorio metropolitano di Roma Capitale, l'incremento delle aree umide e la valorizzazione degli spazi aperti. La capacità di assorbimento di CO₂ dall'atmosfera esercitato dal patrimonio arboreo dell'area, quale risultante delle operazioni progettate e simulate di introduzione e di eliminazione di determinate specie (Fig. 21), risulta essere complessivamente di livello Alto, migliorando quindi le performance di assorbimento rispetto lo stato di fatto.

Da notare che la specie con più alto potenziale di assorbimento e stoccaggio di carbonio risulta essere il 'Pinus halepensis', entità indigena e spontanea nella Città metropolitana di Roma Capitale e ad alta capacità di mitigazione ambientale, che non a caso è stata tra le specie introdotte nel progetto di riforestazione urbana dell'area. Il TS applicato per le specie presenti in tale scenario (Fig. 22) presenta una frequenza di distribuzione omogenea con il valore massimo pari a 1, un valore minimo pari a 0,008 e un TSm pari a 0,188, incrementando del 28% la capacità ambientale di assorbimento del carbonio in relazione allo status di esoticità, rispetto lo stato di fatto.

Il mix di tali strategie ambientali determina complessivamente un incremento dell'assorbimento di CO₂ pari a +183% (1.068.380 KgCO_{2eq}/annuo) rispetto allo Stato di fatto, derivante dal complesso delle azioni progettuali che hanno prodotto un

aumento – non solo di carattere quantitativo ma soprattutto di tipo qualitativo – del 30% (40.121 mq) di spazi verdi, tra i quali si devono considerare anche quelli rappresentati dall'introduzione di 'tetti verdi' e di 'tetti marroni' (1.152 mq), con conseguente recupero di suoli in precedenza degradati. Tale approccio metodologico è tutt'ora in corso anche in un'altra zona di edilizia residenziale pubblica ricadente nel quartiere di San Basilio realizzato negli anni '50, nello specifico tra Via Loreto e Via Casale di San Basilio (Fig. 23), riscontrando, in via preliminare, valori simili alla presente ricerca (Fig. 24).

Conclusioni e prospettive della ricerca | La ricerca ha evidenziato importanti strategie nel campo delle soluzioni green volte a incrementare il benessere ambientale in un quartiere periurbano della Città metropolitana di Roma Capitale, proponendo scenari di intervento mirati al fine di incrementare le capacità di stoccaggio di carbonio dall'atmosfera attraverso azioni di riforestazione urbana con specie autoctone e ad alta capacità di mitigazione ambientale.

Le prospettive per la ricerca, basate sulla messa a punto di metodologie di calcolo e verifica secondo la costituzione di solidi e scientificamente affidabili database, calibrati sui caratteri del contesto nazionale e in particolare su quelli di aree costituenti quartieri urbani e periurbani di città, potranno riguardare l'incremento delle specie arboree e arbustive censite, ampliando progressivamente il campo di applicazione sull'intero territorio nazionale (e in teoria, in una prospettiva di crescita, sulla dimensione almeno europea, per non dire mondiale), al fine di fornire alla comunità

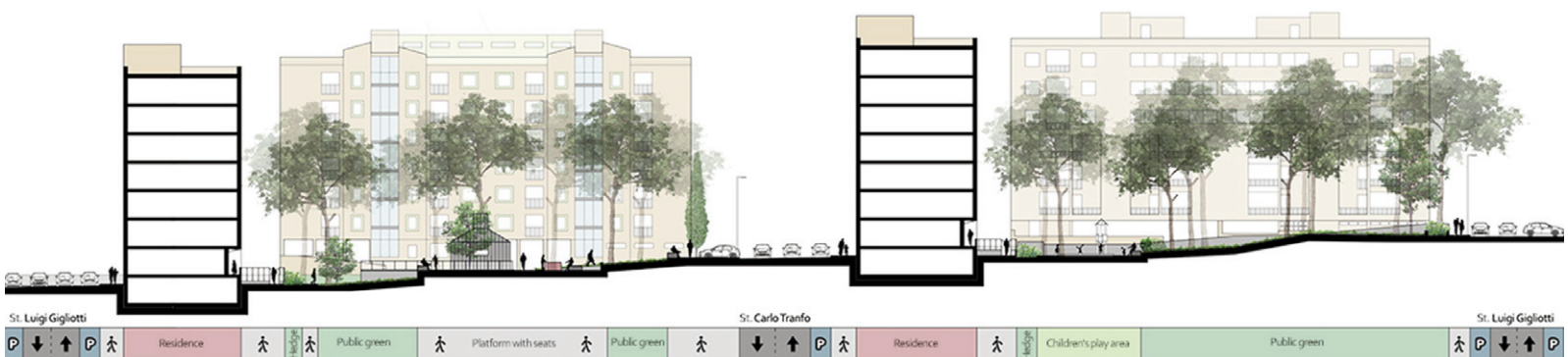
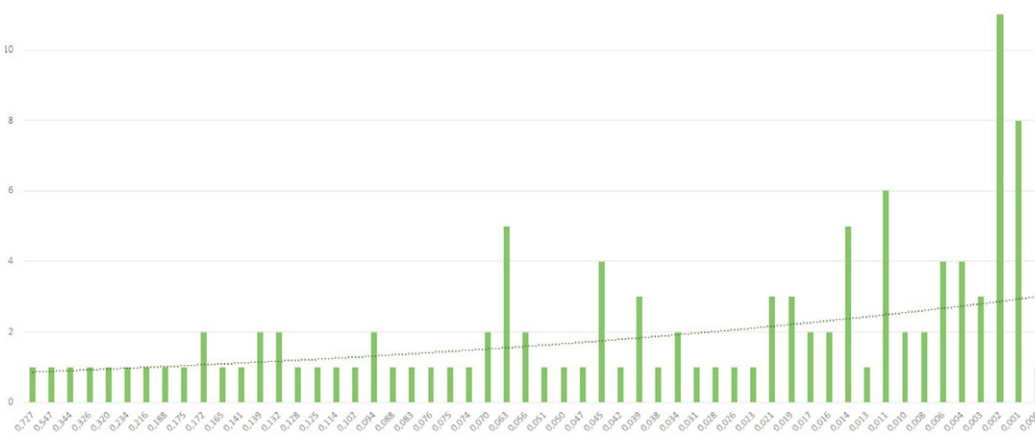


Fig. 6 | Frequency plot of 'taxonomic stocking index' (TS) applied to surveyed species (credit: F. Tucci and M. Giampaolletti, 2022).

Fig. 7 | Aerial photo of the PdZ of San Basilio (credit: Cartoteca PDTA, 'Sapienza' Università di Roma, 2014).

Fig. 8 | Section profile of the PdZ of San Basilio between Luigi Gigliotti St. and Carlo Tranfo St. (credit: F. Tucci and M. Giampaolletti, 2022).

scientifico e agli attori del processo – quali quelli del settore pubblico e privato auspicabilmente favorevoli all'incremento delle conoscenze verso tali strategie e pratiche, come nel caso del PdZ di San Basilio presentato a titolo esemplificativo in questo contributo – un curato e dettagliato modello di calcolo dell'assorbimento di carbonio realmente conseguibile, volto a favorire, nei processi di riqualificazione di spazi aperti, l'introduzione di individui autoctoni, disincentivando le specie aliene, spesso fortemente invasive (European Commission, 2021).

L'incremento delle specie arboree e arbustive censite e implementate nel database presentato concorrerà inoltre ad affinare e migliorare l'indice tassonomico di stoccaggio (TS) in quanto applicabile in ogni area nazionale e, in prospettiva, europea (finanche del globo) e confrontabile tra più aree, anche distanti tra di loro, attraverso l'impiego dell'indice tassonomico di stoccaggio medio (TSM). Quest'ultimo inoltre potrebbe trovare una potenziale relazione con il numero di essenze arboree e arbustive che compongono un'area di intervento quale può essere un quartiere o un distretto di una città; nel caso proposto, ricadente nella Città metropolitana di Roma Capitale, non è stato possibile eseguire tale applicazione in modo integrale sull'intero territorio metropolitano in quanto non è presente ad oggi un censimento completo e dettagliato delle masse arboree e arbustive presenti, ma solo quello delle essenze arbustive presenti nei parchi e spazi verdi gestiti dalla Amministrazione Comunale, costituendo pertanto un limite alla presente ricerca.

Ulteriori prospettive future di ricerca potranno infine riguardare il confronto tra quartieri e distretti di una medesima città o di città europee e mondiali volto a perfezionare l'indice tassonomico di stoccaggio medio (TSM) indagando sulle potenziali relazioni di quest'ultimo con le certificazioni ambientali e standard energetici spesso presenti in interventi di rigenerazione urbana, come presenti nei distretti ecologici Aspern Seestadt a Vienna e Clichy Batignolles a Parigi, in un'ottica di quantificazioni delle riduzioni di emissioni di carbonio in atmosfera.

In light of the latest European policy proposals adopted in the matter of climate, energy, land use, transport, and responsible resource management in resilient, flexible, adaptive, and sustainable districts, the green transformation of cities and urban and peri-urban areas has become a pressing issue. Climate change, higher impacts by carbon emissions, and the growing European energy crisis – accentuated of late, with the geopolitical crisis in progress, by the increased costs for obtaining and procuring the natural gas upon which member states depend for more than 42% of their needs (EEA, 2021) – have necessitated urgent policies and actions to make the cities' inhabitants more resilient and responsible towards the impacts derived from sudden economic, social, and environmental change.

Although mitigation measures (and also adaptation measures, especially if integrated with them) to keep the global temperature rise to below 1.5 °C might prevent some of the most devastating impacts of the climate change in progress, we

| Species | Number registered |
|---------------------------------|-------------------|
| <i>Acacia dealbata</i> | 4 |
| <i>Acer platanoides</i> | 10 |
| <i>Acer saccharinum</i> | 21 |
| <i>Ailanthus altissima</i> | 31 |
| <i>Cedrus atlantica</i> | 9 |
| <i>Citrus limon</i> | 2 |
| <i>Cupressus sempervirens</i> | 17 |
| <i>Eucalyptus camaldulensis</i> | 12 |
| <i>Fagus sylvatica</i> | 41 |
| <i>Juglans regia</i> | 11 |
| <i>Laurus nobilis</i> | 70 |
| <i>Liriodendron tulipifera</i> | 6 |
| <i>Magnolia grandiflora</i> | 4 |
| <i>Malus domestica</i> | 3 |
| <i>Olea europaea</i> | 6 |
| <i>Pinus nigra</i> | 4 |
| <i>Pinus pinea</i> | 30 |
| <i>Platanus hispanica</i> | 6 |
| <i>Prunus avium</i> | 5 |
| <i>Quercus ilex</i> | 10 |
| <i>Robinia pseudoacacia</i> | 34 |
| <i>Tilia cordata</i> | 38 |
| Total | 374 |

Tab. 3 | Classification and numerical quantification of tree and shrub species in the PdZ of San Basilio (credit: F. Tucci and M. Giampaolletti, 2022).

know all too well that their implementation is clearly lagging behind the timetable set out in 2015, and that if mean temperatures were to rise by 1.7-1.8 °C, ecosystems deemed vulnerable today would see their likelihood of extinction double – a likelihood that would increase tenfold with a +3 °C rise (IPCC, 2022). The concern is growing, as is the urgency of a serious decarbonization operation, especially in cities.

Among the urban regeneration measures aimed at decarbonizing districts, we may include the practices of afforestation and reforestation, as well as environmental technology solutions – and especially nature-based solutions – capable of providing responses to climate change and improved quality of life, which are issues increasingly connected to urban growth (Tucci, 2018). The strategy of incentivizing actions and solutions for green infrastructures fits into a broader scientific discussion on developing methods and tools of integrated dissemination aimed at the sustainability of urban transformations, with a view to deep renovation (Andreucci, 2017). The paper's originality may be seen in its development of an overview of use for operators in the sectors of urban reforestation, silviculture, and green solutions, with the main goal of contributing towards halving carbon emissions by 2030 and achieving carbon neutrality by 2050 (IPCC, 2019). This arrangement aims at defining and cataloguing currently available so-

lutions and strategies for reducing carbon emissions in urban districts, which are responsible for 36% of final energy consumption and 39% of total carbon dioxide emissions worldwide (IPCC, 2021).

Research methodology and operative phases

This paper illustrates one of the main results of the research, whose general goal was to build a database of the main tree and shrub species present in the metropolitan City of Rome that have high capacities for environmental mitigation and absorbing greenhouse gases. This methodological tool, which might be made available to local authorities while also being of use for private citizens and enterprises, is aimed at communicating the levels of carbon dioxide absorption and storage of each analysed species. In drawing up the database, a 'qualitative/quantitative taxonomic storage index' was introduced, aimed at raising awareness among operators in the sector as to the use of native tree species with a high capacity for environmental mitigation which are, therefore, more sustainable from that perspective (improving the hygrothermal well-being of the land area as well as the selective capacities of filtering urban air pollutants).

The index was structured primarily based on a review of the literature taken from the ActaPlantarum and Dryades lists of websites, starting from 2007 and 2021 respectively (Pignatti, La Rosa and



| | | | |
|----------------|-------------------|---------------|--|
| Species | ** Cupressus s. | — N. oleander | ☐ Total area 135.574 mq |
| ▶ Acacia d. | ● Eucalyptus c. | ● Olea e. | ☐ Green area 53.473 mq |
| ○ Acerp. | ● Eriobotrya j. | ● Pinus n. | ☐ Total tree 374 species |
| ○ Acers. | ○ Fagus s. | ● Pinus p. | ☐ CO ₂ absorbed 360.576 KgCO _{2eq} /yr |
| ○ Ailanthus a. | ○ Juglans r. | ○ Platanus h. | |
| — Arundod. | ● Laurus n. | ● Prunus a. | |
| ● Cedrus a. | ○ Liriodendron t. | ● Quecus i. | |
| ○ Cercis s. | ● Magnolia g. | ○ Robinia p. | |
| ● Citrus l. | ○ Malus d. | ○ Tilia c. | |

Guarino, 2017; Città metropolitana di Roma Capitale, 2021). This review was aimed at finding out the tree and shrub species present in the metropolitan area and quantifying their degree of carbon absorption. It bears specifying that this analysis excluded grass species, given their lower CO₂ absorption capacity than that of tree and shrub species. Investigations in the field in the metropolitan City of Rome, in both urban and peri-urban areas, have yielded a list richer than that in the above-cited literature. Subsequently, a database was created using Excel Suite Office 2020 software, in which, for each plant species, the following information is reported:

1) Scientific name of the species, which is to say the Linnean binomial (composed of generic name, specific epithet and patronym – the name of the person who first discovered the species); the nomenclature was drawn from ActaPlantarum and Dryades starting in 2007 and 2021 respectively; 2) Photograph of the species (from ActaPlantarum);

3) Number of individuals per species present in the Città metropolitana di Roma Capitale (2021); 4) Exoticity status (Galasso et alii, 2018): autochthonous when the species' presence is spontaneous and therefore does not depend on man's presence, or allochthonous when its presence is linked, by design or by chance, to human action; 5) For the allochthonous species, the time of introduction according to two currently recognized categories: 5a) archeophytes, species before 1492, which is to say before European colonialism after the discovery of America; 5b) neophytes, species introduced after 1492; 6) For the allochthonous species, the naturalization status: 6a) Accidental: species that develop and reproduce spontaneously, but cannot form stable populations; 6b) Naturalized, species that form stable populations regardless of the contribution of new propagules by people; 6c) Invasive, a subgroup of naturalized species able to spread quickly, at considerable distances from the sources of original propagules, and there-

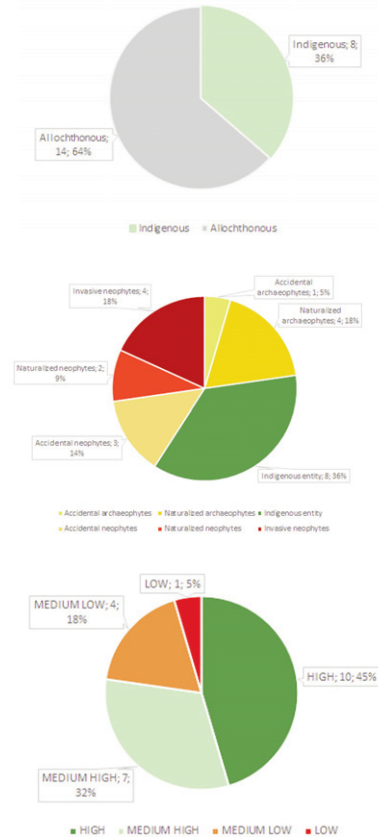


Fig. 9 | Vegetation census of the PdZ of San Basilio in the Autumn-Winter period with quantification of the main environmental parameters (credit: F. Tucci and M. Giampaolletti, 2022).

Fig. 10 | Exotic status of tree and shrub species surveyed in the PdZ of San Basilio (credit: F. Tucci and M. Giampaolletti, 2022).

Fig. 11 | Overall status of tree and shrub species surveyed in the PdZ of San Basilio (credit: F. Tucci and M. Giampaolletti, 2022).

Fig. 12 | Carbon uptake capacity of tree and shrub species surveyed in the PdZ of San Basilio (credit: F. Tucci and M. Giampaolletti, 2022).

fore with the potential to spread over large areas; 7) Simplified chorotype, according to an initial classification reported by ActaPlantarum and reclassified here to homogenize the geographic macro-areas of origin (Table 1); 8) Biological form, according to the classification reported by ActaPlantarum; the categories are defined based on adaptations to protect the buds during the unfavourable season: 'Arboreal phanerophytes' (P scap), woody plants with a treelike habit and buds placed at more than two metres from the ground; 'Nano- Phanerophytes' (NP), woody plants with perennial buds place between 20 cm and 2 m from the ground; 'Shrub phanerophytes' (P caesp), woody plants with shrub habit; 'Rhizome geophytes' (G rhiz), perennial plants with rhizome, an underground stalk from which roots and above-ground stalks depart every year; 9) Use, in accordance with the following use types: artisanal, comestible, cosmetic, forest, melliferous, officinal, ornamental, afforestation, shielding;

10) carbon dioxide, absorption capacity, according to the analyses of CO₂ storage at 20 years, in tons, of each tree/shrub species (Regione Toscana, 2018).

Development of a 'qualitative/quantitative taxonomic storage index' (TS) | The development of a 'qualitative/quantitative taxonomic storage index' (TS) based on a species' capacity to absorb carbon from the atmosphere and on exoticity status, was conceived as a mathematical ratio, with the degree of absorption (C) being the numerator, and exoticity (E) the denominator: $TS = C / E$.

With the ratio between the capacity to absorb carbon in the atmosphere and exoticity status, the Index takes on values of between 0 and 1, in which, for values tending towards 0, the choice of species becomes less sustainable, with the choice becoming more sustainable² for values tending towards 1. A second index that was developed is the 'mean taxonomic storage index' (T_{Sm}), applicable to a specific area of study and researched by the mean of a 'taxonomic storage index' defined for each inventoried species, and therefore of use for comparing different areas and spaces – such as a city's neighbourhoods; this index also takes on values of between 0 and 1. As to CO₂ storage capacity (C) – provided in tons, at 20 years, with the unit of measurement in tons/years – the destruction frequencies were graphed, with the number of species (frequency) being the y-axis and the storage values the x-axis (Fig. 1). The visualization of the 2nd-order polynomial trendline allowed 4 main frequency peaks to be identified. Based on them, a 4-category classification of storage values was proposed: Low (range 0.02-0.129 t/20a); Medium-low (range 0.130-0.799 t/20a); Medium-high (range 0.800-2.799 t/20a); and High (range >2.800 t/20a).

As to the unit of measurement used for storage capacity (tons), since one species ('Pinus pinea') has, in relative terms, very high values in comparison with all the other considered species, the unit (t/20 years) was converted into Kg/quarter out of the mere mathematical necessity of the index's calculation. Autochthony/exoticity (E) was characterized, also considering the different levels of autochthony, by proposing the classification of the various items, as illustrated in Table 2. As to the choice of values, 1 (as the classification's base value) was assigned to all autochthonous and spontaneous species in the territory of the metropolitan City of Rome; this value was assigned to emphasize a correct and sustainable choice in environmental terms. As to the other exotic types, considering that they grow less and less sustainable in the proposed scale, and referring to the index's structure as a ratio, increasing values are assigned in such a way that a greater level of exoticity yields a lower Index value, consequently pointing to a less appropriate choice in terms of environmental sustainability.

The choice of using values of 0.125 as a passage from one exotic type to another (done after numerous mathematical proofs) yields final results that can be read and processed. In defining the Index, each analysed species' degree of absorption (C) is placed in relation to the species with the highest recorded carbon storage capacity ('Pinus pinea'): $C = CKg/quarter ('Pinus pinea') /$

$CKg/quarter$ (analyzed species). This value C was then made the numerator for determining the 'qualitative/quantitative taxonomic storage index' (TS).

Graphic rendering and results of the tree and shrub inventory according to the established database | Overall, 112 species were surveyed, with a predominance of shrub species, a prevalent biological form of scapose phanerophytes, and an allochthonous exotic status. Of these, 75% (46 species) consist of neophytes and archeophytes (25%, 15 species). As for overall status, these species are composed, in uniform percentages, mainly of naturalized archeophytes (12%, 13 species), invasive neophytes (9%, 10 species),

naturalized neophytes (12%, 14 species), and accidental neophytes (20%, 22 species) (Fig. 2). The analysis of the simplified chorotype (the so-called simplified Chorological Spectrum; Fig. 3) showed a comparable percentage for alien species equal to 28% (31 species), Eurasian species equal to 28% (31 species), Mediterranean species equal to 23% (26 species) and Euro-Caucasian species equal to 20% (23 species), while Euro-Siberian species account for barely 1% (1 species). The alien species (Fig. 4) are prevalently North American in origin, with 52% (16 species) and, to a lesser degree, Asiatic, thereby confirming the strong presence of invasive and non-native species in the surveyed location. Analysis of the uses of the

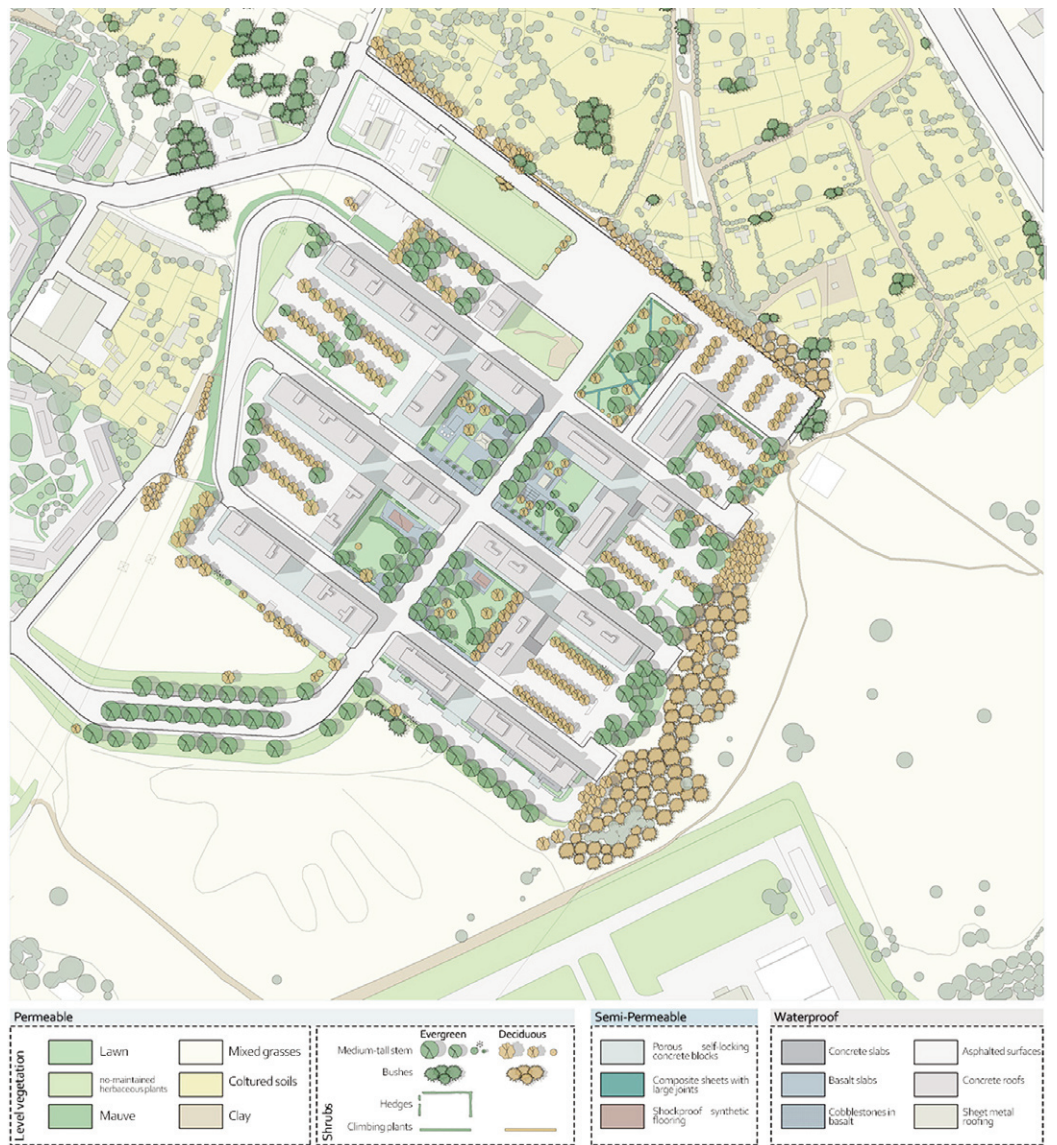
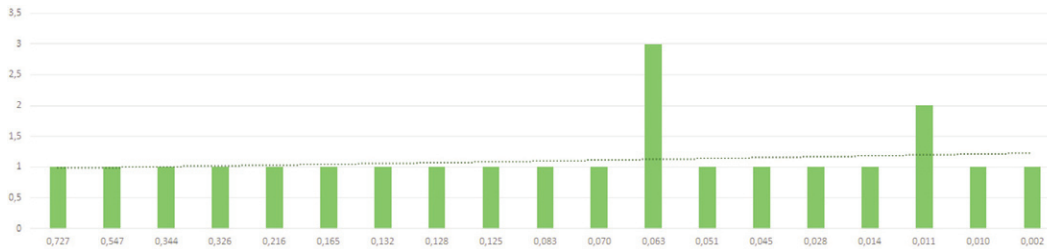


Fig. 13 | Distribution frequency graph of the 'taxonomic stocking index' (TS) of the tree and shrub species surveyed in the PdZ of San Basilio. (credit: F. Tucci and M. Giampaolletti, 2022).

Fig. 14 | Analysis of tree masses and soil permeability in the PdZ of San Basilio (credit: F. Tucci and M. Giampaolletti, 2022).

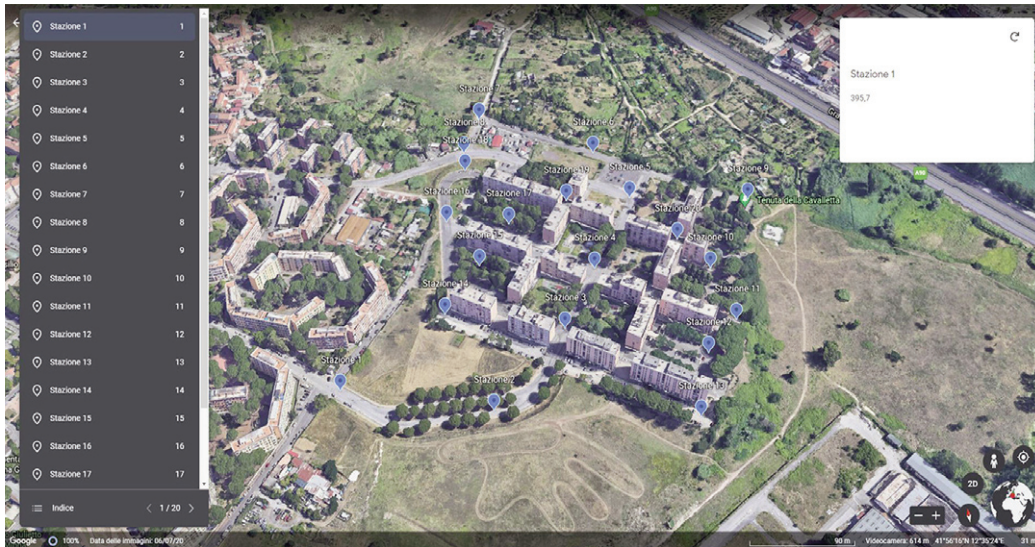


Fig. 15 | Insertion of surveyed environmental data in Google Earth connected to the Google Drive cloud platform (credit: F. Tucci and M. Giampaolletti, 2022).

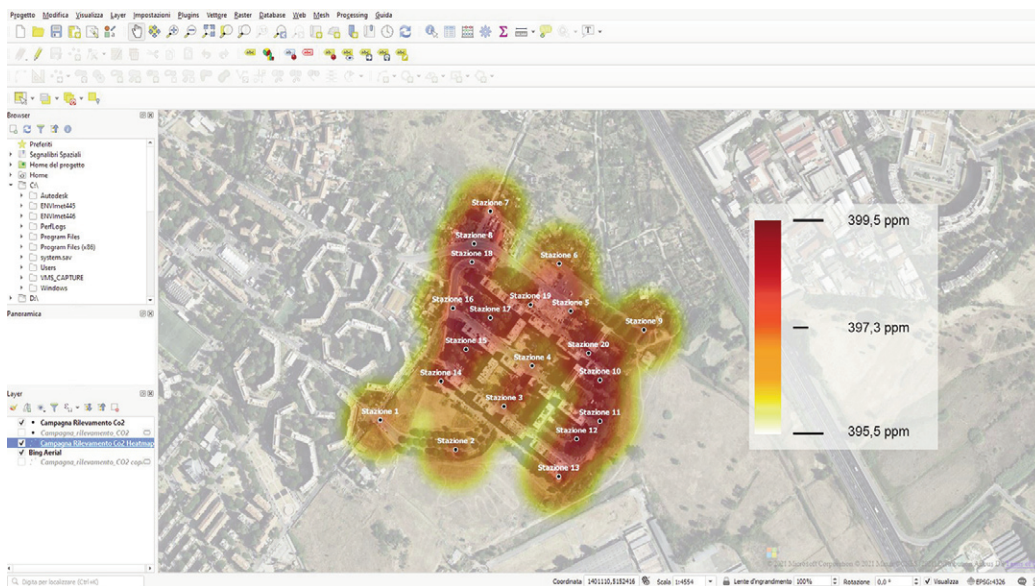


Fig. 16 | Heatmap of the surveys performed on June 21, 2021 (credit: F. Tucci and M. Giampaolletti, 2022).

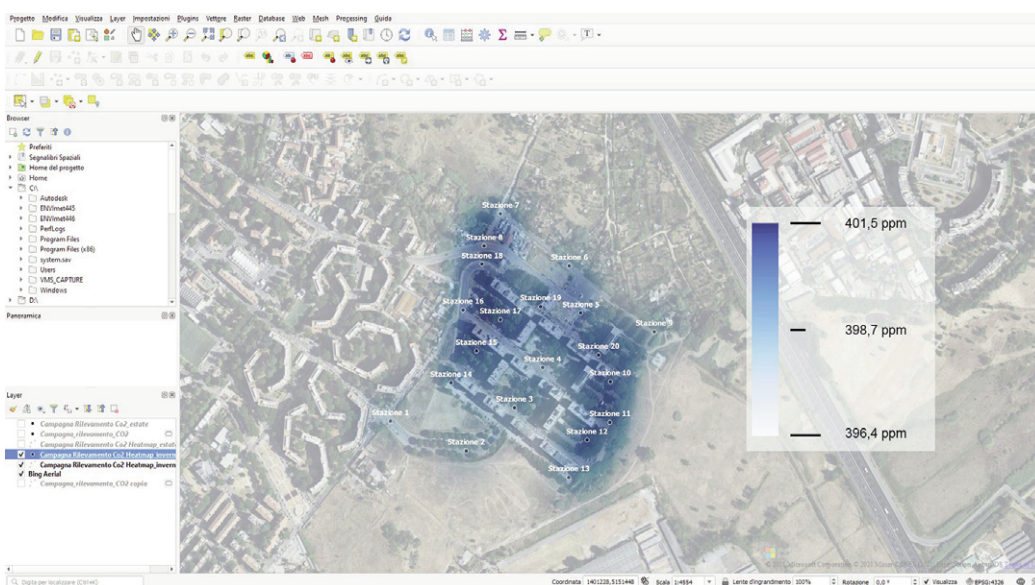


Fig. 17 | Heatmap of the surveys performed on December 21, 2021 (credit: F. Tucci and M. Giampaolletti, 2022).

tree and shrub species (Fig. 5) prevalently showed the Ornamental (25%), Official (21%), Forest (20%), and Reforestation (11%) types, presenting an average of 2.7 uses, which shows how many of them are used for multiple purposes and functions.

The visualization of the frequencies graph (Fig. 6) allowed an exponential curve to be used to identify the qualitative trend of the surveyed species. In specific terms, the highest index value equals 0.727, for 'Pinus pinea', a naturalized archeophyte species in the metropolitan City of Rome, non-spontaneous but with a high carbon storage capacity (equal to 320 Kg/quarter). Overall, the graph shows a stock of trees and shrubs that is not very environmentally sustainable, and an extremely low index (57 tree and shrub species surveyed with an index under 0.021). This result is closely linked to their storage capacity and degree of exoticity. The TSm of the analysed and surveyed species equals 0.103.

Experimentation on the case of the San Basilio zone plan a Roma | The public housing neighbourhood of San Basilio (designed by M. Fiorentino, 1951-1955) is located in district IV of the municipality of Rome, and is home to 4,680 public housing units (Fig. 7); it covers a total area of 135,574 sqm, of which 53.473 sqm are classified as open spaces. Seventy percent of these units are managed by the local public housing agency (ATER – Azienda Territoriale per l'Edilizia Residenziale pubblica, formerly IACP – Istituto Autonomo Case Popolari), and 30% by the Municipality, and in specific terms are located in former zone plan 02V – San Basilio. In recent years, the crowding index has declined drastically: the neighbourhood's young families are seeking homes elsewhere due to a severe dearth of primary services, as well as the overall decay of the open spaces – conditions that, over time, have lowered real estate values while often fostering situations of low-level organized crime.

By studying and analysing the zone plan's green aspects (Fig. 8) after onsite inspections taking place over several days to learn, analyse, and survey the tree and shrub species constituting the area being studied, 22 tree and shrub species were inventoried and catalogued, with a prevalence of 'Ailanthus altissima', 'Cedrus atlantica', 'Robinia pseudoacacia', and 'Eucalyptus camaldulensis', totalling 374 average-height and tall individuals with total storage equalling 360,576 KgCO_{2eq}/year (Table 3). These arboreal masses yield a shaded area equal to 30% of the open spaces, which are constituted mainly of lawn surfaces (with a prevalence of such grass species as 'Poa pratensis' and 'Festuca arundinacea') and land zoned for 'sowing' (Fig. 9).

The surveyed species (Fig. 10) are prevalently Allochthonous (64%, 14 species) with low environmental sustainability according to the exoticity status (Fig. 11) mainly of the Indigenous type (36%, 8 species), followed by invasive neophytes (18%, 4 species), naturalized archeophytes (18%, 4 species), accidental neophytes (14%, 3 species), naturalized neophytes (9%, 2 species), and accidental archeophytes (5%, 1 species). The overall capacity for absorbing CO₂ from the atmosphere of the current tree masses and the level of green spaces was estimated at 360,577 KgCO_{2eq}/year. This absorption capacity (Fig. 12)

is on the whole of Medium-high and High levels; the species with the highest potential carbon absorption and storage potential is 'Pinus pinea', a non-spontaneous naturalized archeophyte species in the metropolitan City of Rome. The TS applied for the surveyed species (Fig. 13) presents a uniform distribution frequency, with a maximum value equal to 0.727, a minimum value of 0.002, and a mean value of 0.163. The TSm of the analysed and surveyed species equals 0.147, a value 43% higher than the average found for the tree and shrub inventory of the species present in the metropolitan City of Rome.

Onsite measurements of CO₂ concentration

| The conclusion of the phase of surveying the tree and shrub masses in the intervention area (Fig. 14) introduces onsite experimental measurement campaigns to measure the concentrations of carbon in the atmosphere at two specific moments in 2021: during the summer solstice on 21 June 2021, at 07:00 AM, with a measured temperature of 25 °C, relative humidity equal to 70.1%, a maximum recorded windspeed equal to 3.2 m/s, and 30% cloud cover; and during the winter solstice on 21 December 2021, at 5:00 PM, with a measured temperature of 9 °C, relative humidity equal to 99.1%, a maximum recorded wind-speed equal to 7.2 m/s, and cloud cover 55%. The above dates are justified in order to quantify the maximum variation – in terms of concentrations – of carbon in the atmosphere by the presence, for deciduous species, of summer foliage capable of absorbing carbon, and its absence in the winter period.

The area's conformation allowed 20 measurement stations to be defined, surveyed within the local roads of the San Basilio zone plan (Fig. 15); this information was entered into Google Earth, a virtual software synced with the Google Drive cloud platform, where the acquired values were subsequently exported, with the extension .kml, to QGIS, a desktop GIS open-source application, in order to georeference these stations in accordance with the WGS84 Reference System.³

The concentrations measured by the stations (in parts per million, ppm) using scientific instruments (Multi-Functional Air Quality Detector, mod. Temtop M2000) were then expressed in QGIS by two graphic concepts: the first in precise points to comprehend exactly the location of the sampling that was performed; the second one diffuse, through the development of a concentration map. The experimental survey showed, in the summer solstice, a peak CO₂ concentration equal to 399.5 ppm, measured mainly inside the buildings' enclosed courtyards (an arrangement that does not permit proper ventilation), and lower concentrations in the open spaces that are peripheral to the zone plan, with a minimum measured value of 395.5 ppm (Fig. 16). The measurement on the day of the winter solstice was carried out with the same criteria as that done on the summer solstice, specifically finding peak CO₂ concentration equal to 401.5 ppm inside the buildings' enclosed courtyards and the building fabric connecting the zone plan to the San Basilio neighbourhood (Fig. 17); these concentrations are higher than those during the summer due to the lack of masses of deciduous vegetation and to the increased energy consumption caused by the heat-



Fig. 18 | Proposal for greening intervention in the PdZ of San Basilio (credit: F. Tucci and M. Giampaolletti, 2022).

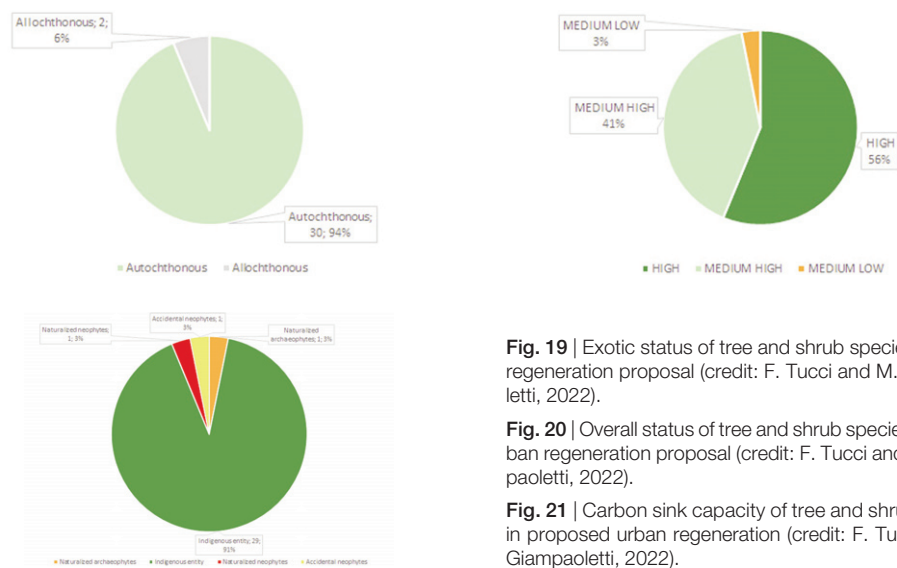


Fig. 19 | Exotic status of tree and shrub species in urban regeneration proposal (credit: F. Tucci and M. Giampaolletti, 2022).

Fig. 20 | Overall status of tree and shrub species in the urban regeneration proposal (credit: F. Tucci and M. Giampaolletti, 2022).

Fig. 21 | Carbon sink capacity of tree and shrub species in proposed urban regeneration (credit: F. Tucci and M. Giampaolletti, 2022).

ing of the housing units constituting the zone plan.

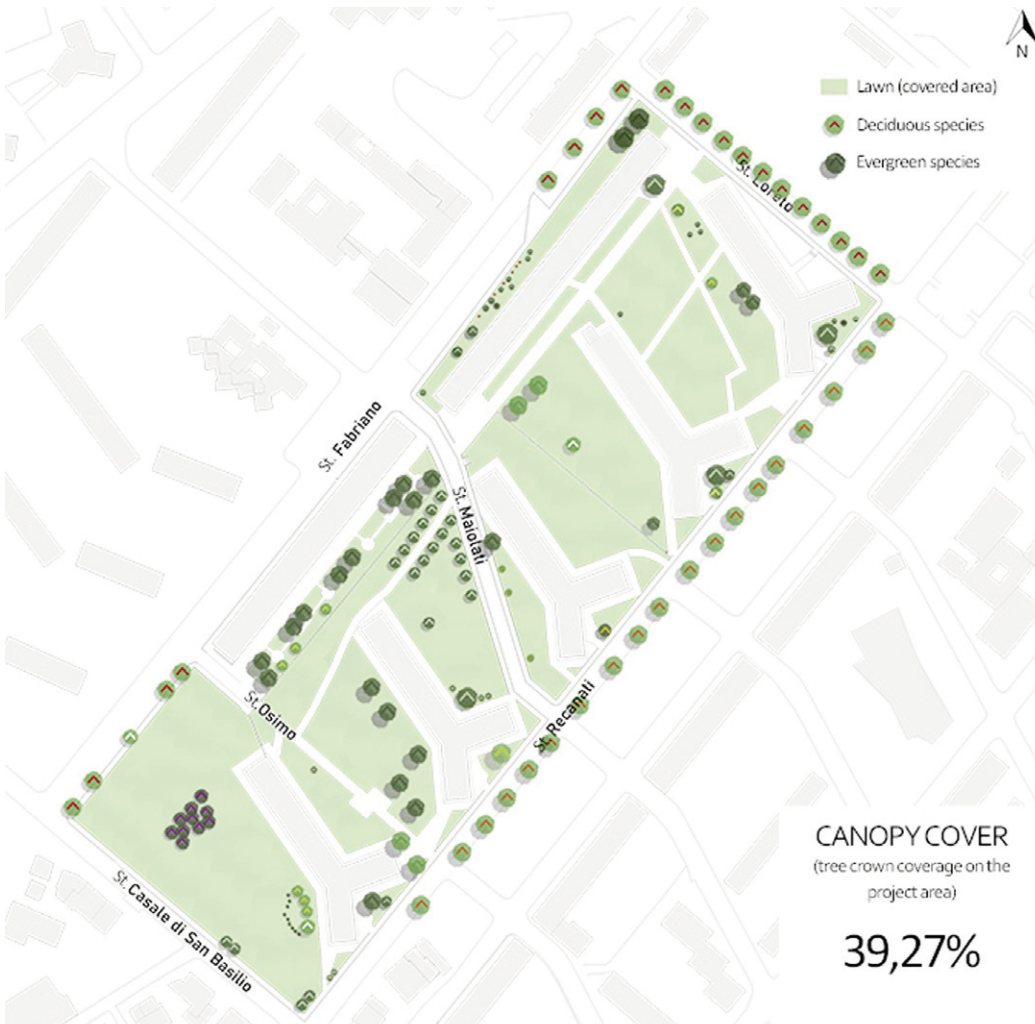
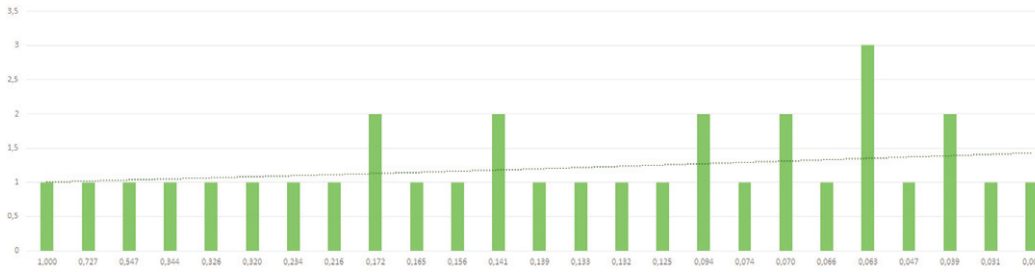
The proposed greening intervention aimed at removing carbon and increasing environmental quality

| The proposed intervention for the entire San Basilio zone plan is based on the one hand on increasing – in a targeted and planned (and simulated) way – the already existing masses of vegetation, autochthonous and with a high capacity for environmental mitigation, by eliminating potentially allochthonous and invasive species; and on the other hand on recovering, repurposing, and valorising the open spaces, while raising their overall environmental quality (Fig. 18).

The proposed scenario called for strengthening resilient autochthonous species, including 'Fagus sylvatica', 'Olea europaea', and 'Pinus pinea', and for introducing 5 more sustainable plant species with high capacities of environmental mit-

igation in absorbing and storing carbon from the atmosphere, such as 'Pinus halepensis', 'Populus tremula', 'Quercus pubescens', and 'Quercus suber'⁴. In addition, 128 infesting and invasive trees and shrubs were uprooted, including, for example, 'Acacia dealbata', 'Ailanthus altissima', 'Junglas regia', and 'Robinia pseudoacacia', as well as shrub species, mainly Pinus pinea that were too close to buildings and created problems of natural ventilation and shading in the inspections performed during the summer and winter periods, also bringing clear problems of structural hazard as found using the VTA (Visual Tree Assessment) technique.⁵

More than 70 'Laurus nobilis' shrubs were conserved, defining the 200 metres of hedges and roadside shrubbery present in the intervention area. Overall, 587 new tree and shrub individuals were introduced, allocated to decayed, recovered,



and requalified areas (32 genera for a total amount of 961 individuals), for a total carbon absorption equalling 506.816 KgCO_{2eq}/year. The 32 species present in this requalification scenario are, nearly exclusively, prevalingly autochthonous (94%, 30 species; Fig. 19), with a considerable increase of environmental sustainability demonstrated, according to the Exoticity status (Fig. 20), by the constitution of mainly indigenous-type species (91%, 29 species), followed by accidental neophytes (3%, 1 species), naturalized neophytes (3%, 1 species), and naturalized archeophytes (3%, 1 species).

Discussion of the results | The adoption of the strategies described above-defined planning lines verifiable through the quantification of the effects they introduce into the experimentation area. In detail, these green solutions are related to: increasing the stock of trees and shrubs by valorising the existing sustainable species; introducing new autochthonous ones with high environmental sustainability that are spontaneous in the metropolitan territory of Rome; increasing wetland areas; and valorising open spaces. The capacity of the area's tree stock to absorb CO₂ from the atmosphere, as resulting from the planned and simulated operations of introducing and eliminating given species (Fig. 21), is, on the whole, at a high level, thus improving the absorption performance over the current state.

It bears noting that the species with the highest potential for absorbing and storing carbon is 'Pinus halepensis', an indigenous and spontaneous entity in the metropolitan City of Rome, and with a high capacity for environmental mitigation; it is no coincidence that it was among the species introduced into the area's urban reforestation plan. The TS applied for the species present in this scenario (Fig. 22) shows a uniform distribution frequency with the maximum value of 1, a minimum value equal to 0.008, and a TSm equal to 0.188, increasing by 28% over the current state the environmental capacity of carbon absorption about exoticity status.

The mix of the environmental strategies determines, overall, a +183% (1,068,380 KgCO_{2eq}/year) increase in CO₂ absorption over the current state, derived from the complex of design actions that yielded improved quality as well as a 30% (40,121 sqm) increase in green spaces, among which account must also be taken of those represented by the introduction of 'green roofs' and 'brown roofs' (1,152 sqm), with a consequent recovery of formerly degraded land. This methodological approach is still underway in another public housing area in the San Basilio neighbourhood built in the 1950s, specifically between Via Loreto and Via Casale di San Basilio (Fig. 23), yield-

Fig. 22 | Distribution frequency graph of the 'taxonomic stocking index' (TS) for tree and shrub species in the urban regeneration proposal (credit: F. Tucci and M. Giampaolletti, 2022).

Fig. 23 | Census of the masses of trees and open spaces in the nearby area of intervention between Loreto St. and Casale St. of San Basilio (credit: F. Tucci and M. Giampaolletti, 2022).

Fig. 24 | Preliminary design proposal for environmental mitigation in the nearby area of intervention between Loreto St. and Casale St. of San Basilio (credit: F. Tucci and M. Giampaolletti, 2022).

ing, preliminarily, values similar to this research (Fig. 24).

Research conclusions and future outlooks |

The research emphasized important strategies in the field of green solutions aimed at increasing environmental well-being in a peri-urban neighbourhood of the metropolitan City of Rome, proposing intervention scenarios aimed at increasing the capacity for storing carbon from the atmosphere through actions of urban reforestation with autochthonous species with a high capacity for environmental mitigation.

The future outlooks for the research are based on putting calculation and verification methodologies in place in accordance with the establishment of solid and scientifically reliable databases calibrated to the characteristics of the national context and in particular to those of areas constituting urban and peri-urban city neighbourhoods. And they can involve increasing the surveyed tree and shrub species, while progressively broadening the sphere of application to the whole country (and, in theory, with a view to growth, at least to Europe and even worldwide), to provide the scientific community and the players in the process – such as those in the public and private sector hopefully in favour of increasing knowl-

edge of these strategies and practices, as in the case of the San Basilio zone plan submitted by way of example in the paper – with a thorough and detailed model to calculate the carbon absorption that can be achieved, aimed at fostering, in the processes of requalifying open spaces, the introduction of autochthonous individuals, thus disincentivizing alien and often highly invasive species (European Commission, 2021).

The increase of tree and shrub species surveyed and implemented in the submitted database will also contribute towards refining and improving the ‘taxonomic storage index’ (TS) to the extent applicable in each national – and, in the future, European (and even global) – area, and comparable among several areas even distant from one another, through the use of the ‘mean taxonomic storage index’ (TSM). The latter might also find a potential relationship with the number of trees and shrubs that make up an intervention area as a city district or neighbourhood can be; in the proposed case, within the metropolitan City of Rome, this application could not be fully carried out on the metropolitan territory since there is as yet no complete and detailed inventory of the tree and shrub masses that are present, but only that of the shrubs in the parks and green spaces managed by the Municipal Admin-

istration, thus presenting a limitation on this research.

Lastly, more future research prospects can relate to the comparison between neighbourhoods and districts of a given city or European and world cities, in order to perfect the ‘mean taxonomic storage index’ (TSM) by investigating its potential relationships with the environmental and energy certifications often present in urban regeneration interventions – as they are in the ecological districts of Aspern Seestadt in Vienna and Clichy Batignolles in Paris – to quantify the reductions of carbon emissions in the atmosphere.

Notes

1) A district is an urban or peri-urban area of a city that is the object of potential interventions of urban regeneration and energy efficiency of buildings, using passive bioclimatic solutions, an increased functional mixité, use, reuse, and informed management of resources, sustainable mobility, and actions aimed at achieving decarbonization goals.

2) Autochthonous and spontaneous species with a ‘taxonomic storage index’ (TS) equal to 1 have greater sustainability in terms of capacity to absorb carbon from the atmosphere in relation to their exoticity status (E); in this way, with 1 being the denominator, the index’s value will depend exclusively on the carbon storage capacity (C).

3) WGS84 (World Geodetic System 1984) is a worldwide geodetic system of geographic coordinates based on an ellipsoid of reference developed in 1984.

4) Five new tree and shrub species not surveyed in the requalification area but proposed in the urban regeneration plan because they are autochthonous, sustainable, and spontaneous in the metropolitan City of Rome and with high capacities for absorbing and storing CO₂, were introduced.

5) The VTA method, assessed on biomechanical bases, consists of the visual assessment of external symptoms and warning signals of structural or plant-protection hazards, thus allowing the trees at static risk to be quickly identified.

References

- Andreucci, M. B. (2017), *Progettare Green Infrastruttura – Tecnologie, valori e strumenti per la resilienza urbana*, Wolters Kluwer, Milanofiori Assago.
- Città metropolitana di Roma Capitale (2021), “Bilancio Arboreo”, in *comune.roma.it*, 24/09/2021. [Online] Available at: comune.roma.it/web/it/scheda-servizi.page?contentId=INF70550 [Accessed 25 March 2022].
- EEA – European Environment Agency (2021), “Urban sustainability in Europe – Opportunities for challenging times”, in *eea.europa.eu*, 14/06/2021. [Online] Avail-

able at: eea.europa.eu/publications/urban-sustainability-in-europe [Accessed 25 March 2022].

European Commission (2021), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – Fit for 55 – Delivering the EU’s 2030 Climate Target on the way to climate neutrality*, document 52021DC0550, 550 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021DC0550 [Accessed 25 March 2022].

Galasso, G. et alii (2018), “An updated checklist of the vascular flora alien to Italy”, in *Plant Biosystems*, vol. 152, issue 3, pp. 556-592. [Online] Available at: doi.org/10.1080/11263504.2018.1441197 [Accessed 25 March 2022].

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2022), *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability – Summary for Policymakers*, Switzerland. [Online] Available at: reliefweb.int/report/world/climate-change-2022-impacts-adaptation-and-vulnerability [Accessed 25 March 2022].

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2021), *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis – Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press. [Online] Available at: ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf [Accessed 25 March 2022].

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2019), *2019 Refinement to the Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – Volume 4 – Agriculture, Forestry and Other Land Use*, Switzerland. [Online] Available at: ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html [Accessed 25 March 2022].

Pignatti, S., La Rosa, M. and Guarino, R. (2017), *Flora d’Italia*, voll. 1-4, Edagricole, Bologna.

Regione Toscana (2018), *Piano Regionale per la qualità dell’aria ambiente – Linee guida per la messa a dimora di specifiche specie arboree per l’assorbimento di biossido di azoto, materiale particolato fine e ozono*. [Online] Available at: regione.toscana.it/documents/10180/

4058647/Allegato+1+Linea+guida+Piantumazione+31_10_2018.pdf/c99d86e0-811d-44da-836e-adb6f255f28c [Accessed 25 March 2022].

Tucci, F. (2021), *Climate Responsive Envelopes – Frontiers of technological and performance innovation in the design of the buildings skin | Frontiere dell’innovazione tecnologica e prestazionale nel progetto della pelle degli edifici*, Altralinea Edizioni, Firenze.

Tucci, F. (2018), *Green building and dwelling – Approaches, strategies, experimentation for an environmental technological design | Costruire e Abitare Green – Approcci, Strategie, Sperimentazioni per una Progettazione Tecnologica Ambientale*, Altralinea Edizioni, Firenze.