

## TETTI VERDI SUBTROPICALI A BASSA MANUTENZIONE

Verde spontaneo e profondità del substrato

## LOW-MAINTENANCE SUBTROPICAL GREEN ROOFS

Spontaneous vegetation and substrate depth

Brenda Chaves Coelho Leite, Lucas Gobatti,  
Isabela Gamba Huttenlocher

### ABSTRACT

Le piante spontanee e ruderali possono essere la chiave per un'infrastruttura Verde urbana a basso costo, a bassa manutenzione e in grado di adattarsi al contesto climatico locale. Oltre a fornire una vasta gamma di Servizi Ecosistemici, tali specie sono in grado di sopravvivere in ambienti alterati dall'uomo e di resistere a condizioni a loro avverse, come la scarsità d'acqua e il substrato poco profondo. Il paper mira a individuare sistematicamente gli effetti esercitati dalla profondità del substrato durante i primi mesi di crescita della vegetazione utilizzando il metodo Point-Intercept in tetti verdi estensivi a bassa manutenzione. Rispetto alle ricerche precedenti che si sono concentrate sulla crescita in climi temperati, la sperimentazione in un clima subtropicale umido può contribuire a colmare una grande lacuna, valutando il potenziale a lungo termine di coperture con insediamenti di specie spontanee eterogenee per migliorare l'ecologia urbana e la sua rigenerazione naturale.

Spontaneous and ruderal plants can be the key to a low-cost, low-maintenance urban Green Infrastructure that can adapt to the local climate context. In addition to providing a wide range of Ecosystem Services, such species can survive in environments altered by humans and withstand conditions adverse to them, such as water scarcity and shallow substrate. The paper aims to systematically identify the effects exerted by substrate depth during the first months of vegetation growth using the Point-Intercept method in low-maintenance extensive green roofs. Contrary to previous research focusing on vegetation growth in temperate climates, experimentation in a humid subtropical climate can help to fill a gap by assessing the long-term potential of roofs with heterogeneous spontaneous species establishment to improve urban ecology and its natural regeneration.

### KEYWORDS

tetti verdi, vegetazione spontanea, biodiversità, colonizzazione, soluzioni basate sulla natura

green roofs, spontaneous vegetation, biodiversity, colonization, nature-based solutions

**Brenda Chaves Coelho Leite**, Civil Engineer and PhD, is an Assistant Professor at the Civil Construction Engineering Department of the Polytechnic School, University of São Paulo (Brazil). She has experience in thermal comfort and air quality in buildings, the energy efficiency of buildings, green roofs, Nature-based Solutions, building performance simulation and building energy efficiency. E-mail: bcleite@usp.br

**Lucas Gobatti** is an MSc Student at the Professional Master's Program in Construction Innovation of the Civil Construction Engineering Department, Polytechnic School, University of São Paulo (Brazil). He has experience in the construction of Nature-based Solutions such as green roofs/walls and stormwater planters. E-mail: lucas.gobatti@usp.br

**Isabela Gamba Huttenlocher** is an Environmental Engineering Undergraduate Student at the Hydraulics and Environmental Engineering Department of the Polytechnic School, University of São Paulo (Brazil). She has experience in collecting and analysing laboratory data in green roof models towards vegetation dynamics. E-mail: isagamba@usp.br

L'azione antropica ha danneggiato drasticamente i delicati cicli naturali e gli habitat in diversi contesti locali: le città densamente occupate, come sottolineano Vesuviano e Stovin (2013), possono determinare criticità nella gestione del territorio, rendendo difficile l'impiego di soluzioni basate sulla natura (NbS) come la bioritenzione, la piantumazione di alberi stradali e i parchi pubblici. La vegetazione, come sottolineano ancora Vesuviano e Stovin (2013), è in grado di contenere tali criticità in quanto può essere collocata sui tetti, rendendo così possibili diversi Servizi Ecosistemici (Oberndorfer et alii, 2007) definiti dalla International Union for Conservation of Nature come «[...] the benefits people obtain from ecosystems» (MEA, 2005, p. 40) secondo un approccio innovativo per determinare l'interconnessione uomo-natura. Questo approccio è stato successivamente sintetizzato nel termine di NbS, definito dalla European Commission (2015, p. 5) come «[...] solutions that are inspired and supported by nature».

In quest'ottica, trarre ispirazione dalla natura e sostenere i suoi processi richiede un'osservazione sistemica della natura stessa con l'obiettivo di interagire con i fenomeni naturali. È quindi necessario definire chiaramente il significato di processi naturali e artificiali e Lacerda et alii (2013) lo fanno in maniera semplice; artificiale e naturale sono semplicemente 'orientamenti diversi': gli elementi artificiali sono prodotti (o causati) dall'uomo con una funzione specifica, mentre quelli naturali sono una conseguenza della natura; l'elemento naturale sarà in grado di vivere a lungo in condizioni favorevoli, mentre quello artificiale avrà bisogno di una notevole manutenzione per poter perdurare nel tempo.

Lo stesso ragionamento vale per la vegetazione estensiva sui tetti, spesso erba, talvolta specie esotiche o spontanee, che richiedono interventi periodici per contenerne la proliferazione. Secondo Lundholm (2015) è necessario quindi comprendere le caratteristiche di queste specie spontanee, per sfruttarne al meglio i benefici sull'ecosistema urbano. La crescita spontanea delle colture vegetali messe a dimora dall'uomo sui tetti può essere dunque oggetto di studio, da un lato per contenere i costi di manutenzione, giardinaggio e irrigazione, dall'altro per incrementare Servizi Ecosistemici come la biodiversità e gli habitat per le specie, ma anche per aumentarne il valore estetico e per migliorare la gestione delle acque piovane (Dunnnett, 2015).

Sulla base di tali premesse lo studio che si riporta mira a caratterizzare in modo sistematico gli effetti esercitati dalla profondità del substrato durante i primi mesi di crescita della vegetazione in modelli di tetti verdi a bassa manutenzione. Si tratta di un obiettivo importante, poiché le prime fasi di crescita sono cruciali per comprendere meglio la distribuzione della vegetazione e la sua resilienza (Dunnnett, 2015). Dopo una panoramica generale sui tetti verdi, sugli aspetti più rilevanti legati al contesto della vegetazione spontanea e su alcune caratteristiche peculiari dei climi tropicali e subtropicali, si descrivono i materiali e la metodologia, la sperimentazione, il metodo Point-Intercept, i risultati, una breve discussione sui risultati e le conclusioni.

**Tetti verdi** | I tetti verdi non sono certo una soluzione architettonica nuova; Osmundson (1999) si

definisce come una qualsiasi vegetazione o giardino separato dal suolo attraverso un artefatto; ne esistono diverse tipologie, normalmente classificate in base alla profondità del substrato (dal più ridotto al più profondo) ma anche rispetto al fatto che possono essere estensivi, semi intensivi e intensivi. Secondo Dunnnett et alii (2008), i tipi intensivi possono non essere particolarmente accattivanti in quanto la domanda sociale è indirizzata maggiormente verso tetti leggeri, ecologicamente 'equilibrati' ed esteticamente piacevoli per permettere a una più ampia gamma di persone di utilizzarli efficacemente. La successione tipo degli strati di una copertura verde è riportata in Figura 1 anche se ogni strato può avere caratteristiche particolari a seconda della configurazione della copertura e del tipo di clima. Tuttavia, un elemento rilevante è la composizione del suo substrato, che di solito comprende una gamma specifica di materiali. Ampim et alii (2010) forniscono una rassegna dei materiali per il substrato e delle loro caratteristiche, suddividendoli in componenti naturali e minerali, componenti minerali artificiali o modificati, materiali organici, materiali riciclati o di scarto e a base di schiume plastiche; anche la pacciamatura è un componente importante, in quanto può aiutare il substrato a disperdere meno acqua per evaporazione (Cianciaruso et alii, 2006).

#### Letteratura scientifica sulla vegetazione spontanea

Lundholm (2015) rileva che sebbene i tetti verdi siano strutture artificiali, le dinamiche di sviluppo del tetto sono una diretta conseguenza sia della crescita spontanea della vegetazione, sia delle attività di manutenzione fatte dall'uomo; così, individuati i livelli di 'organizzazione', dall'autopoiesi e dalle dinamiche spontanee ai sistemi ingegnerizzati, l'autore propone nuovi approcci per la progettazione dei sistemi di inverdimento delle coperture che privilegiano l'autoregolazione della vegetazione rispetto a quelli che prevedono un'elevata manutenzione. Inoltre, Lundholm considera rilevante la scelta delle piante poiché la vegetazione in copertura può avere un grande impatto sulle prestazioni del sistema, ad esempio in termini di ritenzione idrica e di inerzia termica (Dunnnett et alii, 2008), pur non mancando di sottolineare i pericoli di affidarsi solo a una colonizzazione spontanea se l'obiettivo principale è legato alla biodiversità, che può essere messa a rischio dalla maggiore adattabilità e aggressività di alcune specie.

Tra le ricerche pubblicate è da segnalare quella di Dunnnett (2015) il quale fa luce non solo sulle fasi iniziali della colonizzazione, ma anche su quelle successive, descrivendo i tetti verdi come ecosistemi dinamici e sottolineando la necessità che i sistemi siano autoregolanti, al fine di ottenere una risposta a lungo termine alle alterazioni ambientali. Nagase, Dunnnett e Choi (2013) mostrano invece come una eccessiva riduzione della profondità del substrato possa anche portare a una riduzione della colonizzazione delle piante. In una ricerca simile, Catalano et alii (2016) hanno analizzato le coperture con vegetazione nelle quali non è stata fatta manutenzione per circa 30 anni, mostrando come la colonizzazione spontanea sia un fenomeno importante e benefico in quanto consente di consolidare la presenza di una selezione botanica tra le comunità vegetali locali. Catalano et alii (2018) hanno anche analizzato regolamenti e linee guida per le coperture verdi in Germania, Svizzera e Ita-

lia, non riuscendo a trovarvi traccia di riferimenti alle ecoregioni e alle caratteristiche delle piante; la loro ricerca ha evidenziato infine la necessità di affrontare, nella progettazione delle coperture verdi, gli aspetti ecologici che intervengono nella compensazione ambientale. Alla luce dei suddetti studi appare evidente che l'analisi sulle dinamiche di crescita delle specie spontanee debba essere condotta in diversi climi, poiché le condizioni ambientali locali sono rilevanti.

Le ricerche pubblicate sul tema si sono concentrate prevalentemente su zone climatiche temperate (Grullón-Penkova, Zimmerman and González, 2020) mentre i pochi studi recenti condotti in climi tropicali e subtropicali hanno evidenziato la necessità di approfondire la conoscenza delle dinamiche di crescita della vegetazione in base alle condizioni dello specifico contesto. Sebbene dai dati incrociati della letteratura ci si aspetti che una minore profondità del substrato ostacoli la proliferazione delle specie messe a dimora fino a una certa profondità (soglia in cui la profondità non è più rilevante) e che le specie spontanee capaci di affrontare meglio la siccità e la minore disponibilità d'acqua crescano più facilmente delle specie messe a dimora in un substrato poco profondo, si ritiene necessaria una indagine approfondita per verificare se anche un substrato poco profondo possa ospitare in modo soddisfacente una varietà di specie e diventare per queste un habitat adeguato. La verifica può essere rilevante per individuare selezioni botaniche per la colonizzazione dei tetti verdi con substrato poco profondo, incentivando così la diffusione di 'tetti leggeri' (Silva, Flores-Colen and Antunes, 2017).

#### Obiettivi, sperimentazione, materiali e metodologia

La ricerca sperimentale che si illustra mira a caratterizzare sistematicamente i primi mesi di crescita della vegetazione nelle coperture, perché ritenuti cruciali per meglio comprendere le dinamiche di colonizzazione e la sua resilienza (Dunnnett, 2015); il contributo si caratterizza per originalità in quanto riporta una sperimentazione in un contesto subtropicale umido per il quale mancano dati esaustivi e scientificamente robusti per definire sistematicamente le modalità di crescita di specie spontanee ai fini di un loro successivo più ampio utilizzo.

Per realizzare gli obiettivi della ricerca, la sperimentazione è stata condotta a San Paolo (Brasile) in un contesto climatico di transizione tra le regioni tropicali e subtropicali del Paese, come si evince nella classificazione del clima di Köppen Geiger (Alvares et alii, 2014): su una scala più ampia, Martinelli (2010) classifica la Città di San Paolo come Cwa (Zona Subtropicale Umida, con inverno secco ed estate calda) e Aw (Zona Tropicale, con inverno secco). Sono stati effettuati dei test attraverso i quali è stata messa a punto una metodologia per il campionamento sistematico e la caratterizzazione delle dinamiche di sviluppo della vegetazione. La sperimentazione è stata eseguita su quattro banchi di prova all'aperto, che simulano una copertura a verde, ciascuno della dimensione di 1,40 x 1,30 metri con diverse profondità di substrato (6, 10, 15, 20 cm) ma con gli stessi elementi strutturali. La distribuzione e la profondità del substrato sono mostrate in Figura 2. Sebbene dai banchi di prova si possa rilevare una varietà di parametri, tra cui le prestazioni idriche e



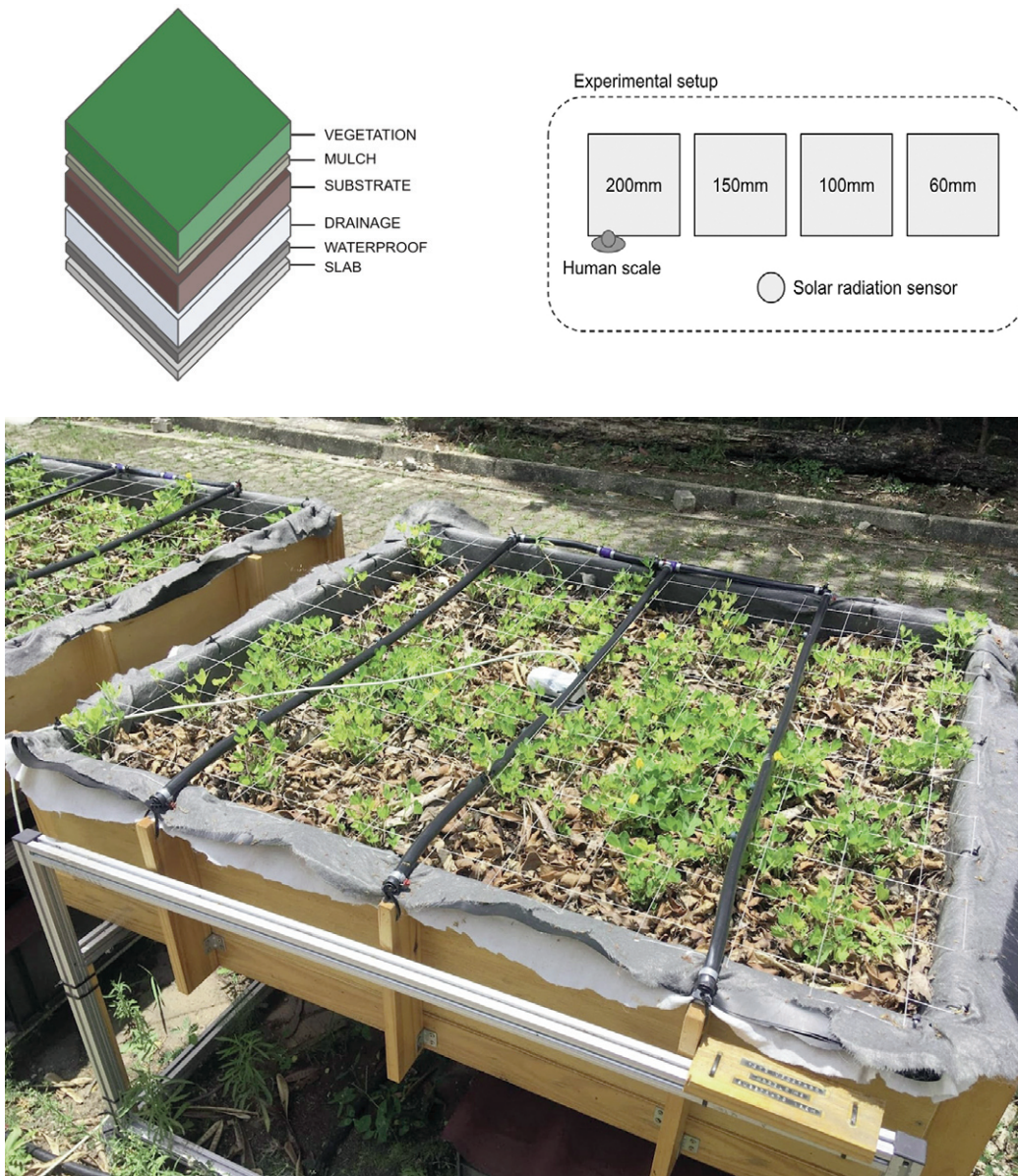


Fig. 1 | Vegetated roofs have typical layers and slab structure support (credit: the Authors).

Fig. 2 | Testbeds outdoor experimental setup, substrate depths and solar radiation sensor positioning (credit: the Authors).

Fig. 3 | Final testbed with the grid for point-intercept method (credit: the Authors).

termiche, la sperimentazione si concentra solo sulle dinamiche dello sviluppo della vegetazione.

I banchi di prova sono stati costruiti utilizzando un telaio di supporto in profili quadrati in alluminio di 30 mm dentro cui è stata posta una cassa in legno di pino verniciato (Fig. 3). A partire dal basso, gli strati interni sono costituiti da una membrana HDPE (polietilene ad alta densità) a bassa permeabilità come strato impermeabilizzante dello spessore di 0,5 mm, da una membrana di geodrenaggio e da un geotessile di 100g/mq; successivamente è stato sversato prima il substrato, costituito da una combinazione di diversi materiali (Tab. 1) e poi la pacciamatura, costituita da foglie secche decomposte provenienti dagli alberi presenti nei pressi del laboratorio, una pratica che può essere utile per la propagazione di semi; in ultimo sono state messe a dimora 33 piantine di *'Arachis repens'* per metro quadrato, distribuite uniformemente. I banchi di prova, che hanno una pendenza del 3%, sono attrezzati con un sensore di radiazione solare e un sistema di irrigazione Rain Bird, per mantenere il terreno con un alto tas-

so di umidità, che alle 6 del mattino tramite 15 irrigatori a goccia innaffia in modo uniforme la terra.

Per valutare le dinamiche di sviluppo delle specie spontanee, si è utilizzato un filo di polietilene disposto sopra i banchi di prova con una maglia ortogonale e interassi di 100 mm; a ogni nodo della griglia è predisposta una verticale come riferimento per la crescita della vegetazione, secondo il metodo Point-intercept (Fig. 4) descritto da Mueller-Dombois e Ellenberg (2002) e da Caratti (2006). I nodi costituiscono un riferimento costante che consente di verificare lo sviluppo della *'Arachis repens'* così come di qualsiasi altra pianta spontanea. Le piante che nel tempo non si avvicinano alle proiezioni dei nodi vengono escluse dai risultati della sperimentazione. Per migliorare la precisione del modello, si è considerata come 'intersezione completa' quando le piante intersecano idealmente il punto della griglia e come 'intersezione parziale' quando le piante sono molto vicine al punto della griglia. La raccolta dei dati è iniziata un paio di settimane dopo la prima semina; durante i primi mesi, i dati di crescita sono stati raccolti set-

timanalmente e negli ultimi mesi ogni trenta giorni. L'indice di copertura delle piante è stimato approssimativamente dividendo il numero totale di nodi della griglia per il numero totale di nodi della griglia che si intersecano ogni giorno durante la raccolta dei dati di laboratorio.

**Risultati** | Lo sviluppo della vegetazione è stato restituito graficamente nelle Figure 5 e 6, dove sono rappresentati il numero delle intersezioni durante tutta la sperimentazione. È possibile notare come la copertura complessiva della vegetazione (che comprende tanto le specie messe a dimora quanto quelle spontanee) è progressivamente aumentata nel tempo. In particolare, il banco di prova con il substrato con una profondità di 10 cm ha avuto una copertura vegetale maggiore durante tutto l'esperimento, dato questo coerente con le conclusioni di Dunnett et alii (2008). Per quanto riguarda la vegetazione spontanea, il grafico di Figura 5 mostra che il numero delle intercettazioni delle spontanee (asse Y primario con linee continue) è maggiore nel substrato meno profondo durante i primi 40-50 giorni. Questo fenomeno può essersi verificato per la presenza di spazi tra le piante messe a dimora che nei substrati meno profondi erano rimasti liberi più a lungo ma con il passare del tempo la maggiore profondità del substrato è diventata un habitat più favorevole per la vegetazione spontanea.

Il grafico di Figura 6 mostra invece la radiazione solare sui banchi di prova misurata per alcuni giorni dell'esperimento, poiché radiazione e copertura vegetale hanno una stretta correlazione. I grafici mostrano una chiara diminuzione della percentuale di copertura vegetale al 37esimo giorno, quando si è registrata una radiazione solare più alta rispetto alla media, dato compatibile con la nota caratteristica della *'Arachis repens'* che può muovere le proprie foglie per regolarne l'esposizione alle radiazioni in relazione alle condizioni ambientali. I risultati presentano un margine di affidabilità del 95% rispetto alle misurazioni standard.

I risultati qualitativi della sperimentazione, relativi alle specie che hanno colonizzato spontaneamente i tetti e alla *'Arachis repens'* messa a dimora dagli autori, sono riportati in Tabella 2 e di seguito riassunti: le famiglie botaniche con la maggior varietà di specie sono state le *'Asteraceae'* e le *'Fabaceae'* mentre quelle con il maggior numero di specie sono state le *'Commelinaceae'* e le *'Poaceae'*. I dati sperimentali completi sono disponibili su Mendeley Data repository (Gobatti, Leite and Huttenlocher, 2022). In generale, i risultati indicano che: il substrato meno profondo, che trattiene meno acqua, inizialmente ostacola lo sviluppo delle specie spontanee, ma poi fornisce comunque condizioni di sviluppo sufficienti; una varietà di esemplari spontanei riesce a crescere velocemente (Figg. 7-14); le prime specie spontanee riescono a colonizzare rapidamente i banchi di prova (Fig. 15).

**Discussione dei risultati** | I tetti con vegetazione costituiscono un ecosistema dinamico che può cambiare significativamente a seconda delle condizioni ambientali del contesto (Dunnett et alii, 2008). Se sulla sperimentazione può non aver influito l'assenza di precipitazioni piovose perché compensata da un sistema di irrigazione artificiale, la radiazione solare ha certamente contribuito a deter-

minare gli esiti poiché la 'Arachis repens' ha un complesso sistema fogliare (Figg. 16, 17) che si riduce in estensione nei giorni di maggiore radiazione solare.

La diffusione della vegetazione spontanea è stata condizionata dalla copertura vegetale, soprattutto a partire dalla coltura iniziale di 'Arachis repens'. Contrariamente alle aspettative (più piante messe a dimora rispetto alle spontanee), il ritmo di crescita delle spontanee è aumentato seguendo la crescita della copertura vegetale totale (Fig. 18). Questo fenomeno può essere spiegato analizzando i primi mesi di crescita, durante i quali ci sono ancora molti vuoti nella copertura vegetale che vengono occupati dalle spontanee. È possibile che questa correlazione cambi quando nel tempo si consolida la popolazione vegetale di un tetto. Nonostante ciò, è interessante osservare che all'aumentare della copertura totale delle piante, la percentuale di spontanee aumenta quanto più è profondo il substrato.

Le spontanee possono nascere in seguito a dispersione dei semi da parte del vento o propagazione da parte di animali (Ampim et alii, 2010). I dati mostrano come nelle ultime settimane le varietà hanno smesso di crescere, anche se la quantità di spontanee ha continuato ad aumentare; questo fenomeno indica che alcune specie sono favorite e quindi si riduce la diversità relativa del numero totale di piante. Le specie 'Commelina benghalensis L.', 'Leucaena leucocephala' e 'Zea sp.' hanno registrato complessivamente un alto numero di esemplari, essendo probabilmente i gruppi più aggressivi, il che suggerisce che le attività di manutenzione e potatura non possano essere trascurate se si vuole mantenere sotto controllo la copertura vegetale spontanea.

Dalla sperimentazione si evince che le piante spontanee hanno caratteristiche e meccanismi di sviluppo idonei a una rapida colonizzazione nei tetti verdi con substrati ridotti, dato confermato da Oliveira, Rodrigues e Oliveira (2021) i quali sostengono che le piante con un'architettura radicale adeguata per i substrati poco profondi e le specie che hanno impollinatori e una buona riproduzione vegetativa possono svilupparsi meglio; il loro studio rileva, in particolare, che le piante con tricomi, attraverso un processo di fotosintesi specifico, possono colonizzare regioni aride rifrangendo parte della radiazione in eccesso, diminuendo il calore sulla superficie della pianta e catturando l'acqua dall'atmosfera, una caratteristica osservata anche durante la sperimentazione in piante come la 'Zea sp.'.

La 'Zea sp.' ha colonizzato il tetto durante gli ultimi giorni dell'esperimento, ma ha rapidamente conquistato una notevole quantità delle intersezioni complessive. Anche le bromeliacee hanno colonizzato i banchi di prova in modo aggressivo, grazie alla loro caratteristica di stoccare all'interno riserve di acqua (Oliveira, Rodrigues and Oliveira, 2021). Le piante nei substrati da 60 mm hanno mostrato un deterioramento del colore e un ammaloramento delle foglie, a causa dell'aggressione di insetti. Nel complesso, il substrato da 100 mm ha dimostrato di essere quello con il miglior rapporto tra spessore/leggerezza, elevata biodiversità, maggiore copertura vegetale e riproduzione iniziale, risultato coerente con le ricerche precedenti.

Uno dei limiti di questa ricerca è che le specie botaniche che sono state classificate non possono essere utilizzate in ogni regione climatica, poi-

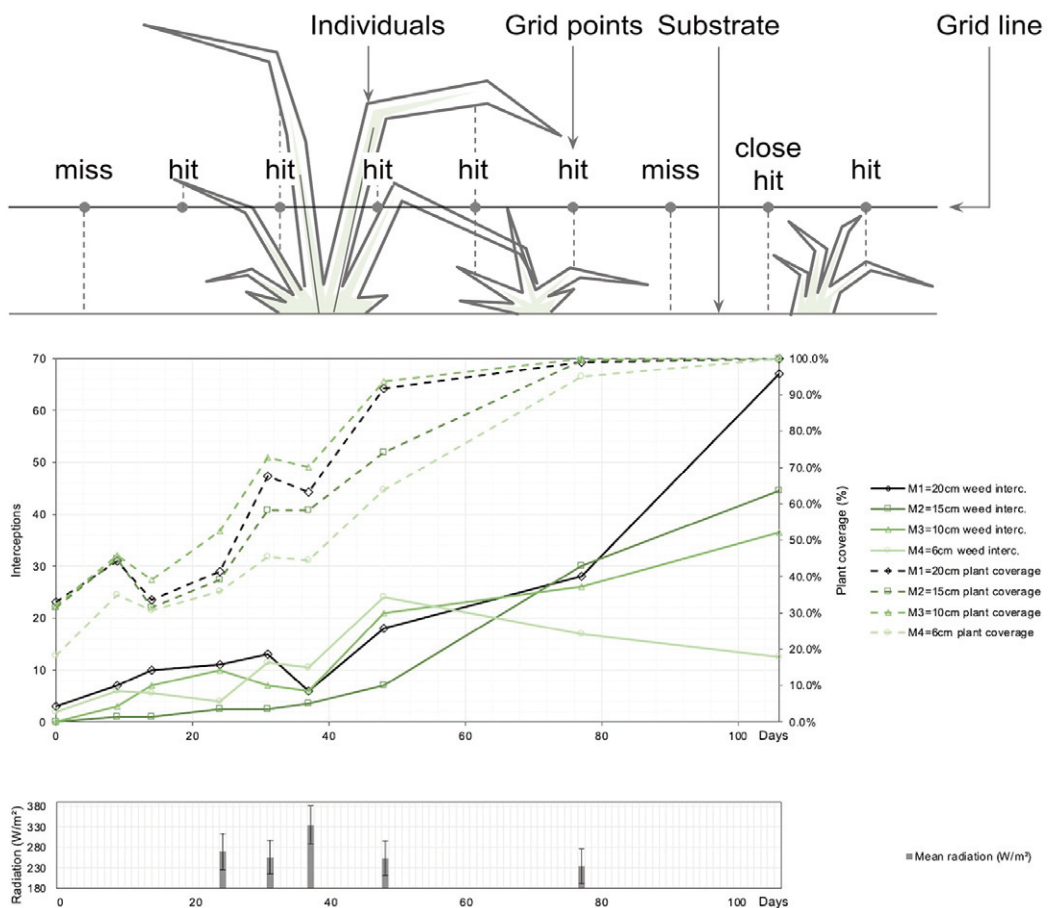
ché alcune specie in armonia con un ecosistema possono essere invasive per un altro. Per risolvere questo limite, sviluppi futuri potrebbero studiare non le specie ma le caratteristiche e meccanismi di crescita delle specie autoctone nella zona in cui si progetta il tetto verde. Un ulteriore limite della sperimentazione è che essa è circoscritta solo ai primi mesi di crescita, il che non consente di validare un modello per tutta la durata della vita del tetto verde.

**Conclusioni** | La ricerca ha mostrato i primi dati sulla crescita della vegetazione nei tetti con diver-

se profondità del substrato e fino al raggiungimento della copertura vegetale totale. La dinamica di crescita delle specie spontanee e di quelle messe a dimora è stata analizzata durante un lasso di tempo definito, ottenendo dati quantitativi e qualitativi. Le piante spontanee sono state in grado di colonizzare i banchi di prova, anche se questo processo di insediamento ha profondi legami con le caratteristiche delle specie piantate. I risultati mostrano la necessità di estendere la sperimentazione a un periodo più lungo e a più stagioni. Nelle diverse configurazioni dei banchi di prova, tutti dotati di irrigazione automatica, quello con

Material	Proportion	Benefits
Mixed substrate with organic compost, ashes, crushed and composted pine and eucalyptus bark	64% (vol.)	Has abundance of nutrients, great water retention and high microbial counts, but is very heterogeneous, possibly having toxicity concerns and can store a seed bank if composting wasn't done properly
Coconut coir fibre dust	12% (vol.)	Has good water retention, but is low in nutrients
Mixed grain sand	12% (vol.)	Structures the substrate providing anchorage and improves soil retention, it does not, however provide nutrient income
Mixed grain vermiculite	12% (vol.)	Is lightweight, but deteriorates quickly and does not retain water very well

**Tab. 1** | Substrate materials used, their proportion and their positive and negative aspects (credit: adapted by the Authors from Ampim, 2010).



**Fig. 4** | Illustration of the point-intercept method (credit: adapted by the Authors from Chojnacky and Milton, 2008).

**Figg. 5, 6** | The top graph shows the number of interceptions of spontaneous species (main Y-axis) per day and plant coverage (secondary Y-axis) per day; and the bottom graph shows the average solar radiation during some of the data collection days (credits: the Authors).



Family	Species	Common name
Asteraceae	<i>Bidens pilosa</i>	Spanish needle
	<i>Galinsoga parviflora</i>	Gallant soldier
	<i>Sonchus oleraceus</i>	Sow thistle
	<i>Vernonia sp.</i>	Bitterleaf
Commelinaceae	<i>Commelina benghalensis</i> L.	Benghal dayflower
Euphorbiaceae	<i>Acalypha sp.</i>	Red cat's tail
	<i>Euphorbia graminea</i> Jacq.	Grassleaf spurge
Fabaceae	<i>Arachis repens</i>	Creeping peanut
	Fabaceae	Fabaceae
	<i>Leucaena leucocephala</i>	Jumbay
	<i>Rhynchosia tomentosa</i>	Twining snoutbean
Meliaceae	<i>Melia azedarach</i>	Chinaberry tree
Poaceae	<i>Zea sp.</i>	Corn
Rubiaceae	<i>Richardia brasiliensis</i>	Brazilian clover
Urticaceae	<i>Pilea microphylla</i>	Artillery plant

Tab. 2 | Species identified in the experiment (credit: the Authors).



Fig. 7-14 | Some of the spontaneous species identified. From left to right, top to bottom: 'Zea sp.', 'Bidens sp.', 'Richardia sp.', 'Leucaena sp.', 'Acalypha sp.', 'Galinsoga sp.', 'Euphorbia sp.', and 'Commelina sp.' (credits: the Authors).

il substrato meno profondo (6 cm) si è rivelato sufficiente per raggiungere la biodiversità, tuttavia ha avuto performance peggiori rispetto ai substrati con profondità maggiori. Il substrato con profondità di 10 cm, anche se non il più leggero, è quello che offre il giusto compromesso tra colonizzazione delle specie analizzate e leggerezza del substrato.

I tetti meno profondi presentano una maggiore varietà di specie: l'eterogeneità è un meccanismo naturale per la gestione collettiva della pressione ambientale, il che porta alla necessità di analizzare la vegetazione sui tetti come una comunità e non solo come singole specie, questo un possibile tema di ulteriori ricerche. I risultati della sperimentazione possono essere considerati un

utile strumento per i progettisti che vogliono realizzare un tetto verde capace di adattarsi nel migliore dei modi alle sollecitazioni ambientali locali. Allo stesso tempo si ritiene possano incoraggiare verso una pratica più sostenibile alla luce delle caratteristiche di crescita e di biodiversità della vegetazione, anche in condizioni di bassa manutenzione, e dell'elevato potenziale di natura paesaggistica ed estetica.

Se prevedere sui tetti piante spontanee è ancora una prassi poco comune verso la quale ci si muove con cautela, tuttavia, la realizzazione di un'infrastruttura verde con una maggiore biodiversità, capace di adattarsi alle condizioni locali attraverso specie spontanee, può realizzare un ecosistema più resiliente e consolidare le relazioni

culturali e storiche tra la popolazione e la vegetazione urbana. Più che una semplice copertura a verde, un tetto con vegetazione spontanea è da intendersi come un giardino che ospita la fauna locale e luogo con finalità didattiche sulla natura.

Anthropogenic actions have drastically damaged delicate natural cycles and habitats in various local contexts: densely occupied cities, as Vesuviano and Stovin (2013) point out, can lead to criticalities in land management, making Nature-based Solutions (NbS) such as bioretention, street tree planting and public parks hard to employ. Vegetation, as Vesuviano and Stovin (2013) point out again, can mitigate such critical issues since it can cover rooftops, thus enabling various Ecosystem Services (Oberndorfer et alii, 2007) defined by the International Union for Conservation of Nature as «[...] the benefits people obtain from ecosystems» (MEA, 2005, p. 40), according to an innovative approach to determine the human-nature interconnection. Subsequently, this approach was thus encompassed by the, defined by the term NbS, European Commission (2015, p. 5) as «[...] Solutions that are inspired and supported by nature».

In this view, drawing inspiration from nature and supporting its processes requires a systemic observation of nature itself with the aim of interacting with natural phenomena. It is, therefore, necessary to clearly define the meaning of natural and artificial processes, and Lacerda et alii (2013) do so in a simple way; human-made and natural are merely 'different orientations': artificial elements are produced (or caused) by a man with a specific function, while natural ones are a consequence of nature; the natural features will be able to live for a long time under favourable conditions, while the artificial one will need considerable maintenance in order to last.

The same reasoning applies to extensive vegetation on roofs, often grass, sometimes exotic or spontaneous species, which require periodic interventions to contain their proliferation. According to Lundholm (2015), it is necessary to understand these native plants to best exploit their benefits in urban ecosystems. Human-planted vegetation crops growing on rooftops is a subject of study, either to contain maintenance, gardening and irrigation costs, or to enhance Ecosystem Services such as biodiversity and habitats for species, but also to increase the aesthetic value and improve rainwater management (Dunnnett, 2015).

Based on these premises, the study reported here aims to systematically characterise the effects exerted by substrate depth during the first months of vegetation growth in low-maintenance green roof models. It is an important goal, as the early growth stages are crucial to better understanding vegetation distribution and resilience (Dunnnett, 2015). After a general overview of green roofs, the most relevant aspects related to the context of spontaneous vegetation and some specific characteristics of tropical and subtropical climates, the materials and methodology, the experiment, the Point-Intercept method, the results, a brief discussion of the results and conclusions follow.

**Green roofs** | Green roofs are certainly not a new architectural solution; Osmundson (1999) defines

them as any vegetation or garden separated from the ground by a building; there are different types, usually classified according to the depth of the substrate (from the shallowest to the deepest) but also with respect to the fact that they can be extensive, semi-intensive and intensive. According to Dunnett et alii (2008), intensive types may not be particularly appealing as social demand is directed more towards lightweight, ecologically 'well-balanced' and aesthetically pleasing roofs to allow a broader range of people to use them effectively. Figure 1 shows the typical succession of green roof layers, although each layer may have particular characteristics depending on the configuration of the roof and the type of climate. However, a relevant element is the composition of its substrate, which usually includes a specific range of materials. Ampim et alii (2010) provide an overview of substrate materials and their properties, classified between natural and mineral components, artificial or modified mineral components, waste or recycled materials or plastic foams and organic materials. Mulching is also an important component, as it can help the substrate lose less water through evaporation (Cianciaruso et alii, 2006).

**The scientific literature on spontaneous vegetation** | Lundholm (2015) points out that although green roofs are human-made structures, the dynamics of roof development are a direct consequence of the growth of spontaneous vegetation and maintenance activities performed by humans. Thus, identifying levels of 'organisation', from spontaneous autopoiesis and dynamics to engineered systems, the author suggests new approaches to design greening systems on roofs with self-regulating vegetation as compared to high-maintenance systems. Furthermore, Lundholm considers plant choice relevant since vegetation on roofs can have an enormous impact on system performance, e.g. in terms of water retention and thermal inertia (Dunnett et alii, 2008), he does not fail to emphasise the dangers of relying only on spontaneous colonisation if the principal goal is related to biodiversity, whose higher adaptability and aggressiveness of some species may put it at risk.

Notable among the published research is that of Dunnett (2015), who sheds light not only on the initial stages of colonisation but also on the subsequent ones, describing green roofs as dynamic ecosystems and emphasising the need for systems to be self-regulated in order to achieve a long-term response to environmental changes. In contrast, Nagase, Dunnett and Choi (2013) show how an excessive reduction in substrate depth can also reduce plant colonisation. In similar research, Catalano et alii (2016) analysed vegetated roofs in which no maintenance had been carried out for about 30 years, showing how spontaneous colonisation is a relevant and beneficial phenomenon since it allows the consolidation of botanical selection among local plant communities. Catalano et alii (2018) even analyse green roof regulations and guidelines in Germany, Switzerland and Italy, finding no references to eco-regions and plant characteristics; lastly, they find a need to address ecological aspects related to environmental compensation in green roof design. In light of these studies, it is evident that the analysis of the growth dynamics of spontaneous species must be con-

ducted in different climates, as local environmental conditions are relevant.

Research studies have mainly focused on temperate climates (Grullón-Penkova, Zimmerman and González, 2020), while the few recent studies conducted in tropical and subtropical climates have highlighted the need for a deeper understanding of vegetation growth dynamics based on the conditions of the specific context. Shallow substrate hampers the proliferation of plant species up to a certain depth (a threshold at which depth is no longer relevant), and native plants cope better with drought and the limited water supply by growing easier than those planted in shallow substrates. Nevertheless, testing is necessary to determine whether a shallow substrate can satisfy different species by becoming a suitable habitat for them. Verification may be relevant to identifying botanical selections for colonising green roofs with a shallow substrate, thus stimulating the spread of 'light roofs' (Silva, Flores-Colen and Antunes, 2017).

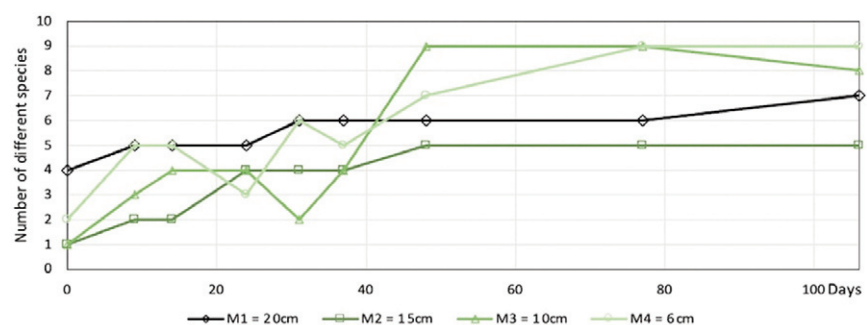
**Goals, experimentation, materials and methodology** | Experimental research shown here aims to systematically characterise the first few months of vegetation growth in green roofs as this is crucial to gaining a better understanding of the dynamics of colonisation and its resilience (Dunnett, 2015); the paper is original due to the fact that it reports an experiment in a humid subtropical context for which comprehensive and scientifically valid data are lacking to systematically define the growth patterns of spontaneous species for the purpose of their subsequent wider use.

To realise the goals of this research, the experimentation ran in São Paulo (Brazil) in a climatic context of transition between the tropical and sub-

tropical regions of the country, as reflected in the Köppen Geiger climate classification (Alvares et alii, 2014): on a broader scale, Martinelli (2010) classifies the City of São Paulo as Cwa (Humid Subtropical Zone, with dry winter and hot summer) and Aw (Tropical Zone, with dry winter). Some tests took place through a methodology for systematic sampling and characterisation of vegetation development dynamics. The experimentation ran on four outdoor testbeds, simulating a green cover, each 1.40 x 1.30 m with different substrate depths (6, 10, 15, 20 cm) but with the same structural elements. Figure 2 shows the distribution and depth of the substrate. Although the testbeds reveal a variety of parameters, including water and thermal performance, the experiments focus only on the dynamics of vegetation development.

The test benches consist of a support frame made of 30 mm square aluminium profiles in which a varnished pinewood box stands (Fig. 3). The internal layers, starting from the bottom, consists of a low-permeability HDPE (high-density polyethylene) geomembrane as a 0.5 mm thick waterproofing layer, a geodrainage membrane and a 100 g/sqm geotextile; the substrate, comprising of a combination of different materials (Tab. 1) and then mulch, consisting of decomposed dry leaves from trees in the vicinity of the laboratory, a practice that may be useful for seed propagation; lastly, 33 'Arachis repens' seedlings per square metre were planted, evenly distributed. The testbeds, which have a slope of 3%, are equipped with a solar radiation sensor and a Rain Bird irrigation system to keep the ground at a high humidity level, which uniformly waters the soil at 6 am via 15 drip sprinklers.

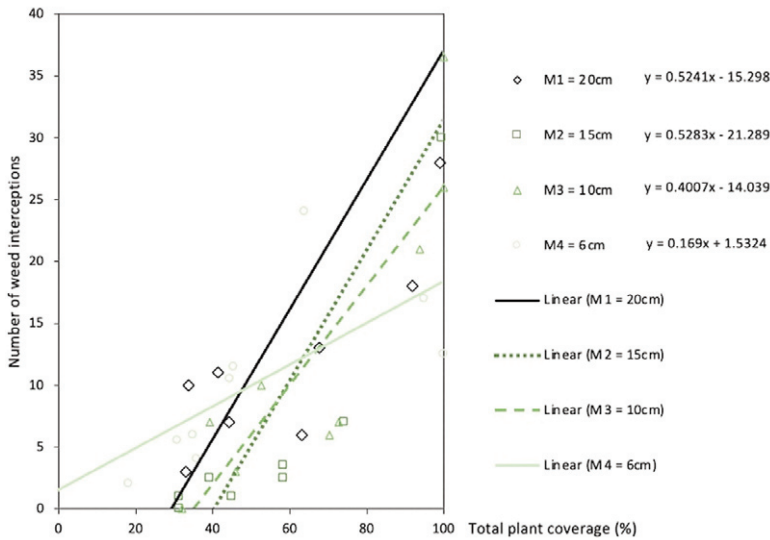
To assess the development dynamics of the spontaneous species, we placed a polyethene wire with a 100 mm orthogonal grid on the test



**Fig. 15** | Total plant diversity in the experiment (credit: the Authors).

**Fig. 16, 17** | 'Arachis repens' with open leaves and closed leaves under high radiation (credits: the Authors).





**Fig. 18** | Correlations between plant coverage and the number of weed interceptions on each model using linear regression (credit: the Authors).

benches; at each node of the grid, a vertical as a reference for vegetation growth, according to the Point-intercept method (Fig. 4) of Mueller-Dombois and Ellenberg (2002) and Caratti (2006). The nodes provide a constant reference for verifying the development of ‘*Arachis repens*’ and any other wild plants. Plants that do not approach the node projections over time out of the experimental results. To improve the precision of the model, we speak of ‘complete intersection’ when the plants ideally intersect the grid point and about ‘partial intersection’ when the plants are very close to the grid point. Data collection began a couple of weeks after the first planting; during the first months, growth data were collected weekly and during the last months, every thirty days. The plant cover index is roughly estimated by dividing the total number of grid nodes by the number of grid nodes intersecting each day during laboratory data collection.

**Results** | Vegetation development has been rendered graphically in Figures 5 and 6, showing the number of intersections throughout the experiment. One can see how the overall vegetation cover (including both planted and spontaneous species) gradually increased over time. In particular, the testbed with the substrate with a depth of 10 cm had a higher vegetation cover throughout the experiment, a finding consistent with the conclusions of Dunnett et alii (2008). With regard to spontaneous vegetation, the graph in Figure 5 shows that the number of interceptions of spontaneous vegetation (primary Y-axis with solid lines) is more in the shallower substrate during the first 40-50 days. This phenomenon may have occurred due to spaces between the planted plants that had been vacant for longer in the shallower substrate; over time, the deeper substrate became a more favourable habitat for spontaneous vegetation.

On the other hand, the graph in Figure 6 shows the solar radiation on the testbeds measured for a few days of the experiment, as radiation and vegetation cover have a close correlation. The graph clearly shows a decrease in the percentage of vegetation cover on day 37 when a higher than average solar radiation level took place, which is compatible with the well-known characteristic of ‘*Arachis repens*’ that it can move its leaves to ad-

just its exposure to radiation in relation to environmental conditions. Error bars of 95% confidence margin over the standard deviation applies.

The qualitative results of the experiments, relating to the species that spontaneously colonised the roofs and the ‘*Arachis repens*’ planted by the authors, are shown in Table 2 and summarised below: the botanical families with the most species were the ‘Asteraceae’ and ‘Fabaceae’ those with the highest number of species were the ‘Comelinaceae’ and ‘Poaceae’. The complete experimental data are available on the Mendeley Data repository (Gobatti, Leite and Huttenlocher, 2022). In general, the results indicate that: the shallower substrate, which retains less water, initially hampers the development of the spontaneous plants but then still provides sufficient conditions for growth; a variety of weeds manage a rapid expansion (Fig. 7-14); the first volunteer species colonise the testbeds quickly (Fig. 15).

**Discussion of results** | Vegetated roofs constitute a dynamic ecosystem that can change significantly depending on the environmental conditions of the context (Dunnett et alii, 2008). While the absence of rainfall did not affect results because an artificial irrigation system offset it, solar radiation certainly contributed to the results, as ‘*Arachis repens*’ has a complex leaf system (Fig. 16, 17) that shrinks in extension during days of increased solar radiation.

Spontaneous vegetation spread was influenced by vegetation coverage, mainly by the initial cultivation of ‘*Arachis repens*’. Despite expectations (more planted plants than spontaneous ones), the spontaneous plant growth rate increased with the growth of the total vegetation cover (Fig. 18). We can explain this in the first few months of growing, during which there are still many gaps in the vegetation cover occupied by weeds. This correlation changes as the vegetation population of a roof may consolidate over time. Nevertheless, it is interesting to note that as the total plant cover increases, the percentage of spontaneous plants increases the shallower the substrate.

Spontaneous plants can arise through seed dispersal by the wind or propagation by animals (Ampim et alii, 2010). Data show that varieties have stopped growing in recent weeks, although the amount of weed has continued to increase; this

indicates that some species are favoured and so the relative diversity of the total number of plants is reduced. The species ‘*Commelina benghalensis* L.’, ‘*Leucaena leucocephala*’ e ‘*Zea sp.*’ recorded high numbers, probably the most aggressive groups, so one cannot neglect maintenance and pruning activities if one wants to keep the spontaneous vegetation cover under control.

Experiments show that spontaneous plants have characteristics and development mechanisms suitable to colonise rapidly on green roofs with shallow substrates, according to Oliveira, Rodrigues and Oliveira (2021) arguing that plants with a root architecture suitable for reduced substrates and species that have pollinators and vegetative reproduction can develop better. They found that plants with trichomes, through a specific photosynthesis process, can colonise dry regions refracting part of the excess radiation, decreasing heat on the plant surface and capturing water from the atmosphere, a characteristic seen during experimentation in plants such as ‘*Zea sp.*’.

The ‘*Zea sp.*’ colonized the roof during the last days of the experiment but quickly conquered a considerable amount of the overall intersections. Bromeliads also aggressively colonised substrates depending on their characteristic of storing water reserves inside (Oliveira, Rodrigues and Oliveira, 2021). The plants in the 60 mm substrates showed a deterioration of colour and leaf decay due to insect aggression. Overall, the 100 mm substrate proved to have the best ratio of thickness/lightness, high biodiversity, increased plant cover and early reproduction results, consistent with previous research.

One of the limitations of this research is that the classified botanical species cannot be used in all climatic regions, as some species in harmony with one ecosystem may be invasive to another. As a solution to this restriction, future developments could study not the species but the characteristics and growth mechanisms of native species in the area where the green roof design is taking place. A further limitation of experimentation results from the fact it is only in the first few months of growth, making it impossible to validate a model for the entire life of the green roof.

**Conclusion** | The research showed the first data on vegetation growth in roofs with different sub-

strate depths up to full vegetation cover. The growth dynamics of wild and planted species during a defined period of time of quantitative and qualitative data analysis took place. Spontaneous plants were able to establish themselves in the testbeds, although this establishment process has profound links with the characteristics of the planted species. Results show the need to extend the experiments to longer duration and more seasons. In the different configurations of the testbeds, all equipped with automatic irrigation, the one with the shallowest substrate (6 cm) proved to be sufficient to achieve biodiversity but performed worse than the deeper substrates. Although not the lightest, the 10 cm depth substrate is the one that offers the right compromise of colonising the tested species and the lightness of the substrate.

### Acknowledgements

Authors acknowledge the University of São Paulo and the Santander Bank via USP Municipalities Notice 01/2021 Desafio USP – Cidades Sustentáveis for the research funding provided [grant number 2021.1.471.3.0] which made possible the assembly of the green roof models and provided financial support for L. Gobatti and I. G. Huttenlocher. The authors also thank the Foundation Hydraulics Technological Centre (FCTH) for their support and Forseti Soluções for the material provided and Juliana Trindade for helping with botanical identification. Although all authors participated in all research phases: L. Gobatti has built the experiment and the methodology, I. G. Huttenlocher has made most of the laboratory data collection and B. C. C. Leite has advised the work.

### References

Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., de Moraes Gonçalves, J. L. and Sparovek, G. (2014), “Köppen’s climate classification map for Brazil”, in *Meteorologische Zeitschrift*, vol. 22, n. 6, pp. 711-728. [Online] Available at: doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507 [Accessed 15 March 2022].

Ampim, P. A. Y., Sloan, J. J., Cabrera, R. I., Harp, D. A. and Jaber, F. H. (2010), “Green Roof Growing Substrates – Types, Ingredients, Composition and Properties”, in *Journal of Environmental Horticulture*, vol. 28, issue 4, pp. 244-252. [Online] Available at: doi.org/10.24266/0738-2898-28.4.244 [Accessed 15 March 2022].

Caratti, J. (2006), *Point Intercept (PO) – Sampling Method*, USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD. [Online] Available at: fs.fed.us/rm/pubs/rmrs\_gtr164/rmrs\_gtr164\_09\_point\_inter.pdf [Accessed 15 March 2022].

Catalano, C., Laudicina, V. A., Badalucco, L. and Guarino, R. (2018), “Some European green roof norms and guidelines through the lens of biodiversity – Do ecoregions and plant traits also matter?”, in *Ecological Engineering*, volume 115, pp. 15-26. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.01.006 [Accessed 15 March 2022].

Catalano, C., Marcenò, C., Laudicina, V. A. and Guarino, R. (2016), “Thirty years unmanaged green roofs – Ecological research and design implications”, in *Landscape and Urban Planning*, vol. 149, pp. 11-19. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.01.003 [Accessed 15 March 2022].

Chojnacky, C. D. and Milton, M. (2008), “Measuring Carbon in Shrubs”, in Hoover, C. M. (ed.), *Field Measurements for Forest Carbon Monitoring – A Landscape-Scale Approach*, Springer, Dordrecht, pp. 45-72. [Online]

The shallower roofs present a greater variety of species: heterogeneity is a natural mechanism for the collective management of environmental pressure, which leads to the need to examine rooftop vegetation as a community and not just as individual species, a possible topic for further research. The experimental results are helpful as a tool for designers who want to create a green roof that can best adapt to local environmental stresses. At the same time, they consider that they can encourage more sustainable practices in light of the growth and biodiversity characteristics of the vegetation, even under low maintenance conditions, and the high landscape and aesthetic potential.

Spontaneous plants on rooftops are still uncommon practices not yet familiar, creation of green infrastructure with more biological variety

Available at: doi.org/10.1007/978-1-4020-8506-2\_5 [Accessed 15 March 2022].

Cianciaruso, M. V., Pires, J. S. R., Delitti, W. B. C. and Silva, E. F. L. P. (2006), “Litter fall and leaf decomposition in cerrado Jataí Reserve, municipality of Luiz Antônio, São Paulo State, Brazil”, in *Acta Botanica Brasílica*, vol. 20, issue 1, pp. 49-59. [Online] Available at: doi.org/10.1590/S0102-33062006000100006 [Accessed 15 March 2022].

Dunnett, N. (2015), “Ruderal Green Roofs”, in Sutton, R. K. (ed.), *Green Roof Ecosystems*, Ecological Studies, vol. 223, Springer International Publishing Switzerland, pp. 223-255. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-319-14983-7 [Accessed 15 March 2022].

Dunnett, N., Nagase, A. and Hallam, A. (2008), “The dynamics of planted and colonising species on a green roof over six growing seasons 2001-2006 – Influence of substrate depth”, in *Urban Ecosystem*, vol. 11, pp. 373-384. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11252-007-0042-7 [Accessed 15 March 2022].

European Commission (2015), *Towards an EU Research and Innovation Policy Agenda for Nature-based Solutions & Re-naturing Cities*. [Online] Available at: op.europa.eu/it/publication-detail/-/publication/fb117980-d5aa-46df-8edc-af367cddc202 [Accessed 15 March 2022].

Gobatti, L., Leite, B. C. C. and Huttenlocher, I. G. (2022), *Unmanaged tropical green roof spontaneous vegetation dynamics – Effects of substrate depth*, *Mendeley Data*, V2. [Online] Available at: doi.org/10.17632/36cp9kzsf2 [Accessed 15 March 2022].

Grullón-Penkova, I. F., Zimmerman, J. K. and González, G. (2020), “Green roofs in the tropics – Design considerations and vegetation dynamics”, in *Heliyon*, vol. 6, issue 8, e04712, pp. 1-8. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04712 [Accessed 15 March 2022].

Lacerda, D. P., Dresch, A., Proença, A. and Antunes Júnior, J. A. V. (2013), “Design Science Research – A research method to production engineering”, in *Gestão & Produção*, vol. 20, issue 4, pp. 741-761. [Online] Available at: doi.org/10.1590/S0104-530X2013005000014 [Accessed 15 March 2022].

Lundholm, J. T. (2015), “Spontaneous dynamics and wild design in green roofs”, in *Israel Journal of Ecology & Evolution*, vol. 62, issue 1-2, pp. 21-31. [Online] Available at: dx.doi.org/10.1080/15659801.2015.1025511 [Accessed 15 March 2022].

Martinelli, M. (2010), “Clima do Estado de São Paulo”, in *Confins*, n. 8. [Online] Available at: doi.org/10.4000/confins.6348 [Accessed 15 March 2022].

MEA – Millennium Ecosystem Assessment (2005), *Ecosystems and Human Well-being – Synthesis*, Island Press, Washington (DC). [Online] Available at: millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf

and the ability to adapt to local conditions through wild species can create a more resilient ecosystem and consolidate cultural and historical relationships between people and urban vegetation. More than just a green roof, a roof with spontaneous vegetation needs a garden for local fauna and a place with an educational purpose in nature.

[Accessed 15 March 2022].

Mueller-Dombois, D. and Ellenberg, H. (2002), *Aims and methods of vegetation ecology*, The Blackburn Press, Caldwell.

Nagase, A., Dunnett, N. and Choi, M.-S. (2013), “Investigation of weed phenology in an establishing semi-extensive green roof”, in *Ecological Engineering*, vol. 58, pp. 156-164. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.06.007 [Accessed 15 March 2022].

Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N., Gaffin, S., Köhler, M., Liu, K. K. Y. and Rowe, B. (2007), “Green Roofs as Urban Ecosystems – Ecological Structures, Functions, and Services”, in *BioScience*, vol. 57, issue 10, pp. 823-833. [Online] Available at: doi.org/10.1641/B571005 [Accessed 15 March 2022].

Oliveira, D. S., Rodrigues, D. S. and Oliveira Jr., C. J. F. (2021), “Telhados verdes – Uma proposta para o uso com espécies nativas do Brasil | Green roofs – A proposal for use native species in Brazil”, in *Mix Sustentável*, vol. 7, n. 3, pp. 111-126. [Online] Available at: ojs.sites.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/download/4593/3679 [Accessed 15 March 2022].

Osmundson, T. (1999), *Roof Gardens – History, Design and Construction*, W.W. Norton & Company, New York.

Silva, C. M., Flores-Colen, I. and Antunes, M. (2017), “Step-by-step approach to ranking green roof retrofit potential in urban areas – A case study of Lisbon, Portugal”, in *Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 25, pp. 120-129. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ufug.2017.04.018 [Accessed 15 March 2022].

Vesuviano, G. and Stovin, V. (2013), “A generic hydrological model for a green roof drainage layer”, in *Water Science & Technology*, vol. 68, issue 4, pp. 769-775. [Online] Available at: doi.org/10.2166/wst.2013.294 [Accessed 15 March 2022].