

LA PROTOTIPAZIONE PEDAGOGICA DI EDIFICI ECOLOGICI AVANZATI E BIOCITTÀ PRESSO I VALLDAURA LABS

ON PEDAGOGICAL PROTOTYPING OF ADVANCED ECOLOGICAL BUILDINGS AND BIOCITIES AT VALLDAURA LABS

Daniel Ibañez, Vicente Guallart, Michael Salka

ABSTRACT

Le nuove generazioni di designer hanno grande responsabilità ma anche l'opportunità di mettere in campo azioni di mitigazione e adattamento al cambiamento climatico globale, all'inquinamento ambientale, alla perdita di biodiversità e all'esaurimento delle risorse non rinnovabili. Il contributo illustra come l'Institute for Advanced Architecture of Catalonia – Valldaura Labs (VL) fornisca ai futuri professionisti gli strumenti interdisciplinari per realizzare una simbiosi tra il mondo costruito e quello naturale, attraverso un sistema formativo che impiega la prototipazione e 'l'apprendere vivendo'. VL è un living lab situato nel Parco Naturale di Collserola, a 10 km dal centro di Barcellona, il cui Master in Advanced Ecological Buildings & Biocities (MAEBB) si conclude annualmente con la progettazione e realizzazione di un edificio autosufficiente. La metodologia didattica e i progetti realizzati al VL si possono annoverare tra le migliori pratiche di riferimento per realizzare paesaggi ecologici e tecnologici olisticamente integrati.

Emerging designers and makers of the built environment have an outstanding responsibility and potential to mitigate and adapt to global climate change, environmental pollution, biodiversity loss, and resource depletion. This paper overviews how the Institute for Advanced Architecture of Catalonia – Valldaura Labs (VL) educates incipient practitioners in interdisciplinary strategies for unifying the constructed and natural worlds through pedagogical prototyping and learning by living. VL is a living lab sited 10 km from Barcelona's centre in the Collserola Natural Park, hosting the immersive Master in Advanced Ecological Buildings & Biocities (MAEBB), which culminates in the annual autonomous design and fabrication of a self-sufficient building. The methods and projects of VL provide best practices of reference for realising holistically integrated ecological and technological landscapes.

KEYWORDS

formazione e prototipazione, living labs, didattica immersiva, soluzioni basate sulla natura, bioeconomia circolare

pedagogical prototyping, living labs, immersive education, nature-based solutions, circular bioeconomy

Daniel Ibañez, Architect and Urbanist, is the Director of the Institute for Advanced Architecture of Catalonia (IAAC) where he is the co-Director of the Master in Advanced Ecological Buildings and Biocities and Director of the Master of Mass Timber Design at IAAC Barcelona (Spain). Since 2017, he is a Senior Urban Consultant at the World Bank advising international governments and institutions on timber housing and timber urban development. E-mail: dani@iaac.net

Vicente Guallart, Architect, Urbanist and Chief Architect of the Barcelona City Council from 2011 to 2015, is the co-Director of the Master in Advanced Ecological Buildings and Biocities at IAAC Barcelona (Spain) and Co-Founder of IAAC. He also directs a professional office, Guallart Architects. E-mail: vicenteguallart@gmail.com

Michael Salka, Architect and Urbanist, is a Gates Cambridge PhD Candidate at the University of Cambridge and Technical Director of Valldaura Labs at IAAC Barcelona (Spain) from 2019 to 2021. His research activity is focused on the use of big data and digital technologies in the field of environmental sustainability. E-mail: ms2508@cam.ac.uk

Nel 2020 la produzione materiale complessiva delle attività umane (antropomassa) ha superato per la prima volta i 1.100 miliardi di tonnellate di biomassa planetaria (Bar-On, Phillips and Milo, 2018; Elhacham et alii, 2020; Erb et alii, 2018). Le pressioni derivanti dal cambiamento climatico globale, dall'inquinamento ambientale, dalla perdita di biodiversità e dall'esaurimento delle risorse naturali (Smil, 2012; Zalasiewicz et alii, 2019), in combinazione con la necessità di aumentare l'antropomassa per soddisfare la crescita continua e l'urbanesimo (ONU, 2019), comportano una grande responsabilità di soggetti e imprese impegnati nella produzione di materiali antropogenici per guidare i cambiamenti radicali necessari alle trasformazioni verso un Antropocene 'buono' (McPhearson et alii, 2021). Designer e progettisti possono fornire uno straordinario contributo poiché gli edifici rappresentano, considerando sia la produzione dei materiali sia i processi di costruzione¹ la maggiore fonte di emissioni globali di CO₂ equivalente (40%); ma come possono decidere in modo intelligente quali materiali e sistemi di costruzione prediligere? Il presente contributo illustra il metodo didattico del Valldaura Labs (VL) dell'Institute for Advanced Architecture of Catalonia (IAAC) fondato sulla prototipazione e sul 'learnig by living' per guidare gli studenti nell'individuare risposte innovative alle suddette emergenze.

Il VL è un laboratorio 'vivente' unico e innovativo (Niitamo et alii, 2006), a soli 10 km dal centro di Barcellona, circondato dal Parco Naturale di Collserola che si estende per 1.300 ettari; situato in una casa colonica del XIX secolo (massia) ristrutturata per ospitare laboratori di fabbricazione digitale e falegnameria ma anche alloggi e spazi per la didattica, VL ospita Master immersivo in Advanced Ecological Buildings & Biocities (MAEBB). Dal 2018 ad oggi circa 75 studenti provenienti da tutto il mondo hanno vissuto e studiato nella tenuta rurale, sviluppando strategie e approcci per ridurre il divario tra antropomassa e biomassa, progredendo così verso un paesaggio 'unificato' (Ratti and Belleri, 2020; Simon, 1996). Il MAEBB si conclude ogni anno con l'ideazione e la costruzione di un edificio prototipo autosufficiente che impiega il più possibile mezzi, materiali e flussi circolari locali e basati sulla natura (Guallart, 2014).

VL espleta questo servizio utilizzando anche i 135 ettari di foresta che fanno parte della tenuta all'interno del metabolismo² del Green Fab Lab, con progettazione manuale e informatizzata e con l'impiego di materie prime naturali attraverso una Gestione Sostenibile della Foresta (GSF). VL forma così le nuove generazioni di professionisti dell'ambiente costruito attraverso la realizzazione di progetti bioclimatici a zero emissioni di carbonio, che migliorano la salute e il benessere umano e la resilienza degli ecosistemi da cui provengono i materiali e in cui sono collocate le architetture (Ibañez, Hutton and Moe, 2019).

Sulla base di queste premesse e di una revisione dello stato dell'arte, che rivela l'innovativo allineamento di VL a tematiche di interesse scientifico e culturale come le Nature-based Solutions (NbS), la bioeconomia circolare e il Nuovo Bauhaus Europeo (European Commission, 2021), il contributo presenta la natura catalizzatrice di transizioni di VL, il background dell'approccio 'impara-

re facendo', le modalità di apprendimento attraverso il living lab e i prototipi con cui VL qualifica le migliori pratiche che integrano aspetti ecologici e tecnologici. Si presentano poi le conclusioni con barriere, limiti, sviluppi futuri e possibili nuove linee di ricerca.

Revisione della letteratura | Per comprendere quanto VL sia all'avanguardia è stato utile condurre una revisione sistematica e bibliometrica della letteratura esistente in Scopus adottando il metodo degli studi precedenti rilevanti (Choi, Berry and Smith, 2021; Darko et alii, 2020; Manzoor, Othman and Pomares, 2021; Pineda-Pinto, Frantzeskaki and Nygaard, 2021; Yin et alii, 2019). La ricerca è stata fatta per titolo/abstract/parola chiave all'interno di articoli di riviste, contributi per conferenze e capitoli di libri con la query 'ecology AND architecture AND education'; 'ecology' è stato scelto come termine di ricerca prioritario in quanto riguarda le relazioni degli organismi con l'ambiente fisico da una prospettiva biologica; 'architecture' per il suo riferimento all'arte e alla scienza della progettazione e della costruzione; 'education' come termine ombrello che copre curricula formali, nonché corsi di formazione, tutoraggi, ecc. Sono stati selezionati 199 risultati utilizzando il protocollo PRISMA (Page et alii, 2021) e tra questi 81 contributi full-text di cui 34 sono stati recuperati con successo (Fig. 1). Un limite della ricerca è l'aver circoscritto l'indagine ai soli documenti pubblicati in lingua inglese; inoltre una riformulazione della query con termini di ricerca alternativi, come 'cambiamento climatico', avrebbe potuto ampliare la quantità dei testi da analizzare.

Le date di pubblicazione degli 81 record indicano che il binomio ecologia-architettura in didattica è esploso a partire dal 1976 fino agli anni di picco rappresentati dal 2015, 2016, 2018 e 2021 (7-8 record ciascuno; Fig. 2). Il tasso di pubblicazione è aumentato bruscamente dal 2012 (2 record) al 2013 (6 record), crescita attribuibile in parte alla promozione delle NbS da parte della Commissione Europea a partire dal 2013, e ai bandi del 2016 e 2017 per progetti che impiegavano NbS su larga scala (Faire et alii, 2017). Alla data di redazione del presente contributo non è ancora possibile determinare il numero di pubblicazioni per il 2022.

Successivamente, tramite analisi bibliometriche consolidate nel settore dell'architettura, dell'ingegneria e delle costruzioni, è stato utilizzato VOSviewer per individuare tendenze e riferimenti sul tema (van Eck and Waltman, 2010; Manzoor, Othman and Pomares, 2021; Babalola et alii, 2021; Vilutiene et alii, 2019; Liu, Lu and Peh, 2019; Santos, Costa and Grilo, 2017). Il risultato ottenuto da VOSviewer è una mappa nella quale spazialità, raggruppamento, colore e collegamenti dei nodi sono scalati in base all'intensità delle connessioni tra parole chiave (van Eck and Waltman, 2010; Fig. 3).

Oltre alla relativa prevalenza di parole chiave e delle loro relazioni, la mappa rivela importanti lacune dei 34 full text acquisiti, ovvero l'assenza di recenti temi interdisciplinari rilevanti quali ad esempio le NbS e la bioeconomia circolare (Escobedo et alii, 2019; Palahí et alii, 2020), il che evidenzia il contributo originale di VL nella formazione ecologica dei giovani progettisti su temi rite-

nuti dalla comunità scientifica importanti per garantire cambiamenti sistemici e sostenibilità dell'intervento. VL allinea così le proprie attività con la missione del New European Bauhaus, il cui fine è dar seguito all'European Green Deal (European Commission, 2019) nei nostri spazi abitativi e nelle nostre esperienze.

Valldaura Labs come catalizzatore di transizioni | VL è una struttura dell'IAAC, un'organizzazione privata senza scopo di lucro per la formazione professionale, la divulgazione, la ricerca, lo sviluppo e l'innovazione, il cui campus principale si trova nel distretto di innovazione urbana 22@ di Barcellona (22@Network, s.d.). La missione di IAAC consiste nell'immaginare il futuro habitat della nostra società e costruirlo nel presente mediante gli strumenti della rivoluzione digitale ad ogni livello (dai bit alla geografia, dai microcontrollori alle città, dai materiali al territorio) per espandere i confini dell'architettura e del design e affrontare le sfide dell'umanità, anche attraverso la filosofia del 'learning by doing'³. VL interpreta le potenzialità del design e della costruzione digitale secondo un ethos ecologico influenzato dalla emergenza climatica, dalla presenza del Collserola Natural Park e dalle teorie dei co-direttori Vicente Guallart e Daniel Ibañez, 'the self-sufficient city' e 'wood urbanism' (Guallart, 2014; Ibañez, Hutton and Moe, 2019).

In sintesi, la teoria de 'the self-sufficient city' postula che le tecnologie dell'informazione e della comunicazione (ICT) debbano essere alla base di una rivoluzione urbana radicale, passando da una produzione e fornitura lineare, centralizzata, dall'alto verso il basso e gerarchicamente rigida, di energia, beni, risorse e servizi a una rete circolare, decentralizzata, distribuita, dal basso verso l'alto e dinamicamente reattiva (Guallart, 2014). Essa promuove una città in cui ogni edificio o isolato risulta in grado di raggiungere un certo grado di autosufficienza attraverso tecnologie localizzate di generazione e stoccaggio dell'energia (impianti fotovoltaici con batterie di accumulo), sistemi di raccolta, trattamento e riciclaggio dell'acqua (regimentazione dell'acqua piovana, irrigazione della vegetazione e infrastrutture per le acque grigie), strutture per trasformare i 'rifiuti' in beni (impianti di biogas o compostaggio), strutture per trasformare in modo sostenibile le materie prime in oggetti utili e per ripararli o modificarli (stampanti 3D, taglieri laser, fresatrici CNC, ecc.) e impianti per la coltivazione di cibo (serre sul tetto), il tutto gestito collettivamente da un Internet delle Cose (IoT) attraverso sensori, attivatori, sistemi informatici e interfacce di facile uso. Inoltre, promuove la messa in rete di edifici o isolati interconnessi con gli omologhi di prossimità (Fig. 4) per creare una infrastruttura urbana resiliente attraverso una interconnessione multilivello e flessibile (Guallart, 2014).

Il 'wood urbanism' (Fig. 5) individua il legno, e in particolare quello ingegnerizzato, come materiale primario per gli edifici e le città dell'immediato futuro, in virtù delle sue eccezionali proprietà strutturali, termiche, fisiologiche ed esperienziali, delle caratteristiche affini ai principi della bioeconomia circolare grazie alla sua leggerezza, lavorabilità e biodegradabilità e delle sue ineguagliabili potenzialità per mitigare l'attua-

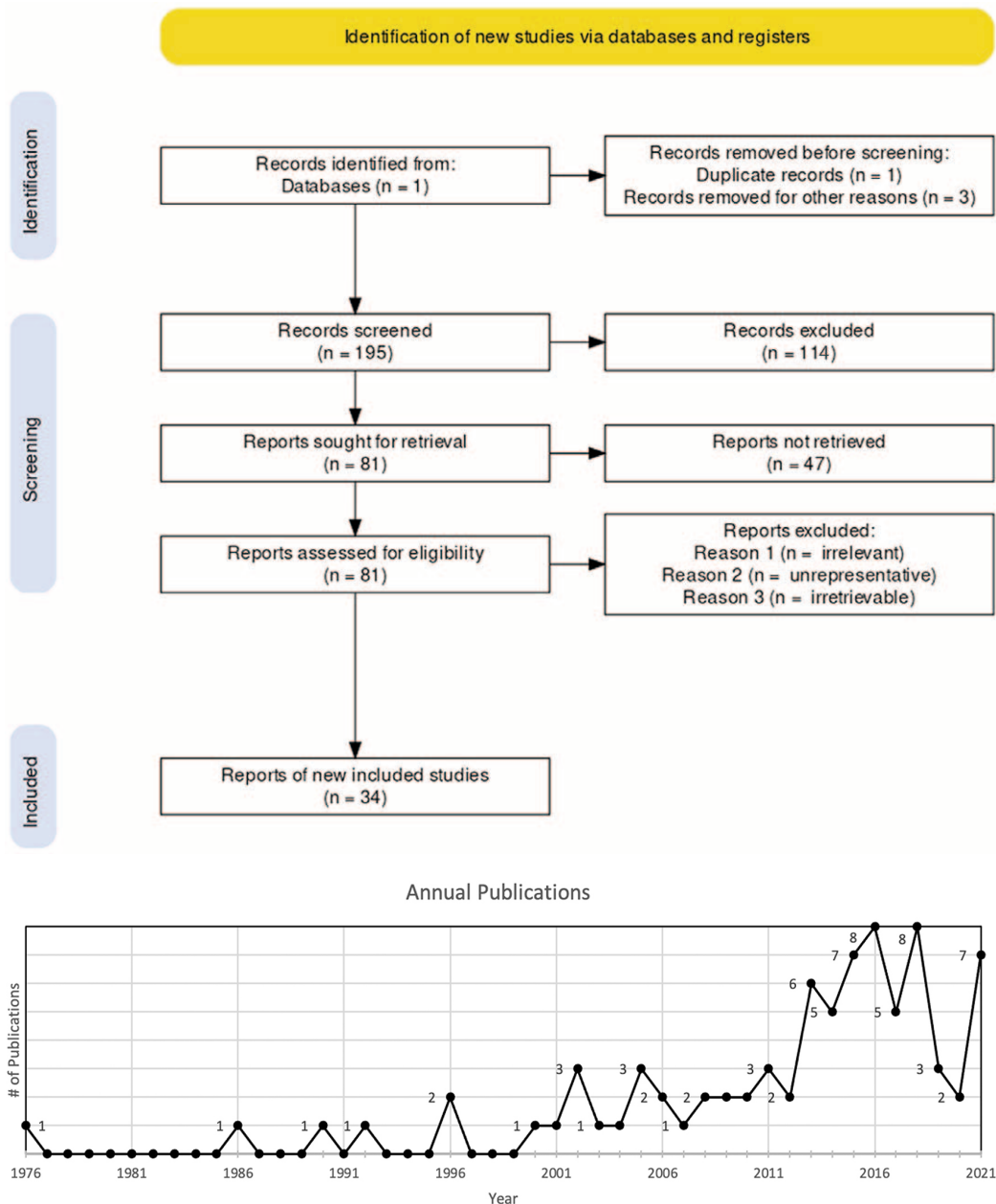


Fig. 1 | PRISMA Flow Diagram created with the R Package and ShinyApp (credit: M. Salka, 2022; source: Haddaway, McGuinness and Pritchard, 2021).

Fig. 2 | Annual publications of records concerning ecology, architecture and education (credit: M. Salka, 2022).

le emergenza ambientale, climatica e della biodiversità sequestrando il carbonio, valorizzando le foreste e sostenendo i Servizi Ecosistemici ove abbinati a pratiche di GSF. Il 'wood urbanism' riconosce anche che, a fronte di continui miglioramenti nell'efficienza operativa degli edifici, gli impatti 'integrati' dei materiali e dei loro processi di produzione e costruzione rappresentano temi sempre più dominanti per la ricerca futura (Ibañez, Hutton and Moe, 2019).

VL fa propri quindi i concetti formulati dalle teorie de 'the self-sufficient city' e del 'wood urbanism' attraverso un metabolismo circolare (Fig. 6), un ecosistema generativo di cicli chiusi a km zero che prevede la produzione regionale o locale di energia, beni, risorse e servizi attraverso le Nature-based Value Chains (NbVCs), catene corte di valore basate sulla natura che forniscono beni rinnovabili e biologici (per esempio, cibo, legname e altri prodotti forestali non legnosi), oltre a beni inorganici comunque basati sulla natura

(per esempio, elettricità dalla luce solare, acqua, terra, argilla, ecc.). Il principio del km zero è applicato anche ai processi morfologici che determinano le forme architettoniche e urbane attraverso adattamenti eliomorfi del luogo, governando gli apporti del sole, dei venti e dell'umidità dell'aria⁴ (Bruno, Arcuri and Carpino, 2015; Mastouri et alii, 2017). Grazie a una avanzata progettazione e fabbricazione digitale e alla rete ICT, così come alla prefabbricazione, alla modularità, al DfM – Design for Manufacture e al DfD – Design for Disassembly (Esmaellian, Behdad and Wang, 2016), l'obiettivo di VL è mettere a sistema questi metabolismi circolari a km zero basati sulla natura per passare da una logica di globalizzazione, di estrazione delle materie prime e di impiego di combustibili fossili a un paradigma di rinnovabilità e sostenibilità regionale e locale.

Learning by Making | La IAAC adotta il metodo del 'learning by doing' in tutti i suoi curricula; per

i professionisti che operano nei settori dell'architettura e dell'urbanistica, il 'learning by doing' è declinato con il 'learning by making', ossia imparare creando, fabbricando, assemblando e implementando i diversi elementi dell'ambiente costruito, e VL si ispira a modelli pedagogici storici innovativi per unire pratica e orientamenti ecologici.

Il primo modello storico è il Taliesin Fellowship, fondato nel 1932 e ribattezzato The School of Architecture at Taliesin (TSOA) nel 2017. Nel Taliesin Fellowship gli allievi lavoravano fianco a fianco con Frank Lloyd Wright su progetti iconici come la Fallingwater (1936-1939) e il Guggenheim Museum (1956-1959), contemporaneamente immergendosi nell'approccio 'organico' di Wright al design e nei paesaggi drammatici di Taliesin e Taliesin West (Fig. 7). Gli allievi non solo lavoravano e studiavano in questi luoghi, ma vivevano anche sul posto in rifugi di loro progettazione coltivando la terra (Gibson, 2020). Così come proposto per 'the self-sufficient city', l'obiettivo di Wright era di rendere gli studenti stessi responsabili, per quanto possibile, del loro mantenimento e della loro cura, assegnando loro la manutenzione dei giardini, il lavoro nei campi e l'allevamento di animali ma anche attività quotidiane quali fare il bucato, cucinare e pulire, secondo una suddivisione equilibrata dei compiti⁵. Oltre a ispirare l'eccellenza architettonica, Wright riteneva che una immersione completa in questo metodo didattico potesse formare esseri umani con buone capacità di relazione, creativi e con ampi orizzonti (Gibson, 2020). Dopo aver formato più di 1.200 professionisti in 88 anni di attività a Taliesin e Taliesin West, la TSOA decise di trasferirsi nei vicini edifici Arcosanti e Cosanti di Paolo Soleri (1956-1970)⁶; quest'ultimo, simile a Wright sotto molti aspetti, è un'altra fonte d'ispirazione per VL avendo coniato il neologismo sincratico 'arcology' dall'unione di 'architecture' ed 'ecology' (Grierson, 2016; Pacheco, 2020).

Una più recente fonte di ispirazione è rappresentata dallo Hooke Park dell'Architectural Association (AA, s.d.; Fig. 8), particolarmente rilevante per VL, vista la comune applicazione di strumenti digitali avanzati al design ecologico. Fondato negli anni '80 come contraltare alla sede metropolitana dell'AA a Londra, Hooke Park ospita un programma Design and Make della durata di 12 o 16 mesi, oltre a brevi residential workshop sul tema della progettazione del paesaggio, mettendo a disposizione strutture e attrezzature per la fabbricazione e l'assemblaggio dei manufatti e alloggi per i partecipanti all'interno di un bosco secolare della Dorset Area of Outstanding Natural Beauty.

VL si ispira anche a una serie di iniziative prototipiche di design, fabbricazione e costruzione nell'ambito del mandato dell'IAAC e tra queste la Fab Lab House (2010), l'Endesa Pavilion (2011) e l'Endesa World Fab Condenser (2014), che promuovono sistemi costruttivi in legno ecologicamente ed energeticamente reattivi, co-creati, progettati e fabbricati digitalmente⁷. Il punto in comune tra i pionieri del metodo e VL è la necessità primaria di 'rimaterializzare' la formazione in ambito architettonico e urbanistico, superando la visione secondo la quale architetti e designer sono soggetto decisionale estranei all'atto del fare.

Valldaura come Living Lab | Come avvenuto a Taliesin, VL promuove il metodo del 'learning by doing', coinvolgendo studenti, ricercatori e volontari in un'esperienza unica di 'learning by living'. Per reintegrare creativamente gli ambienti naturali con quelli costruiti, i professionisti sono indirizzati a comprendere l'essenza degli ambienti naturali che ospitano le loro costruzioni: vivendo, lavorando e studiando materie come la biologia, l'ecologia e l'agricoltura in aggiunta a quelle più convenzionali sull'architettura, presso VL e durante un intero anno solare gli studenti acquisiscono una profonda conoscenza del paesaggio circostante e delle sue metamorfosi stagionali.

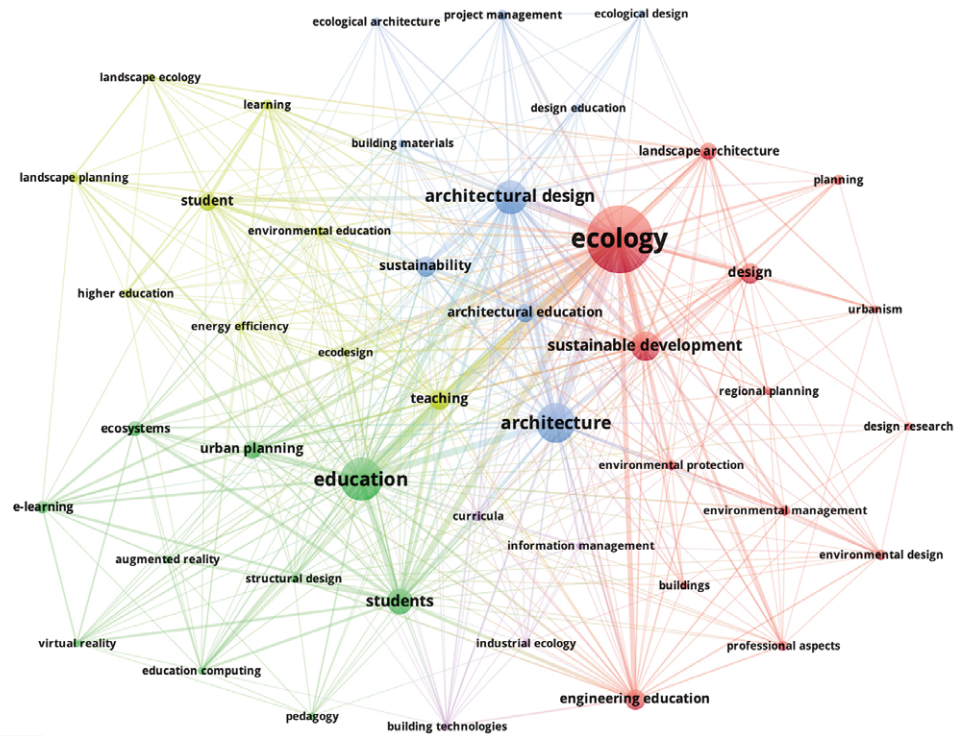
VL è un living lab, definito dall'European Network of Living Labs (ENoLL) come «[...] user-centred, open innovation ecosystems based on systematic user co-creation approach, integrating research and innovation processes in real-life communities and settings»⁸. Per le città e il mondo delle costruzioni, i living lab possono svolgere l'importante ruolo di mettere in risalto e riconnettere le relazioni metaboliche, altrimenti oscurate e mercificate, tra le fasi del processo (ad esempio, fase decisionale, approvvigionamento, produzione, trasformazione, costruzione e smaltimento). Presso VL, i fruitori (studenti, insegnanti, ricercatori, imprese in incubazione, tecnici comunali o utenti in generale) co-creano innovazioni alla scala architettonica e urbana e partecipano al sostentamento della struttura e della comunità stessa. Il laboratorio di creazione digitale (dotato di macchine per il taglio laser, stampanti 3D, fresatrici CNC, ecc.) e l'officina di falegnameria (attrezzata con strumenti manuali e meccanici) permettono a VL di superare i confini delle mura del laboratorio per includere i processi metabolici della GSF.

Le attività di GSF alimentano anche un impianto locale di energia a biomassa e valorizzano una 'food forest' biodinamica con una produzione significativa di frutta, noci e altri prodotti forestali non legnosi. Oltre alla silvicoltura, VL dispone di giardini terrazzati e serre irrigate da sistema di canalizzazioni che sfrutta il dislivello dei terrazzamenti della masia per distribuire l'acqua piovana raccolta in bacini e quella della falda freatica estratta dai pozzi orizzontali e verticali (qanats) costruiti dai monaci cappuccini che per primi si insediarono nel XII secolo⁹. In questi luoghi gli utenti di VL partecipano attivamente anche al funzionamento e alla manutenzione di queste infrastrutture, praticando così attività tecnologicamente avanzata in un 'monastero del XXI secolo', luogo dove avvengono i processi più elementari della vita sociale (Fig. 9). A differenza degli antichi monasteri, VL non è luogo claustrale ma aperto in termini di diversità disciplinare e culturale poiché i 15-20 studenti di ogni edizione del Master sono rappresentativi di quasi altrettante nazionalità. La composizione volutamente variegata della comunità, unita al metodo didattico del 'learning by living', consente ai partecipanti di apprendere in modo naturale, promuovendo una prospettiva 'glocale' caratterizzata da questioni sia locali che globali.

L'apprendimento è ulteriormente incoraggiato collocando gli studenti in ambienti condivisi con imprese giovani che detengono brevetti di tecnologie ecologiche e investono su attività di ricerca, sviluppo e innovazione; tra queste si segna-

lano DroneCoria¹⁰, una piccola/media impresa (PMI) che sviluppa droni di compensato open-source, progettati per disperdere i semi degli alberi per la riforestazione, e Robotics for Microfarms¹¹ (ROMI), un progetto Horizon 2020 che sviluppa tecnologie robotiche e di intelligenza artificiale per aiutare le piccole aziende agricole a gestire la complessità dei regimi di semina diversificati.

Un prototipo per il futuro | Il coronamento del MAEBB annuale sono la progettazione, la fabbricazione e il montaggio di un prototipo di edificio ecologico avanzato. Le ultime tre edizioni del MAEBB¹² (Fig. 10) hanno portato alla realizzazione della Niu Haus/EcoHouse V01 (2019), del Voxel, una cabina di quarantena /EcoHouse V02 (2020) e della Solar Greenhouse (2021). I manu-



VOSviewer

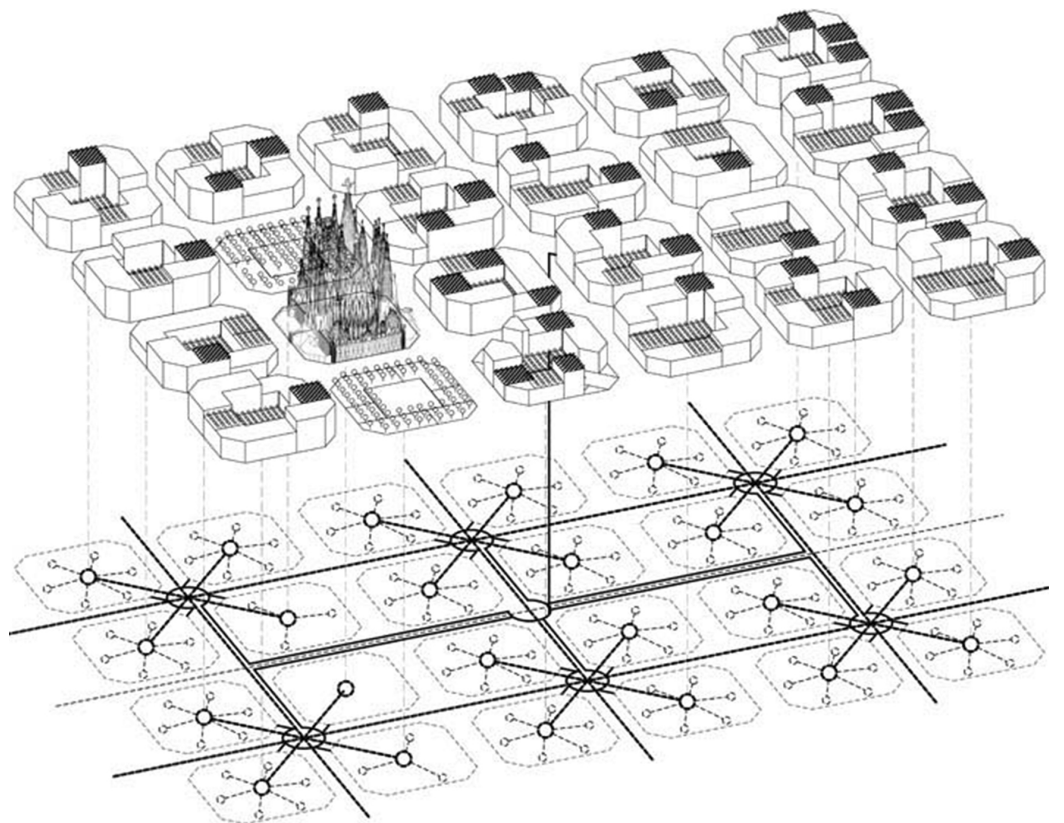


Fig. 3 | Author keywords co-occurrence network created with VOSviewer, limited for legibility to the 49 keywords with at least 3 occurrences (credit: M. Salka, 2022; source: van Eck and Waltman, 2021).

Fig. 4 | 'The self-sufficient city' theorises the city as a network of networks (source: Guallart, 2014).

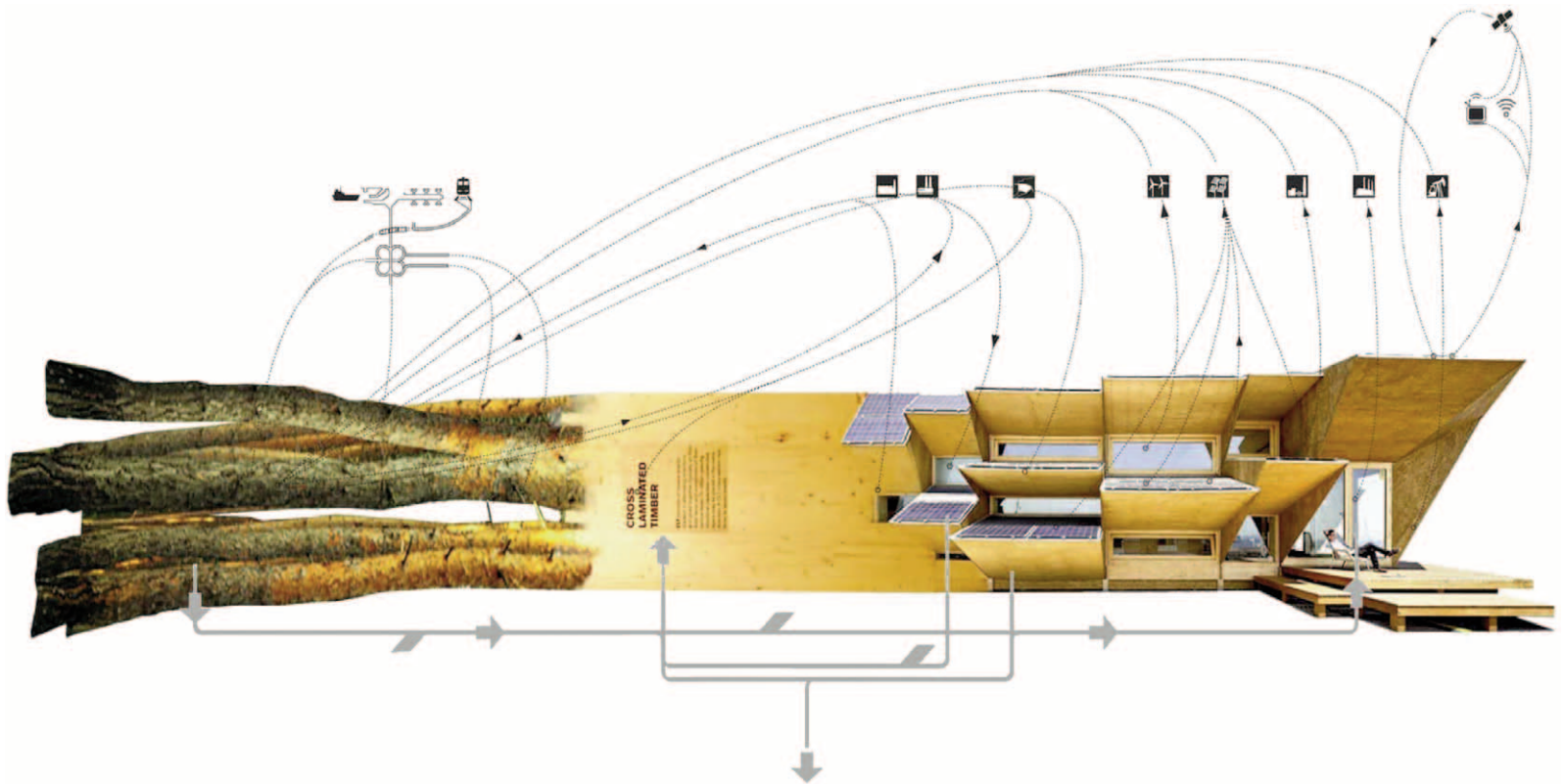


Fig. 5 | 'Wood urbanism' theorises architectural and urban metabolisms spanning from the forest, through material processing, to the construction, operation, and disassembly of buildings and cities (source: Ibañez, 2019).

fatti hanno un ingombro ridotto (circa 15-20 mq), in quanto vengono realizzati completamente in loco da un team eterogeneo di studenti, personale e volontari nell'arco delle 8-12 settimane, a completamento del programma. Tutti i progetti, che sono ampiamente scalabili (Perriccioli, Ruggiero and Salka, 2021), si basano principalmente su: design in legno massello, sequestro del carbonio, GSF e prefabbricazione modulare, Nature-based Value Chains corte e regionali, tracciabilità e quantificazione del carbonio incorporato e dell'energia dei materiali, sistemi decentralizzati e distribuiti di energia rinnovabile, gestione di acqua e rifiuti e infine sincronizzazione digitale dei dati.

I manufatti realizzati impiegano il legno, e in particolare quello ingegnerizzato, per i telai (Scouse et alii, 2020; Sposito and Scalisi, 2019), poiché questo materiale naturale genera una modesta emissione di gas serra (GHG), richiede un minore apporto di combustibili fossili durante il taglio, la fabbricazione, il trasporto e il montaggio rispetto a componenti equivalenti in acciaio o cemento, e consente una riduzione del carbonio atmosferico pari a circa 1,9 tonnellate per ogni metro cubo di prodotto in legno messo in opera (Churkina et alii, 2019; Himes and Busby, 2020; Sathre and O'Connor, 2010; Scouse et alii, 2020). La facilità di lavorazione e la leggerezza del legno, dotato di un buon rapporto resistenza-peso e modulo elastico-peso paragonabili all'acciaio strutturale (Ramage et alii, 2017), fanno sì che sia perfetto per la prefabbricazione modulare (Lehmann, 2013; Lowe, 2020; Scouse et alii, 2020).

La prefabbricazione è una valida alternativa a sistemi costruttivi tradizionali a umido e produce diversi vantaggi¹³ quali una maggiore pre-

cisione dimensionale dei componenti, una più alta qualità dell'edificio, l'automazione della produzione, la riduzione di pericoli ricorrenti nei cantieri e di inquinamento acustico durante le fasi di realizzazione, la riduzione dei tempi di posa in opera e dei costi, ma anche una assoluta compatibilità con le logiche sostenibili del DfM e del DfD (Lehmann, 2013; Scalisi and Sposito, 2021). La leggerezza del legno rispetto all'acciaio o al calcestruzzo genera anche ulteriori benefici in-dotti, riducendo il materiale necessario per le fondazioni e la quantità di carburante e di attrezzature per la posa in opera ma anche migliorando le prestazioni sismiche del manufatto (Scouse et alii, 2020).

Ciononostante, il bilancio di CO₂ delle costruzioni in legno è strettamente legato alla provenienza e alla sostenibilità della materia prima. Così, per i prototipi, VL impiega il legname attraverso pratiche GSF prelevandolo dal Parco Naturale di Collserola (Aldeguer et alii, 2008; Banqué i Casanovas and Vayreda i Duran, 2010). La tenuta di Valldaura, disboscata per scopi agricoli negli anni '50 (Fig. 11), appare oggi lussureggiante con una quantità di pini d'Aleppo ('*Pinus halepensis*') superiore a quella di querce e altre specie a legno duro (ad esempio, '*Quercus alba*', '*Quercus ilex*', '*Corylus avellana*', '*Laurus nobilis*', ecc.), che invece normalmente sarebbero dominanti in una foresta secolare in questa zona geografica. Le direttive del Piano ufficiale del parco consentono di rimuovere selettivamente fino al 40% della biomassa esistente, fatto questo che non solo fornisce molta materia prima per le costruzioni sperimentali di VL e per la produzione di energia, ma accelera anche il ripristino dell'ecosistema, aumenta la biodiversità e riduce il rischio di incendio.

Dopo aver selettivamente raccolto il legno, VL supervisiona il processo di realizzazione in loco di una NbVC completa per fresare, asciugare, lavorare e trasformare il legname grezzo in prodotti a km zero ingegnerizzati, come il Cross-Laminated Timber (CLT). Riducendo le distanze geografiche tra le fasi del processo, VL è in grado di sfruttare strumenti digitali come la scansione fotogrammetrica e da drone lidar, così come la semplice videografia, la fotografia e la marcatura fisica con vernici colorate, il tutto per creare un database che permetta la tracciabilità in ogni fase dei materiali a partire dalle coordinate originali degli alberi, dal taglio del legname fino alla sua collocazione nell'edificio realizzato (Fig. 12). Questa metodologia operativa consente di calcolare con precisione carbonio ed energia incorporati, successivamente rappresentati in diagrammi di flusso interattivi Sankey e mappe dei punti di origine tramite interfacce software personalizzate e di facile lettura, sviluppate insieme ad esperti di visualizzazione dei dati (Fig. 13; Perriccioli, Ruggiero and Salka, 2021).

Queste interfacce permettono agli attori che non hanno esperienza nei protocolli tecnici Life Cycle Assessment di ottimizzare efficacemente le specifiche dei materiali e danno conferma che le opzioni bio-based sequestrano quantità considerevoli di CO₂ (Pacheco-Torgal, Ivanov and Tsang, 2020). Il Life Cycle Assessment ha consentito di quantificare il sequestro netto del Voxel pari a 3.326,87 kg di CO₂, cifra che, presa singolarmente, può sembrare modesta a causa delle piccole dimensioni della struttura, ma se rapportata su scala globale può realizzare uno stoccaggio annuale tra i 10 e i 680 milioni di tonnellate di CO₂ (Churkina et alii, 2019). Infatti, tutte le iniziative di VL devono essere intese come spe-

rimentazioni concettuali per sviluppi più ambiziosi nel prossimo futuro. Al semplice osservatore esterno si può perdonare una classificazione riduttiva dei prototipi di VL come 'regionalisti' (in virtù del fatto che si sostanziano in NbVC corte e regionali), ma si tratta di un'interpretazione parziale poiché, sebbene il regionalismo è generalmente inteso in opposizione al metropolitano, le opere di VL sono sia regionali che metropolitane (e quindi globali), in quanto, nonostante la loro attuale collocazione sia in ambito rurale, si impegnano su temi e necessità proprie degli ambiti urbani.

In particolare, se la Niu Haus rappresenta una soluzione per vivere al di fuori delle città in modo minimalista, autosufficiente ed evasivo, il Voxel fornisce, sotto forma di rifugio per la quarantena, una risposta alle problematiche legate al Covid-19 e alla densità urbana, promuovendo la costruzione di alloggi collettivi in legno come pilota per un edificio di edilizia sociale in CLT di 40 unità abitative, che i Direttori di VL stanno preparando per il quartiere Sant Martí di Barcellona (Ajuntament de Barcelona, 2021). Infine, la Solar Greenhouse rappresenta un prototipo di moduli rapidamente implementabili per sfruttare l'alto numero di tetti urbani sottoutilizzati di Barcellona. L'impiego del design digitale e delle tecniche di fabbricazione, così come di altre tecnologie avanzate, rafforza l'idea che i prototipi di VL non si fondano sulla difesa di un arretramento regionale, né sulla regressione verso un passato vernacolare idealizzato, ma piuttosto propongono soluzioni cosmopolite se pur programmate a livello regionale.

Ogni prototipo di VL integra sistemi per la produzione di energia (fotovoltaico), la raccolta dell'acqua piovana, il riciclaggio e il trattamento di quelle grigie e dei rifiuti organici (attraverso la separazione dei liquidi dai solidi per il compostaggio o con digestori di biogas autonomi), secondo principi identici a quelli che la teoria de 'the self-sufficient city' auspica di portare in scala nell'ambito urbano. Inoltre, nonostante i prototipi siano allocati in siti distanti tra loro, sono di fatto connessi attraverso tecnologie all'avanguardia, come una rete 5G privata e autonoma, realizzata in collaborazione con un consorzio regionale di telecomunicazioni (Perriccioli, Ruggiero and Salka, 2021).

Conclusioni | In sintesi, VL riconosce la necessità che una nuova generazione di professionisti possieda le competenze interdisciplinari necessarie per mettere in campo azioni mitigative e adattive in risposta al cambiamento climatico globale, all'inquinamento ambientale, alla perdita di biodiversità e all'esaurimento delle risorse naturali in un contesto di continua crescita della popolazione e dei fenomeni di urbanizzazione. In letteratura sembra esistere una carenza su approcci formativi basati su pratiche ecologiche (in ambito architettonico e urbanistico) che impieghino sistemi innovativi per individuare risposte all'emergenza ambientale globale. VL colma questa lacuna fornendo agli studenti un 'living lab' dove approfondire congiuntamente il nuovo tema dell'ecologia e quello più tradizionale dell'architettura, per un'autosufficienza del costruito improntata ai principi di bioeconomia circolare basata sulle NbS. Il posizionamento all'interno di un'a-

rea tematica trascurata ma di fondamentale importanza, insieme alla metodologia formativa del 'learning by living' all'interno di una comunità diversificata e internazionale di coetanei e mentori, definisce il valore aggiunto e innovativo di VL rispetto ad altre attività didattiche pratiche.

VL implementa le metodologie formative dei pionieri TSOA e Hooke Park per creare un 'living lab' contemporaneo che facilita il 'learning by living' attraverso la realizzazione di prototipi. VL persegue così la realizzazione di un cambio di paradigma olistico, passando da metabolismi architettonici e urbani alimentati dai fossili, globalizzati, lineari, centralizzati, del tipo top-down, gerarchicamente rigidi e verticali, a metabolismi architettonici e urbani sostenuti da fonti rinnovabili, localizzati o regionalizzati, del tipo bottom-up, circolari, decentralizzati e distribuiti, bottom-up, dinamicamente reattivi e basati sulla natura, che mettono in armonia, piuttosto che in competizione, la prosperità dell'ambiente e quella della civiltà umana.

Tre sono i limiti individuati per la diffusione delle pratiche di VL, il primo dei quali legato al costo di iscrizione al Master che, pur essendo competitivo rispetto a quella di altre Università europee, rimane comunque, in assenza di finanziamento esterno, troppo elevato per molti studenti. Il secondo è legato al carattere immersivo e pratico e alla necessità di vivere all'interno della struttura per diversi mesi, il che richiede più tempo e maggiore impegno fisico rispetto a molti altri Master e compromette l'accessibilità a studenti con disabilità. Il terzo è relativo al taglio pratico delle attività di formazione, particolarmente adatto a classi di misura ridotta. In futuro sarebbe opportuno indagare come le metodologie formative di VL possano beneficiare di un maggior numero di studenti ma anche verificare la trasferibilità dei principi applicati da VL a contesti urbani con differenti requisiti climatici e risorse na-

turali, per esempio con la realizzazione di social housing che impiegano il CLT e di serre solari sui tetti nella città di Barcellona. Per il momento resta da vedere come i laureati delle tre edizioni del MAEBB metteranno in pratica quanto appreso presso VL al completamento del programma.

For the first time, in 2020, the overall material output of human activities (anthropomass), exceeded the 1.1 trillion tonnes of planetary biomass (Bar-On, Phillips and Milo, 2018; Elhacham et alii, 2020; Erb et alii, 2018). The resultant pressures of global climate change, environmental pollution, biodiversity loss, and natural resource depletion (Smil, 2012; Zalasiewicz et alii, 2019), combined with the need to continue enlarging the anthropomass to equip the ongoing growth and rural to urban migration of human populations (UN, 2019), place immense responsibility on those individuals and organisations engaged with the production of anthropogenic materials to lead the radical changes needed for transformations to a 'good' Anthropocene (McPhearson et alii, 2021). Designers and makers of the built environment have outstanding prospects to contribute, as buildings are the largest source of global CO_{2eq} emissions (40%) when accounting for the production of their materials, construction processes, and operations¹. Accepting this obligation, how can stakeholders go about making intelligent decisions of which building materials and systems to favour? This paper overviews how the Institute for Advanced Architecture of Catalonia's (IAAC) Valldaura Labs (VL) endows its students with the ability to innovate the answers through pedagogical prototyping and learning by living.

VL is a uniquely progressive living lab (Niitamo et alii, 2006) located only 10 km from Barcelo-

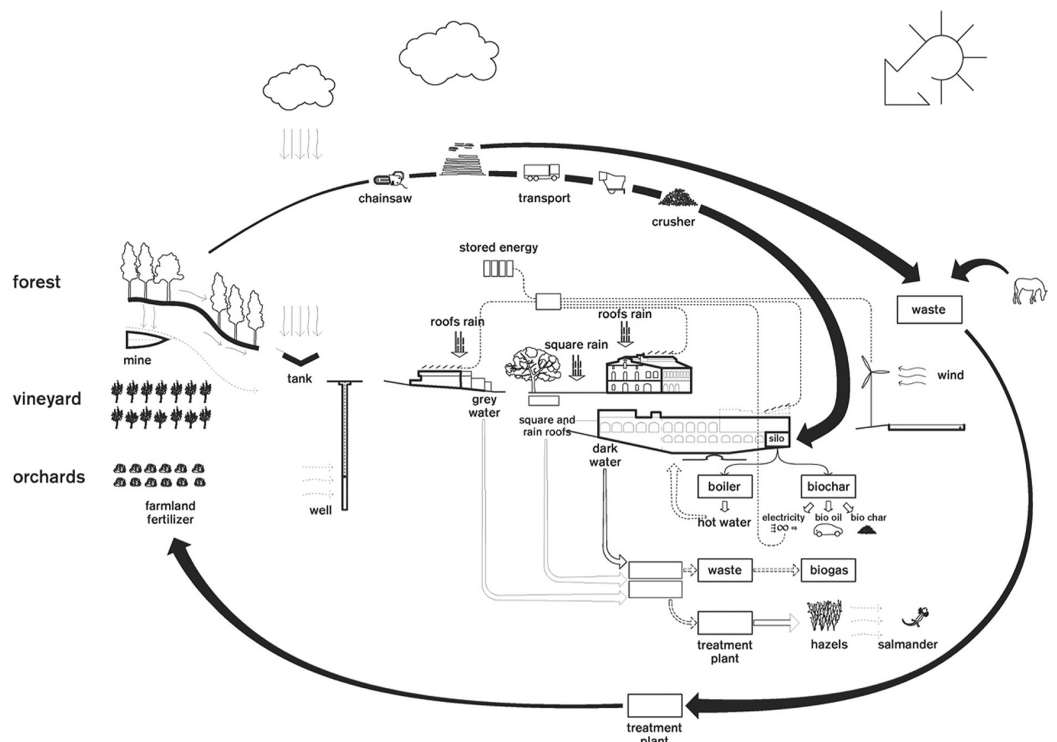


Fig. 6 | Circular metabolisms of VL (credit: Guallart, 2019).



Fig. 7 | Taliesin West (source: tsoa.edu/our-history/).

na's centre yet surrounded by the 1,300 hectares Collserola Natural Park. Anchored in a XIX-century farmhouse (masia) renovated to feature digital fabrication and carpentry workshops alongside domestic and academic amenities, VL hosts the immersive Master in Advanced Ecological Buildings & Biocities (MAEBB). Since 2018, the MAEBB has drawn approximately 75 students from around the world to live at the rural estate whilst studying and practising methods for intentionally blurring the distinction between anthropomass and biomass towards a 'unified' landscape (Ratti and Belleri, 2020; Simon, 1996). The MAEBB culminates annually in the autonomous conception and construction of a self-sufficient prototypical building relying upon local, nature-based means, materials, and circular flows to the greatest extent possible (Guallart, 2014).

VL fulfils this mandate by incorporating the estate's 135 hectares of forest within the metabolism of the premier Green Fab Lab², supplying manual and computational design and manufacturing with natural material feedstocks through Sustainable Forest Management (SFM). In this way, VL educates the incipient generation of built environment practitioners through the hands-on realisation of carbon-negative, bioclimatic projects which elevate human health and wellbeing as well as improve the resilience of the ecosystems from which their materials are sourced and in which they are sited (Ibañez, Hutton and Moe, 2019).

Following this introduction and a review of the state-of-the-art which reveals VL's innovative alignment with scientific and cultural discourses such as Nature-based Solutions (NbSs), circular bioeconomy, and the New European Bauhaus

(European Commission, 2021), this paper proceeds to: introduce VL as a catalyst for transitions; discuss the background of learning by making; explain how VL fosters learning by living as a living lab; and summarise the prototypes through which VL demonstrates best practices of reference for integrating ecological and technological landscapes. Conclusions, barriers, limitations, and future developments or possible new research directions are then presented.

Literature Review | To contextualise how VL surpasses the state-of-the-art it is necessary to review the existing literature. Adopting the method of relevant prior studies, a systematic and bibliometric review has been conducted with the aid of Scopus (Choi, Berry and Smith, 2021; Darko et alii, 2020; Manzoor, Othman and Pomares, 2021; Pineda-Pinto, Frantzeskaki and Nygaard, 2021; Yin et alii, 2019). A title/abstract/keyword search of journal articles, conference proceedings, and book chapters was run for the query 'ecology AND architecture AND education'; 'ecology' was prioritised as a search term as it regards the relations of organisms with their physical environments from a biological perspective; 'architecture' for its reference to the art and science of designing and building as distinguished from the skills associated with construction; and 'education' for its use as an umbrella term covering formal curricula as well as trainings, mentorships, etc. Employing the PRISMA protocol (Page et alii, 2021), 195 initial results were successively screened. Of these, 81 full-text records were sought, and 34 successfully retrieved (Fig. 1). An acknowledged limitation is the restriction to records pub-

lished in English. Given greater capacity, recombining queries with alternative search terms such as 'climate change' could have expanded the scope of the review.

The publication dates of the 81 sought records indicate pairing ecology with architecture in education has burgeoned since 1976 through the peak years of 2015, 2016, 2018 and 2021 (7-8 records each; Fig. 2). The publication rate first rose steeply from 2012 (2 records) to 2013 (6 records). This fact may be attributable in part to the European Commission's promotion of NbSs since 2013, leading to targeted calls for proposals for large-scale NbSs demonstrations released in 2016 and 2017 (Faivre et alii, 2017). At the time of writing, it is not yet possible to determine the number of publications in 2022.

Next, as preceded by various bibliometric analyses in the architecture, engineering, and construction (AEC) industries, VOSviewer was used to visualise underlying trends and patterns in this corpus (van Eck and Waltman, 2010; Manzoor, Othman and Pomares, 2021; Babalola et alii, 2021; Vilutiene et alii, 2019; Liu, Lu and Peh, 2019; Santos, Costa and Grilo, 2017). The outcome of VOSviewer (network visualisation) is a map in which spacing, grouping, colour and node links are scaled according to the strength of the relationships between keywords (van Eck and Waltman, 2010; Fig. 3).

Beyond the relative prominence of concepts and their associations, this network reveals important knowledge gaps verified by the present authors' assessment of the 34 retrievable full-texts. Notably, the most influential interdisciplinary frameworks lately elaborated to ameliorate the



Fig. 8 | Hooke Park (source: AA, n.d.).

intersection of the built and natural environments are absent (e.g., NbSs and the circular bioeconomy; Escobedo et alii, 2019; Palahí et alii, 2020). Therefore, this analysis suggests that VL contributes originality by highlighting the role of ecological architectural education within the systemic shifts most recently deemed capable of delivering sustainability by the scientific community at large. Thus, VL aligns its activities with the New European Bauhaus mission of connecting the European Green Deal (European Commission, 2019) to our living spaces and experiences.

Valldaura Labs as a Catalyst of Transitions |

VL is a facility of IAAC, a private, non-profit, professional education, outreach, research, development, and innovation (R&D+I) organisation with the main campus located in Barcelona's 22@ urban innovation district (22@Network, n.d.). IAAC promotes the mission of «[...] envisioning the future habitat of our society and building it in the present [through syntheses with] the digital revolution at all scales (from bits to geography, from micro-controllers to cities, from materials to the territory) to expand the boundaries of architecture and design and meet the challenges faced by humanity»³ and by enacting the philosophy of learning by doing. VL interprets the virtues of digital design and fabrication according to an ecological ethos influenced by the climate crisis, VL's forested location, and the theories of co-Directors Vicente Guallart and Daniel Ibañez of 'the self-sufficient city' and 'wood urbanism', respectively (Guallart, 2014; Ibañez, Hutton and Moe, 2019).

In short, 'the self-sufficient city' posits that In-

formation and Communications Technology (ICT) must underpin a radical urban revolution from the linear, centralised, top-down, hierarchically rigid production and provision of energy, goods, resources, and services to a circular, decentralised, distributed, bottom-up, dynamically responsive network of networks (Guallart, 2014). It advocates for a city in which every urban building or block is empowered to achieve some degree of self-sufficiency through localised energy generation and storage technologies (e.g., photovoltaics with battery backups), water collection, treatment and recycling systems (e.g., rainwater catchment, vegetated percolation, and greywater infrastructures), facilities for turning so-called 'waste' into assets (e.g., biogas or composting installations), amenities to cleanly convert raw materials into diverse useful items and to repair or modify those items (e.g., 3D printers, laser cutters, CNC milling machines, etc.), and assemblies for the growth of food (e.g., rooftop greenhouses) all collectively managed by an Internet of Things (IoT) consisting a multitude of sensors, actuators, information systems, and user-friendly interfaces. Moreover, such networked buildings or blocks are again to be networked with their neighbours (Fig. 4) in an urban infrastructural web made resilient through multilevel interconnectedness and the derived opportunities for flexible optimisation (Guallart, 2014).

'Wood urbanism' (Fig. 5) prescribes wood, especially engineered timber, as a primary material (mass timber) for substantiating the buildings and cities of the immediate future due to its exceptional structural, thermal, physiological and experiential properties, as well as the alignment

with circular bioeconomy principles due to its lightness, machinability and biodegradability, and its unmatched prospects for mitigating the current environmental, climatic, and biodiversity crises by sequestering carbon, valuing forests, and supporting Ecosystem Services when paired with SFM practices; 'wood urbanism' also recognises that, with improvements in buildings' operational efficiencies well underway, the 'embodied' impacts of materials and their production and construction processes represent increasingly dominant themes for future research (Ibañez, Hutton and Moe, 2019).

VL integrates the concepts of self-sufficiency and mass timber through a generative ecosystem of positively reinforcing km0 feedback loops, i.e., circular metabolisms (Fig. 6). The premise of km0 is taken to include the regional or local production of energy, goods, resources, and services through short, Nature-based Value Chains (NbVCs) provisioning renewable, bio-based assets (e.g., food, timber, and other non-wood forest products – NWFPS), plus inorganic though still nature-based assets (e.g., electricity from sunlight, water, soil, clay, etc.). The km0 principle is also applied to morphological processes determining architectural and urban forms through place-based heliomorphic adaptations responding to solar parameters and thermodynamic adaptations responding to fluxes of air, moisture, and heat⁴ (Bruno, Arcuri and Carpino, 2015; Mastouri et alii, 2017). Facilitated by the advanced digital design and fabrication and ICT networking referenced above, as well as prefabrication, modularity, DfM – Design for Manufacture, and DfD – Design for Disassembly (Esmailian, Behdad and Wang, 2016),



Fig. 9 | MAEBB students engaged in diverse aspects of learning by living at VL (credit: Valldaura Labs, 2021).

VL views the end goal of weaving together these nature-based km0 circular metabolisms as a shift from the globalised, extractive, fossil-fuelled status quo to a renewably-sustained, localised or regionalised paradigm.

Learning by Making | IAAC emphasises learning by doing in all of its curricula. For architectural and urban practitioners, a core facet of learning by doing is learning by making, that is to say fabricating, assembling, and implementing elements of the built environment. The merger of a hands-on pedagogy with ecological factors at VL is inspired by groundbreaking historical models.

First is The Taliesin Fellowship, founded in 1932 and rebranded in 2017 as The School of Architecture at Taliesin (TSOA). Here apprentices initially worked hand in hand with Frank Lloyd Wright on such iconic projects as Fallingwater (1936-1939) and the Guggenheim Museum (1956-1959), whilst simultaneously steeped in Wright's 'organic' approach to design and the dramatic landscapes of Taliesin and Taliesin West (Fig. 7). Apprentices not only worked and studied in these environs but also lived on-site in shelters of their own design and farmed the terrain (Gibson, 2020). Echoing 'the self-sufficient city', Wright's original aim was that «[...] the entire work of feeding and caring for the student body so far as possible should be done by itself [...] work in the gardens, fields, animal husbandry, laundry, cooking, cleaning, serving should rotate among the students according to some plan that would make them all do their bit with each kind of work at some time»⁵. Apart from inspiring architectural excellence, Wright intended such immersion to develop well-correlated, creative human beings with wide horizons (Gibson, 2020).

After graduating more than 1,200 practitioners an over 88-year tenure at Taliesin and Taliesin West, TSOA announced plans to move to Paolo Soleri's nearby Arcosanti and Cosanti developments⁶ (1956-1970). Soleri, another well-spring for VL, was of like mind with Wright in many ways, having coined the term 'arcology' – a portmanteau of 'architecture' with 'ecology' (Grierson, 2016; Pacheco, 2020).

A more recent source of inspiration for VL is the Architectural Association's (AA, n.d.) Hooke Park (Fig. 8), which is particularly relevant to VL due to the common application of advanced digital tools to ecological design. Established in the 1980s as a counterpoint to the AA's metropolitan headquarters in London, Hooke Park hosts a 12 or 16-month Design and Make programme and short residential workshops for landscape-focused projects between various assembly, fabrication, and accommodation spaces within a designated Ancient Woodland of the Dorset Area of Outstanding Natural Beauty.

VL also draws upon a lineage of prototypical design, fabrication, and construction initiatives within the remit of IAAC. These include the Fab Lab House (2010), the Endesa Pavilion (2011), and Endesa World Fab Condenser (2014), which exemplify environmentally and energetically responsive, co-created, digitally designed and fabricated timber building systems⁷. The golden thread binding these progenitors and VL is the fundamental need to re-materialise architectural and urban education and erase the notion of the

architect or designer as a decision-maker withdrawn from the act of making.

Valldaura as a Living Lab | Like Taliesin before it, VL pushes learning by doing to its furthest extent, immersing students, researchers, and volunteers in an unparalleled experience of learning by living. To creatively reintegrate the natural and built environments, built environment practitioners must come to understand the natural environments which host and sustain their constructions. Living, working and studying biology, ecology, and agriculture in complement to more conventional architectural topics at VL for a full calendar year, students gain intimate familiarity with the enveloping landscape and its seasonal metamorphoses.

VL functions as a living lab, defined by the European Network of Living Labs (ENoLL) as «[...] user-centred, open innovation ecosystems based on systematic user co-creation approach, integrating research and innovation processes in real-life communities and settings»⁸. In the case of cities and the AEC industries, living labs may play the important role in illuminating and reconnecting the otherwise black-boxed and commodified metabolic relations of urbanisation (e.g., decision-making, sourcing, production, transformation, building, and disposal). At VL, users (students, instructors, researchers, incubated entrepreneurs, municipal actors, or members of the general public) co-create architectural and urban innovations, as well as the sustenance of the facility and community itself. Together, VL's digital fabrication lab (with laser cutters, 3D printers, CNC milling machines, etc.), and carpentry workshop (with passive and powered tools) enable VL to exceed the boundaries of the laboratory walls and encompass the forests of the estate within its metabolisms through SFM.

SFM operations also fuel an on-site biomass energy plant and enhance the biodynamic 'food forest' with significant production of fruits, nuts, and other NWFPs. Besides silviculture, VL features terraced gardens and greenhouses irrigated by a graduated cascade of tanks and basins which collect rainwater through catchment systems connected to the masia's exposed terraces, and groundwater through vertical and horizontal wells (qanats) constructed by capuchin monks who first settled the area in the 12th century⁹. VL's users actively participate in the operation and maintenance of these infrastructures, thereby practising advanced craftsmanship in a 'monastery of the 21st century', in the sense of being a place where all the most basic processes of social reproduction occur (Fig. 9). Unlike ancient monasteries, VL is not cloistered but richly cosmopolitan in terms of the disciplinary and cultural diversity of users present at any given time; the 15-20 MAEBB students of each edition consistently represent nearly as many nationalities. This purposefully variegated community makeup, joined with the learning by living pedagogy, results in an immeasurable amount of tacit exchange bolstering a 'glocal' perspective characterised by both local and global considerations.

The tacit learning is further encouraged by situating students in spaces shared with incubated entrepreneurial ecological technology and related cross-cutting R&D+I endeavours. Recent



Fig. 10 | MAEBB prototypes, from top to bottom: the Niu Haus/EcoHouse V01, 2019; the Voxel, a Quarantine Cabin/EcoHouse V02, 2020; and the Solar Greenhouse, 2021 (credit: Valldaura Labs).

accompanying users include Dronecoria¹⁰, a small/medium enterprise (SME) developing open-source, digitally-fabricated plywood drones to disperse tree seeds for re/afforestation, and Robotics for Microfarms¹¹ (ROMI), a Horizon 2020 project developing appropriate robotic and computer vision technologies to aid small-scale farms in handling the complexity of diversified planting regimes.

Prototyping the Future | The capstone of the MAEBB is the collaborative design, fabrication and assembly of one prototypical advanced ecological building per year. The three editions of the MAEBB¹² (Fig. 10) to date have resulted in the successful completion of the Niu Haus/EcoHouse V01 (2019), the Voxel, a Quarantine Cabin/EcoHouse V02 (2020), and the Solar Greenhouse (2021). Whereas feasibility compels these projects to occupy a small physical footprint (approximately 15-20 sqm) seeing as they are rapidly realised

with every stage of the work undertaken by an egalitarian team of students, staff, and volunteers in on-site facilities, they nonetheless encapsulate extensively scalable ideas (Perriccioli, Ruggiero and Salka, 2021). Chiefly, these 'big ideas' include: mass timber design, carbon sequestration, SFM and modular prefabrication; short and regional NbVCs; quantitative traceability of materials' embodied carbon and energy; decentralised and distributed renewable energy, water and waste systems; and informational connectivity.

Mass timber design is defined as that which heavily utilises wood products, specially engineered timber, for building frames (Scouse et alii, 2020; Sposito and Scalisi, 2019). These wood products generate far fewer greenhouse gas (GHG) emissions and require less fossil fuel inputs during extraction, manufacture, transport, and erection than alternative steel or concrete components, engendering atmospheric carbon

reductions of approximately 1.9 tonnes per metre cube of installed wood product (Churkina et alii, 2019; Himes and Busby, 2020; Sathre and O'Connor, 2010; Scouse et alii, 2020). Harmoniously, the easy machinability and lightness of timber, with strength-to-weight and elastic modulus-to-weight ratios comparable to structural steel (Ramage et alii, 2017), makes wood products optimally suited to modular prefabrication (Lehmann, 2013; Lowe, 2020; Scouse et alii, 2020).

Prefabrication represents a desirable alternative to traditional in-situ construction due to several benefits¹³, including: improving the precision of components and the quality of the building; enabling automation of production; reducing the hazards of building sites during construction; reducing the ecological or urban disturbance of building sites during construction; shortening the erection time; reducing the cost; and enabling DfM and DfD (Lehmann, 2013; Scalisi and Spo-

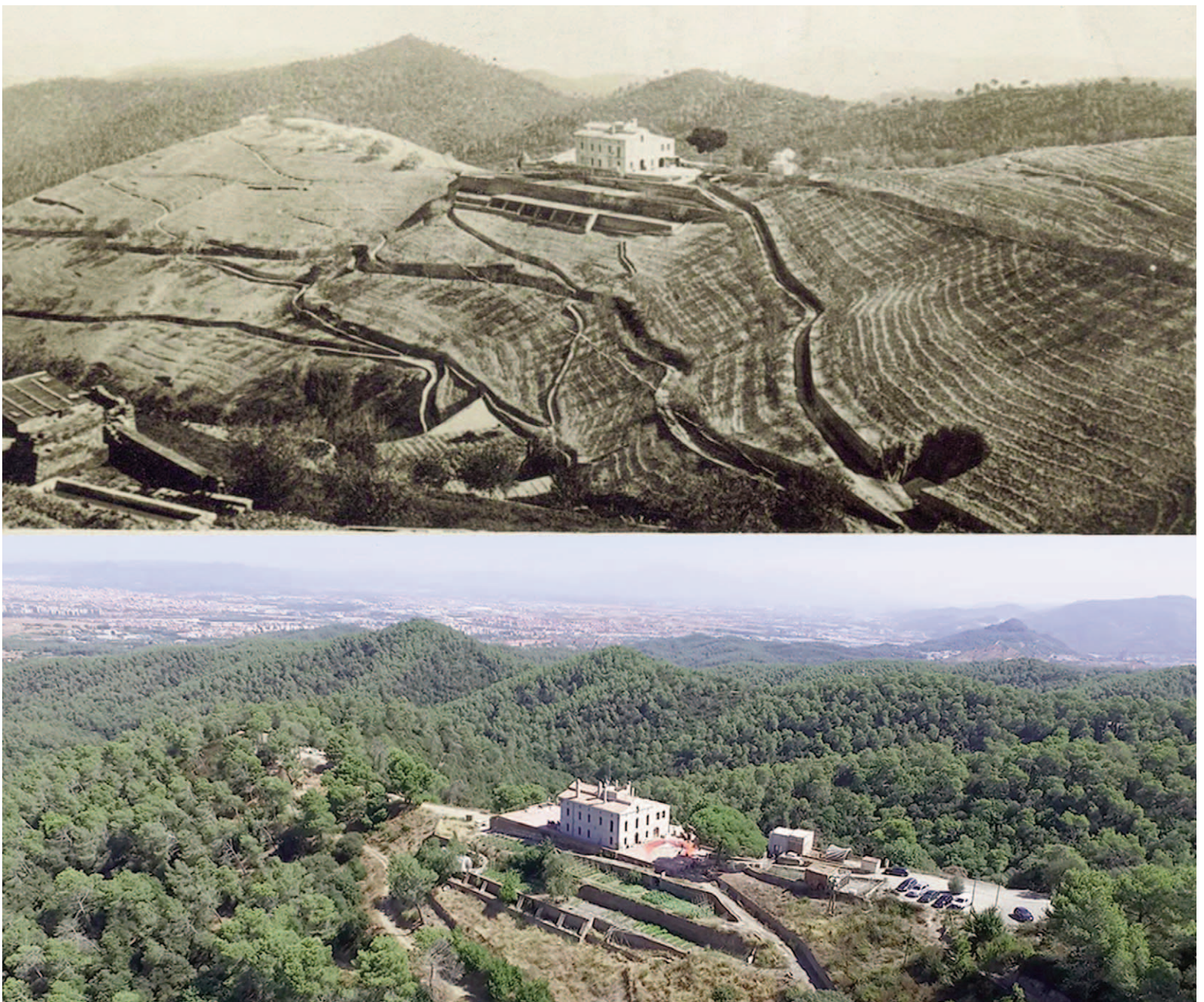


Fig. 11 | Valldaura estate clear-cut in the 1950's and recently revegetated with pioneering forest species (source: valldaura.net, 2021).

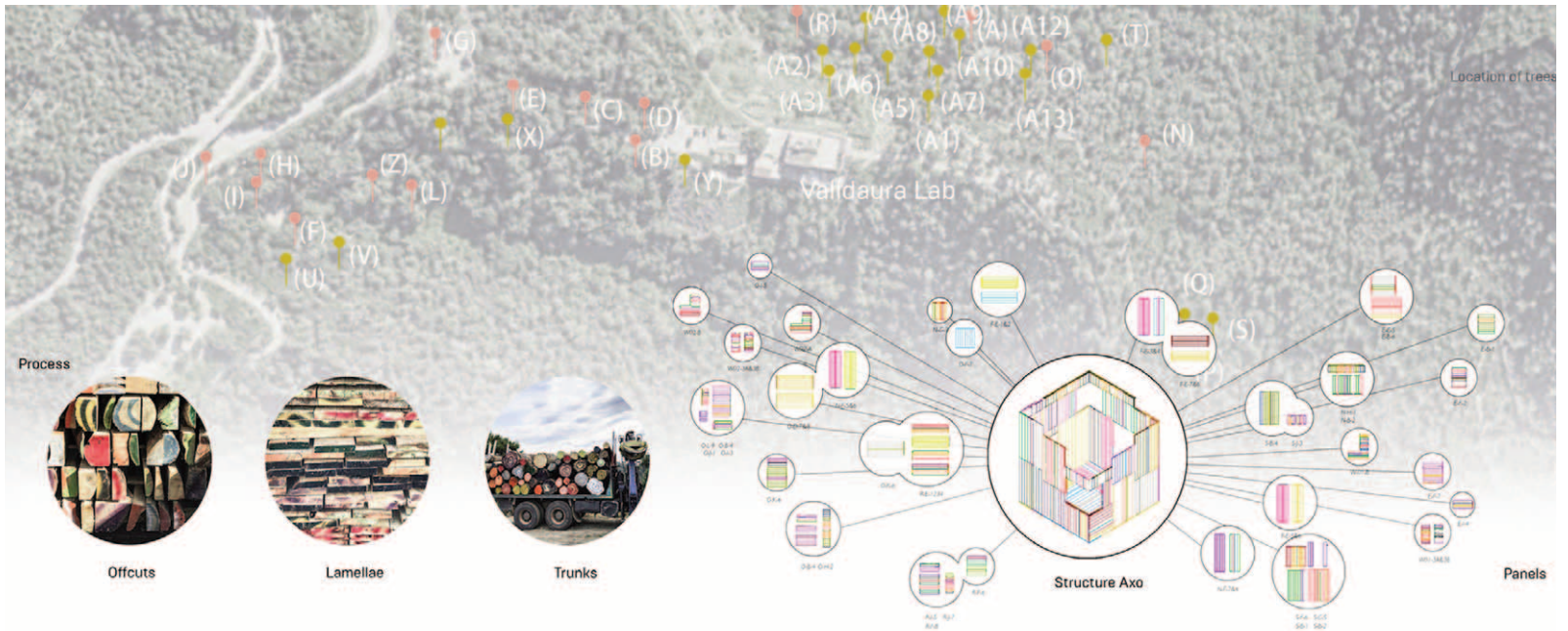


Fig. 12 | Diagram illustrating the record maintained of material traceability, from tree, to 3D model, to built structure (credit: Valldaura Labs, 2021).

sito, 2021). The comparative lightness of timber to steel or concrete forwards other beneficial feedback loops as well, whether by reducing the amount of material needed for foundations, reducing the amount of fuel and equipment needed for assembly, or improving seismic performance (Scouse et alii, 2020).

Still, the carbon budget of mass timber constructions depends largely upon that timber being sourced through SFM. VL obtains timber for its prototypes through SFM practices in line with the official Plan for the greater Collserola Natural Park (Aldeguer et alii, 2008; Banqué i Casanovas and Vayreda i Duran, 2010). Despite appearing lushly vegetated today, the Valldaura estate was clear-cut for agricultural purposes as recently as the 1950s (Fig. 11). Consequently, the pioneering Aleppo pine trees (*Pinus halepensis*) currently overshadow and overcrowd the oaks and other hardwoods (e.g., *Quercus alba*, *Quercus ilex*, *Corylus avellana*, *Laurus nobilis*, etc.) which would naturally dominate a mature forest in this location. Accordingly, the directive to selectively remove up to 40% of the extant biomass not only provides ample timber for VL's experimental constructions and energy production but also accelerates ecological succession, boosting biodiversity and ES mitigating erosion, runoff, and fire risk.

After selectively harvesting said timber, VL oversees the on-site facilitation of a comprehensive NbVC which mills, dries, processes, and transforms the raw lumber into km0 engineered timber products such as Cross-Laminated Timber (CLT). By geographically condensing the entirety of this sequence, VL is able to leverage digital tools such as photogrammetric and lidar drone scanning, as well as simple videography, photography, and physical marking with coloured paints, to inform a database permitting traceability of the materials from the trees' original standing coordinates through every phase of transportation or transformation leading to their positions in the finished building (Fig. 12). This pursuit

in turn enables the precise calculation of embodied carbon and energy, subsequently diagrammed as interactive Sankey flow charts and point of origin maps via custom, easily-read software interfaces developed in tandem with data visualisation experts (Fig. 13; Perriccioli, Ruggiero and Salka, 2021).

These interfaces empower actors lacking expertise in technical Life Cycle Assessment protocols to effectively optimise material specifications and evidence that favouring bio-based options sequesters substantial amounts of CO₂ (Pacheco-Torgal, Ivanov and Tsang, 2020). Such tools showed that VL's Voxel achieved net sequestration of 3,326.87 kg of CO₂. Whilst this singular figure may appear modest due to the small size of the structure, research implies that, scaled to global proportions, equivalent construction of timber buildings for new urban dwellers could store 10 to 680 million tonnes of CO₂ per year (Churkina et alii, 2019). Indeed, all of VL's initiatives are to be understood as proofs of concept seeding grander, near-future developments. Whilst the casual observer may be forgiven for classifying VL's prototypes under regionalism or regional design due to their substantiation by short, regional NbVCs, this is a partial interpretation. Regionalism is generally understood in opposition to metropolitanism, whereas the works of VL are both regional and metropolitan (i.e., glocal), in that, despite their rural locations, they engage thematically with urban/metropolitan situations, demands, and conditions.

Specifically, the Niu Haus represents a solution for minimal, self-sufficient, escapist living outside cities; whereas the Voxel responds to Covid-19 and urban density as a shelter for quarantine and generates a dialogue with mass timber collective housing construction by serving as the pilot demonstrator for a 40-dwelling unit CLT social housing building now being prepared by the directors of VL for construction in the Sant Martí district of Barcelona (Ajuntament de Barcelona, 2021). In turn, the Solar Greenhouse rep-

resents a prototype for rapidly deployable modules to augment underutilised urban rooftops throughout the city of Barcelona. The prioritisation of digital design and fabrication techniques and incorporation of other advanced technologies reinforce the fact that VL's prototypes do not manifest advocacy of regional retrenchment, nor a regression to an idealised vernacular past, but rather propose regionally-informed, cosmopolitical solutions.

Finally, every VL prototype integrates photovoltaic energy, water collection and greywater recycling, and blackwater and organic waste treatment (either via the separation of liquids from solids for composting or in self-contained biogas digesters) identical to those which 'the self-sufficient city' theory espouses being brought to scale in the urban realm. Similarly, belying the isolation of their sites, VL's prototypes are informationally connected through cutting-edge installations such as a private, stand-alone rural 5G network established in partnership with a consortium of regional telecom organisations (Perriccioli, Ruggiero and Salka, 2021).

Conclusions | In summary, VL acts upon re-governance practitioners versed in the interdisciplinary knowledge domains required to mitigate and adapt to global climate change, environmental pollution, biodiversity loss, and natural resource depletion in the face of ongoing population growth and urbanisation. Elsewhere, there is an apparent shortage of approaches synthesising hands-on ecological, architectural, and urban pedagogies with the emergent systems framing solutions to global environmental challenges. VL fills this gap by embedding students in a living lab where they study both ecological and architectural topics in order to explore the areas of overlap, and engage in all the acts of self-sufficient production which correspond with the principles of a circular bioeconomy based on NbSs. It is this positioning within a neglected, critical area of synthetic focus, paired with the gestalt

combination of tacit learning by living within a diverse, worldly community of peers and mentors, that enables VL to add value beyond that of other hands-on educational activities.

VL progresses the innovative historic precedents of TSOA and Hooke Park to create a distinctly contemporary form of living lab facilitating learning by living through pedagogical prototyping. In this way, VL pursues the mission of realising a holistic paradigm shift from fossil-fuelled, globalised, linear, centralised, top-down, hierarchically rigid architectural and urban metabolisms to renewably-sustained, localised or regionalised, circular, decentralised and distributed, bottom-up, dynamically responsive, nature-based architectural and urban metabolisms which bring the

prosperity of the environment and that of human civilisation into mutualistic symbiosis rather than competition.

A notable barrier limiting dissemination of good practices from VL is the inaccessibility of total participation in the educational programmes. Although tuition fees are competitive with comparable European Universities, they remain too expensive for many prospective students to afford lacking external funding. More particularly, the immersive, hands-on, residential character of the MAEBB demands greater time and physical commitments than many other master's programmes, compromising accessibility for prospective students balancing other commitments or disabilities. The hands-on instruction format also

benefits from smaller class sizes. In the future, it would be worth investigating how the VL training methodologies can benefit more students, but also how the VL principles can be transferred to different urban contexts with different climatic requirements and natural resources, e.g., social housing using CLT and solar greenhouses on roofs in the city of Barcelona. For the time being, it remains to be seen how the graduates of the three MAEBB editions will put into wider practice what they have learned at VL through the completion of the programme.

Acknowledgements

The contribution, resulting from a common reflection, is to be assigned in equal parts to all the Authors.

Notes

- 1) For more information, see the webpage: architecture2030.org/ [Accessed 21 March 2022].
- 2) The term Metabolism is used herein to broadly signify the processing of matter and energy to maintain life)
- 3) For more information, see the webpage: iaac.net/iaac/about/ [Accessed 21 March 2022].
- 4) For more information, see the webpages: passivehouse.com/; officeforurbanization.org/heliomorphism/ [Accessed 21 March 2022].
- 5) For more information, see the webpage: tsoa.edu/our-history/ [Accessed 21 March 2022].
- 6) For more information, see the webpage: arcosanti.org/arcology/ [Accessed 21 March 2022].
- 7) For more information, see the webpages: iaac.net/project/endesa-world-fab-condenser/; iaac.net/project/endesa-pavilion/; iaac.net/project/fab-lab-solar-house/ [Accessed 21 March 2022].
- 8) For more information, see the webpage: enoll.org/about-us/ [Accessed 21 March 2022].
- 9) For more information, see the webpage: valldaura.net/about/history/ [Accessed 21 March 2022].
- 10) For more information, see the webpage: dronectoria.org/en/main/ [Accessed 21 March 2022].
- 11) For more information, see the webpage: romi-project.eu/ [Accessed 21 March 2022].
- 12) For more information, see the webpages: valldaura.net/labs/other-research-activities/; valldaura.net/ecohouse-v01-prototype-the-niu-haus/; valldaura.net/ecohouse-v02-prototype-the-voxel-a-quarantine-cabin/; valldaura.net/solar-greenhouse/ [Accessed 21 March 2022].
- 13) For more information, see the webpage: constructionworld.org/7-benefits-prefabricated-construction/ [Accessed 21 March 2022].

References

- 22@Network (n.d.), *Innovation District*. [Online] Available at: 22network.net/district-22/?lang=en [Accessed 21 March 2022].
- AA – Architectural Association (n.d.), *Hooke Park*. [Online] Available at: aaschool.ac.uk/about/hookepark [Accessed 21 March 2022].
- Ajuntament de Barcelona (2021), *Resol't el concurs per construir quatre promocions d'habitatge industrialitzat a Sant Martí*, 02/08/2021. [Online] Available at: ajuntament.barcelona.cat/premsa/2021/08/02/resol't-el-concurs-per-construir-quatre-promocions-dhabitatge-indus

trialitzat-a-sant-marti/ [Accessed 21 March 2022].

Aldeguer, A., Capdevila, M., Ceresuela, C., Izquierdo R. and Puy, E. (2008), “Anàlisi i gestió dels recursos forestals del Parc de Collserola”, in *Diagnosi ambiental al Parc de Collserola*, pp. 71-77. [Online] Available at: parcs.diba.cat/documents/75109/786eafe2-c48b-4722-bb2f-66fd90b83185 [Accessed 21 March 2022].

Babalola, A., Musa, S., Akinlolu, M. T. and Haupt, T. C. (2021), “A bibliometric review of advances in building information modeling (BIM) research”, in *Journal of Engineering, Design and Technology*, vol. ahead-of-print, n. ahead-of-print. [Online] Available at: doi.org/10.1108/JEDT-01-2021-0013 [Accessed 21 March 2022].

Banqué i Casanovas, M. and Vayreda i Duran, J. (2010), *Estudi del potencial d'aprofitament forestal al Parc Natural de la Serra de Collserola*, CREA. [Online] Available at: parcnaturalcollserola.cat/pdfs/cdreR7648.pdf [Accessed 21 March 2022].

Bar-On, Y. M., Phillips, R. and Milo, R. (2018), “The biomass distribution on Earth”, in *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 115, n. 25, pp. 6506-6511. [Online] Available at: doi.org/10.1073/pnas.1711842115 [Accessed 21 March 2022].

Bruno, R., Arcuri, N. and Carpino, C. (2015), “The Passive House in Mediterranean Area – Parametric Analysis and Dynamic Simulation of the Thermal Behaviour of an Innovative Prototype”, in *Energy Procedia*, vol. 82, pp. 533-539. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.866 [Accessed 21 March 2022].

Choi, C., Berry, P. and Smith, A. (2021), “The climate benefits, co-benefits, and trade-offs of green infrastructure – A systematic literature review”, in *Journal of Environmental Management*, vol. 291, 112583, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112583 [Accessed 21 March 2022].

Churkina, G., Organschi, A., Reyer, C., Vinke, K., Ruff, A., Liu, Z., Reck, B., Graedel, T. and Schellnhuber, J. (2019), “Buildings as a global carbon sink”, in *Nature Sustainability*, vol. 3, pp. 269-273. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s41893-019-0462-4 [Accessed 21 March 2022].

Darko, A., Chan, A. P. C., Adabre, M. A., Edwards, D. J., Hosseini, M. R. and Ameyaw, E. E. (2020), “Artificial intelligence in the AEC industry – Scientometric analysis and visualization of research activities”, in *Automation in Construction*, vol. 112, article 103081, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103081 [Accessed 21 March 2022].

Elhacham, E., Ben-Uri, L., Grozovski, J., Bar-On, Y. M. and Milo, R. (2020), “Global human-made mass exceeds all living biomass”, in *Nature*, vol. 588, pp. 442-444. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s41586-020-3010-5 [Accessed 21 March 2022].

Erb, K.-H., Kastner, T., Plutzer, C., Bais, A. L. S., Car-

valhais, N., Fetzl, T., Gingrich, S., Haberl, H., Lauk, C., Niedertscheider, M., Pongratz, J., Thurner, M. and Luysaert, S. (2018), “Unexpectedly large impact of forest management and grazing on global vegetation biomass”, in *Nature*, vol. 553, pp. 73-76. [Online] Available at: doi.org/10.1038/nature25138 [Accessed 21 March 2022].

Escobedo, F. J., Giannico, V., Jim, C. Y., Sanesi, G. and Laforteza, R. (2019), “Urban forests, ecosystem services, green infrastructure and nature-based solutions – Nexus or evolving metaphors?”, in *Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 37, pp. 3-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ufug.2018.02.011 [Accessed 21 March 2022].

Esmailian, B., Behdad, S. and Wang, B. (2016), “The evolution and future of manufacturing – A review”, in *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 39, pp. 79-100. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.03.001 [Accessed 21 March 2022].

European Commission (2021), *New European Bauhaus – Beautiful, Sustainable Together*. [Online] Available at: europa.eu/new-european-bauhaus/index_en [Accessed 21 March 2022].

European Commission (2019), *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – The European Green Deal*, document 52019DC0640, 640 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN [Accessed 21 March 2022].

Faivre, N., Fritz, M., Freitas, T., de Boissezon, B. and Vandewoestijne, S. (2017), “Nature-Based Solutions in the EU – Innovating with nature to address social, economic and environmental challenges”, in *Environmental Research*, vol. 159, pp. 509-518. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.envres.2017.08.032 [Accessed 21 March 2022].

Gibson, E. (2020), “Shutting the School of Architecture at Taliesin is ‘an assault on Wright’s legacy’, says architect Ben Aranda”, in *Dezeen*, 29/01/2020. [Online] Available at: dezeen.com/2020/01/29/school-of-architecture-at-taliesin-frank-lloyd-wright-reaction-ben-aranda/ [Accessed 21 March 2022].

Grierson, D. (2016), “Unfinished business at the urban laboratory – Paolo Soleri, Arcology, and Arcosanti”, in *Open House International*, vol. 41, issue 4, pp. 63-72. [Online] Available at: doi.org/10.1108/OHI-04-2016-B0009 [Accessed 21 March 2022].

Guallart, V. (2014), *The Self-Sufficient City – Internet has changed our lives but it hasn't changed our cities, yet*, Actar Publisher, New York.

Haddaway, N. R., McGuinness, L. A. and Pritchard, C. C. (2021), *PRISMA2020 – R package and ShinyApp for producing PRISMA 2020 compliant flow diagrams*. [On-

line] Available at: doi.org/10.5281/ZENODO.4287834 [Accessed 21 March 2022].

Himes, A. and Busby, G. (2020), “Wood buildings as a climate solution”, in *Developments in the Built Environment*, vol. 4, article 100030, pp. 1-7. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100030 [Accessed 21 March 2022].

Ibañez, D., Hutton, J. E. and Moe, K. (eds) (2019), *Wood Urbanism – From the molecular to the territorial*, Actar Publishers.

Lehmann, S. (2013), “Low carbon construction systems using prefabricated engineered solid wood panels for urban infill to significantly reduce greenhouse gas emissions”, in *Sustainable Cities and Society*, vol. 6, pp. 57-67. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scs.2012.08.004 [Accessed 21 March 2022].

Liu, Z., Lu, Y. and Peh, L. C. (2019), “A Review and Scientometric Analysis of Global Building Information Modeling (BIM) Research in the Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry”, in *Buildings*, vol. 9, issue 10, article 210, pp. 1-34. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings9100210 [Accessed 21 March 2022].

Lowe, G. (2020), *Wood, Well-being and Performance – The Human and Organizational Benefits of Wood Buildings*, Forest Innovation Investment. [Online] Available at: naturallywood.com/wp-content/uploads/wood-well-being-and-performance_report_graham-lowes.pdf [Accessed 21 March 2022].

Manzoor, B., Othman, I. and Pomares, J. C. (2021), “Digital technologies in the architecture, engineering and construction (AEC) industry – A bibliometric-qualitative literature review of research activities”, in *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18, issue 11, article 6135, pp. 1-26. [Online] Available at: doi.org/10.3390/ijerph18116135 [Accessed 21 March 2022].

Mastouri, H., Benhamou, B., Hamdi, H. and Mouyal, E. (2017), “Thermal performance assessment of passive techniques integrated into a residential building in semi-arid climate”, in *Energy and Buildings*, vol. 143, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.022 [Accessed 21 March 2022].

McPhearson, T., Raymond, C. M., Gulrud, N., Albert, C., Coles, N., Fagerholm, N., Nagatsu, M., Olafsson, A. S., Soiminen, N. and Vierikko, K. (2021), “Radical changes are needed for transformations to a good Anthropocene”, in *Npj Urban Sustainability*, vol. 1, issue 1, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s42949-021-00017-x [Accessed 21 March 2022].

Niitamo, V.-P., Kulki, S., Eriksson, M. and Hribernik, K. A. (2006), “State-of-the-art and good practice in the field of living labs”, in *2006 IEEE International Technology Management Conference (ITMC)*, pp. 1-8. [Online] Available at: doi.org/10.1109/ITMC.2006.7477081 [Accessed 21 March 2022].

Pacheco, A. (2020), “Leaders of the School of Architecture at Taliesin and Cosanti share their vision for the future of organic architecture”, in *Architect*, 15/06/2020. [Online] Available at: architect.com/news/article/150202633/leaders-of-the-school-of-architecture-at-taliesin-and-cosanti-share-their-vision-for-the-future-of-organic-architecture [Accessed 21 March 2022].

Pacheco-Torgal, F., Ivanov, V. and Tsang, D. C. W. (2020), *Bio-Based Materials and Biotechnologies for Eco-efficient Construction*, Elsevier Science & Technology.

Page, M. J. et alii (2021), “The PRISMA 2020 statement – An updated guideline for reporting systematic reviews”, in *The BMJ*, vol. 372, n. 71. [Online] Available at: doi.org/10.1136/bmj.n71 [Accessed 21 March 2022].

Palahí, M. et alii (2020), *Investing in Nature as the true engine of our economy – A 10-point Action Plan for a Circular Bioeconomy of Wellbeing*, Knowledge to Action 02, European Forest Institute. [Online] Available at: doi.org/10.36333/k2a02 [Accessed 21 March 2022].

Perriccioli, M., Ruggiero, R. and Salka, M. (2021), “Ecologia e tecnologie digitali – L’architettura alla picco-

la scala come luogo di connessioni | Ecology and digital technologies – Small-scale architecture as a place of connections”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 10, pp. 36-45. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1032021 [Accessed 21 March 2022].

Pineda-Pinto, M., Frantzeskaki, N. and Nygaard, C. A. (2021), “The potential of nature-based solutions to deliver ecologically just cities – Lessons for research and urban planning from a systematic literature review”, in *Ambio*, vol. 51, pp. 167-182. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s13280-021-01553-7 [Accessed 21 March 2022].

Ramage, M. H., Burrige, H., Busse-Wicher, M., Fereday, G., Reynolds, T., Shah, D. U., Wu, G., Yu, L., Fleming, P., Densley-Tingley, D., Allwood, J., Dupree, P., Linden, P. F. and Scherman, O. (2017), “The wood from the trees – The use of timber in construction”, in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 68, part 1, pp. 333-359. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107 [Accessed 21 March 2022].

Ratti, C. and Belleri, D. (2020), “Verso una cyber-ecologia | Towards a cyber ecology”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 8, pp. 8-19. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/812020 [Accessed 21 March 2022].

Santos, R., Costa, A. A. and Grilo, A. (2017), “Bibliometric analysis and review of Building Information Modelling literature published between 2005 and 2015”, in *Automation in Construction*, vol. 80, pp. 118-136. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.autcon.2017.03.005 [Accessed 21 March 2022].

Sathre, R. and O’Connor, J. (2010), “Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution”, in *Environmental Science & Policy*, vol. 13, issue 2, pp. 104-114. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.envsci.2009.12.005 [Accessed 21 March 2022].

Scalisi, F. and Sposito, C. (2021), “Strategie e approcci ‘green’ – Un contributo dall’off-site e dall’upcycling dei container marittimi dismessi | ‘Green’ strategies and approaches – A contribution from the off-site and upcycling of discarded shipping containers”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 10, pp. 92-119. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1092021 [Accessed 26 April 2022].

Scouse, A., Kelley, S. S., Liang, S. and Bergman, R. (2020), “Regional and net economic impacts of high-rise mass timber construction in Oregon”, in *Sustainable Cities and Society*, vol. 61, article 102154, pp. 1-9. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scs.2020.102154 [Accessed 21 March 2022].

Simon, H. A. (1996), *The sciences of the artificial*, MIT Press, Cambridge (MA).

Smil, V. (2012), *Harvesting the Biosphere – What We Have Taken from Nature*, MIT Press, Cambridge (MA).

Sposito, C. and Scalisi, F. (2019), “High-rise timber architecture – An opportunity for the sustainability of the built environment”, in De Giovanni, G. and Scalisi, F. (eds), *PRO-INNOVATION – Process, Production, Product*, Palermo University Press, Palermo, pp. 93-122. [Online] Available at: iris.unipa.it/handle/10447/372355 [Accessed 26 April 2022].

UN – United Nations (2019), *World Population Prospects 2019 – Highlights*. [Online] Available at: population.un.org/wpp/publications/files/wpp2019_highlights.pdf [Accessed 21 March 2022].

van Eck, N. J. and Waltman, L. (2021), *VOSviewer Manual*. [Online] Available at: vosviewer.com/documentation/Manual_VOSviewer_1.6.8.pdf [Accessed 21 March 2022].

van Eck, N. J. and Waltman, L. (2010), “Software survey – VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping”, in *Scientometrics*, vol. 84, issue 2, pp. 523-538. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3 [Accessed 21 March 2022].

Vilutiene, T., Kalibatiene, D., Hosseini, M. R., Pellicer, E. and Zavadskas, E. K. (2019), “Building Information Modeling (BIM) for Structural Engineering – A Biblio-

metric Analysis of the Literature”, in *Advances in Civil Engineering*, vol. 2019, article ID 5290690, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.1155/2019/5290690 [Accessed 21 March 2022].

Yin, X., Liu, H., Chen, Y. and Al-Hussein, M. (2019), “Building information modelling for off-site construction – Review and future directions”, in *Automation in Construction*, vol. 101, pp. 72-91. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.010 [Accessed 21 March 2022].

Zalasiewicz, J., Waters, C. N., Williams, M. and Summerhayes, C. P. (eds) (2019), *The Anthropocene as a Geological Time Unit – A Guide to the Scientific Evidence and Current Debate*, Cambridge University Press. [Online] Available at: doi.org/10.1017/9781108621359 [Accessed 21 March 2022].