

Elisa Zatta, <https://orcid.org/0000-0001-9255-5238>

Dipartimento di Culture del Progetto, Università Iuav di Venezia, Italia

elisa.zatta@iuav.it

Abstract. L'origine rinnovabile e il potenziale di stoccaggio del carbonio hanno reso il legno ingegnerizzato un tema cruciale nel dibattito sulla neutralità climatica dell'ambiente costruito, a volte però interpretato in modo impreciso, come dimostra il concetto di "edifici *carbon sink*". Il saggio esplora tre ambiti da cui emergono fraintendimenti: la terminologia relativa a legno e *carbon storage*, l'assunto relativo alla rinnovabilità che non considera la natura finita delle foreste e gli schemi di trasferimento del carbonio, la conflittualità tra mercati basati su una stessa risorsa dalla disponibilità incerta. Identificando *trade-off* esistenti e futuri, il contributo esamina la inscindibile relazione tra neutralità climatica delle aree urbane e gestione del territorio che garantisce loro le risorse.

Parole chiave: *Carbon storage*, Legno ingegnerizzato, Risorse rinnovabili, Sistema città-territorio, Strategie di mitigazione.

Far quadrare i conti

Il ruolo fondamentale che materiali e sistemi costruttivi giocano nel supportare gli obiettivi di neutralità climatica europea entro il 2050 è ormai riconosciuto (UNEP e GABC, 2024). Se si considera inoltre il previsto incremento di popolazione e aree urbanizzate, i processi e i mezzi adottati per realizzare e ristrutturare edifici avranno un peso sempre più rilevante in ottica di domanda di energia ed emissioni di carbonio. Una maggior efficienza di involucro e impianti consentirà di minimizzare le esternalità della fase operativa di un edificio, ma, al contempo, le risorse materiali scelte per le costruzioni dovranno garantire quantità limitate di energia e carbonio incorporati nei prodotti. È dunque sempre più necessario considerare tutte le fasi del ciclo di vita edilizio, in ottica *Whole Life Carbon* (Le Den *et al.*, 2023), per evitare che singole scelte progettuali ostacolino un bilancio globale virtuoso.

Nel contesto attuale, in cui appare cruciale riportare la decarbonizzazione sulla traiettoria da cui ha deviato in modo quasi irreparabile, l'uso di materiali *bio-based* e rinnovabili in edili-

zia sta vivendo un forte impulso. Questa tendenza si basa sulla potenziale efficacia delle strategie di sostituzione dei materiali impiegati (Pomponi *et al.*, 2020) (UNEP e YEA+C, 2023), che promuovono alternative dagli inferiori impatti incorporati e capaci di ridurre, al contempo, il consumo di risorse non rinnovabili. A questi criteri sono spesso associati l'approvvigionamento locale, volto a ridurre le distanze di trasporto, e l'applicazione in sistemi costruttivi reversibili, in ottica di gestione circolare del fine vita. Nel caso delle componenti strutturali degli edifici, la scelta spesso individuata in sostituzione di calcestruzzo e acciaio è il legno ingegnerizzato: rinnovabile per definizione, caratterizzato da inferiore intensità energetica, adatto alla produzione ottimizzata *off-site*, assemblabile in modo rapido e a secco. Non solo tali caratteristiche giocano in favore della decarbonizzazione dei processi edilizi, ma una specifica peculiarità dei prodotti a base legno sembra garantire la decarbonizzazione di per sé: il *carbon storage*. Proprio su questo concetto si fonda la propensione per il legno strutturale dimostrata da più istituzioni internazionali, tra cui quelle comunitarie. La Strategia Europea per la Bioeconomia auspica la diffusione di elementi in legno in edilizia¹, «dato il loro potenziale nel sequestro di carbonio, nella sostituzione di risorse fossili con altre sostenibili ricavate da biomassa e nell'ampia possibilità di ridurre i gas effetto serra legata a modelli produttivi più efficienti nell'uso di risorse» (EC, 2018). Analogamente, la Nuova Strategia Europea per le Foreste evidenzia che i prodotti a base legno possono «contribuire a trasformare il settore edile da fonte di emissioni di gas a effetto serra in un pozzo di assorbimento del carbonio, come stabilito nella strategia *Renovation Wave* e nell'iniziativa *New European Bauhaus*» (EC, 2021).

Carbon storage and renewable materials: the trade-offs of the timber resource

Abstract. Timber is currently a trending topic in the debate concerning our built environment's carbon neutrality, due to its renewable nature and the potential to store carbon. Nevertheless, this premise is sometimes inaccurately interpreted, as proven by the recently emerging concept of buildings becoming carbon sinks. The paper explores three fields in which misconceptions appear to be grounded, namely the inaccurate use of vocabulary about carbon storage in timber, the renewable-based assumption disregarding carbon transfer patterns and the finite nature of forests, and the competing market sectors relying on a resource with uncertain availability. By identifying existing and future trade-offs, the contribution points out how the carbon neutrality of urban areas cannot disregard the territory they extract resources from.

Keywords: Carbon storage; City-territory system; Engineered wood; Mitigation strategies; Renewable resources.

Balancing the accounts

The significant role of building materials and systems in delivering European carbon neutrality within 2050 is by now acknowledged (UNEP and GABC, 2024). Moreover, considering the expected increase in both population and urban areas, the means and processes that will be adopted to construct and renovate buildings will have an even more relevant impact in terms of energy demand and carbon emissions. Improvements in the envelope and installation efficiency will be crucial to minimise the environmental burden during the operational phase. However, the selected material resources will also have to ensure limited quantities of the energy and carbon embodied in construction products. It is, therefore, increasingly necessary to consider each phase of the lifecycle, following a *Whole Life Carbon* ap-

proach (Le Den *et al.*, 2023), to prevent single architectural choices from affecting a global virtuous balance.

In the current context, due the urgency to steer the decarbonisation path towards the planned route it is almost diverging from for good, the use of bio-based and renewable materials in building operations has been gaining momentum. This inclination relies on the potential effectiveness of material substitution strategies (Pomponi *et al.*, 2020) (UNEP and YEA+C, 2023), promoting alternative materials with lower embodied impacts compared to the conventional ones, and reducing the consumption of non-renewable resources. Besides these criteria, other parameters are usually considered, such as local production in order to reduce transportation distances, and application in reversible building systems to foster circular

Sebbene derivi da concetti intuitivi, questa propensione va esaminata proprio in virtù dell'apparentemente semplice equazione su cui si basa – più carbonio imprigionato negli edifici, meno carbonio nell'atmosfera – come sembra suggerire l'emergente paradigma «*building as a carbon sink*» (Arehart *et al.*, 2021). E se invece, come obiettano Goswein *et al.* (2022), «un edificio costruito di solo legno trasferisse semplicemente carbonio da un bacino (la foresta) a un altro bacino (l'ambiente costruito)»? I materiali rinnovabili sono estratti da una risorsa finita, il capitale naturale, e «se una città consuma così tanto per crescere e svilupparsi, bisogna che da qualche altra parte nel pianeta quelle risorse vengano prodotte» (Mancuso, 2023). Anche per il legno, far quadrare i conti è inevitabile. Il percorso verso la neutralità climatica va dunque considerato nella mutua connessione tra l'ambiente costruito e quello naturale, solo possibile «con-testo» degli insediamenti umani (Fig. 1).

Semplici equazioni possono dare adito a interpretazioni semplificate. È dunque necessario comprendere le implicazioni di un futuro impiego intensivo del legno ingegnerizzato, per individuare approssimazioni ed equivoci di cui la progettazione ambientale in architettura può, e dovrebbe, occuparsi nel promuovere l'uso consapevole di queste risorse per aree urbane a zero emissioni. In tal senso, inquadrare in una cornice istituzionale i processi che caratterizzano il legno e i ruoli per esso prospettati nella decarbonizzazione consente di discutere, con il supporto della letteratura scientifica, gli aspetti più delicati riguardo la sua transizione sostenibile da bene naturale e rinnovabile a prodotto fruito.

Legno e trade-off

Il settore delle costruzioni sarà un “pozzo” di carbonio (EC, 2021) o le città “depositi” dislocati dello stesso (Pomponi *et al.*, 2020)? Gli elementi in legno “sequestrano” carbonio (EC, 2018) o sono le foreste a “immagazzinarlo” (Ramage *et al.*, 2017)? Tali ambiguità semantiche vanno chiarite contestualizzando foreste e legno ingegnerizzato nel ciclo del carbonio (Fig. 2) e considerando le diverse vite utili dei prodotti a base legno.

Nell'arco della loro vita, gli alberi assorbono diossido di carbonio attraverso la fotosintesi. L'attività di rimozione del carbonio dall'atmosfera è definita “assorbimento” (*uptake*) o “cattura” (*capture*) e risulta nel successivo “sequestro” (*sequestration*) biologico dello stesso (IPCC, 2019) con il graduale accumulo di biomassa nella pianta (Ramage *et al.*, 2017). Quali «entità o sistemi biogeochimici presenti sul territorio [...] nell'ambito dei quali è immagazzinato [*stored*] carbonio», le foreste rappresentano “bacini” (*pool*) di questo elemento e ne immagazzinano una quantità definita “riserva” (*stock*) (EP, 2018). Un bacino di carbonio opera quale “pozzo” (*sink*) se, con un «processo, attività o meccanismo che assorbe un gas a effetto serra dall'atmosfera», «durante un determinato intervallo di tempo, il carbonio che vi affluisce è più di quello che ne è emesso» (EP, 2018, p.7) (IPCC, 2019). Dopo il taglio degli alberi, il carbonio sequestrato

Carbonio incorporato a termine

L'entusiasmo che circonda l'i-



nelle piante resta immagazzinato anche nel tondame rimosso (*roundwood*) e continua a esserlo nei prodotti da quest'ultimo derivati. La parte rimanente della foresta vede una riduzione nello *stock* di carbonio, ma, proseguendone assorbimento e sequestro, opera ancora da riserva (immagazzinandolo) e da pozzo (rimuovendone dall'atmosfera più di quanto non ne rilasci). La riduzione della riserva di carbonio² corrisponde al trasferimento del medesimo a un altro bacino: quello dei prodotti legnosi (*Harvested Wood Products*, HPWs) (Fig. 3). Ciò significa che il legno da costruzione immagazzina in sé del carbonio, ma, non attuando più assorbimento e sequestro, non può fungere da *carbon sink* – né possono farlo gli edifici con esso costruiti – bensì da *carbon pool*.

Valutare il carbonio biogenico stoccato negli HPWs è fondamentale per definirne il contributo ai processi di *Carbon Capture and Storage* (CCS), ma molto complesso (Ramage *et al.*, 2017). Insieme alle difficoltà nell'allocare il carbonio trasferito da bacino all'altro, fattore cruciale è la mancanza di una posizione condivisa sul computo del carbonio biogenico nel modellare il *Life Cycle Assessment* (LCA) di un edificio in relazione ai confini del sistema. Secondo l'approccio "0/0", che considera l'edificio in modo autonomo, la quantità di carbonio rilasciata dai prodotti a fine vita è pari a quella accumulata nella biomassa (Hoxha *et al.*, 2020), assunto però distante dalla realtà (Leturcq, 2020). Al contrario, l'approccio "-1/+1" valuta, in modo statico o dinamico, i flussi di input e output di carbonio nell'edificio, considerandone l'apporto negativo dato dall'assorbimento (avvenuto nel "sistema foresta") e quello positivo dettato dal rilascio che avrebbe luogo nello scenario descritto dal modulo D, oltre i confini del sistema (Hoxha *et al.*, 2020; Andersen *et al.*,

2021). Se la seconda posizione supporta una valutazione più realistica e basata su un numero maggiore di informazioni, l'esito può essere fuorviante ove l'LCA si limiti alle fasi A1-A3 (*cradle to gate*). Inoltre, se la valutazione di benefici e carichi oltre il sistema delinea possibili scenari di riciclo, il potenziale di immagazzinamento di CO₂ nei prodotti da risorsa rinnovabile va comunque commisurato a una 'data di scadenza'. Indipendentemente dalla quantità di carbonio stoccato, prima o poi esso sarà rilasciato nel suolo, nel caso di conferimento in discarica, o nell'atmosfera, nel caso di recupero di energia. La vita utile dei prodotti diviene dunque fattore cruciale: considerando che il mondo delle costruzioni in legno ingegnerizzato è ancora giovane, la durabilità in opera dello stesso va approfondita per valutarne in modo completo i vantaggi.

Approvvigionamento e sequestro: duplice ruolo

Se nel futuro il legno sarà una fornitura materiale essenziale per la filiera delle costruzioni, la sua disponibilità va indagata alla luce dei termini fissati dalle principali politiche europee sulla decarbonizzazione. Ciò richiede di andare oltre la convenzionale definizione di risorsa "rinnovabile", che sottintende mezzi illimitati a disposizione dei progettisti, dato che anche quelle fossili potrebbero essere repute non finite nell'arco dei milioni di anni in cui possono rigenerarsi. Il 2050 è la scadenza prefissata per la neutralità climatica da Green Deal Europeo e, di conseguenza, Nuovo Bauhaus Europeo – iniziativa che ne traduce gli obiettivi in azioni tangibili per un ambiente costruito sostenibile e inclusivo³. Le foreste sono la risorsa che, da un lato, cattura e sequestra carbonio e, dall'altro, ne consente il trasferimento nel legno ingegnerizzato. Sono sufficientemente

management of products. Hence, focusing on structural elements, timber is considered the most suitable choice for substituting concrete and steel as it is renewable by definition and less energy-intensive, allowing for off-site optimised production, besides enabling fast and reversible assembly. Not only do these properties support the decarbonisation of building processes, but an additional one appears to guarantee decarbonisation in and of itself, designating engineered wood as the future of construction, namely carbon storage. This argument clearly inspires the penchant for timber expressed by international institutions, including the European ones. The EU Bioeconomy Strategy strongly encourages the spread of timber elements in construction¹, «given their potential for carbon sequestration, the substitution of fossil resources with sustainable biomass-

based resources, and their large greenhouse gas emissions reduction potential related to more resource efficient and sustainable production patterns» (EC, 2018). Likewise, according to the New EU Forest Strategy, wood-based products «help turn the construction sector from a source of greenhouse gas emissions into a carbon sink, as set out in the Renovation Wave Strategy and the new European Bauhaus initiative» (EC, 2021).

Although based on rather intuitive concepts, this tendency needs to be further examined precisely because of the apparently simple equation it is built upon – the more carbon locked up in buildings, the less there will be in the atmosphere, as the trend «building as a carbon sink» paradigm (Arehart *et al.*, 2021) suggests. What if, as Goswein *et al.* (2022) argue, «a building constructed from timber alone just

transfers carbon from one carbon pool (the forest) to another carbon pool (the built environment)»? All renewable materials are extracted from a finite resource, the natural capital, and «if a city depletes so many [resources] to grow and develop, it is necessary for those resources to be produced somewhere else in the planet» (Mancuso, 2023). Even for timber, balance is inevitable. Therefore, the climate neutrality path has to be followed considering the mutual connection between the urban and natural environments, the latter as the only possible "context" of human settlements (Fig. 1).

Simple equations often induce simplified interpretations. Understanding the implications produced by the future extensive use of timber in construction is thus required to identify approximations and misconceptions that environmental design in archi-

itecture can, and should, address when promoting the conscious use of engineered wood towards climate-neutral urban areas. Therefore, examining the processes characterising timber and the roles envisaged for it in decarbonisation within an institutional framework allows to discuss, with the support of scientific literature, the critical aspects of its sustainable transition from natural and renewable good to consumed product.

Timber and trade-offs

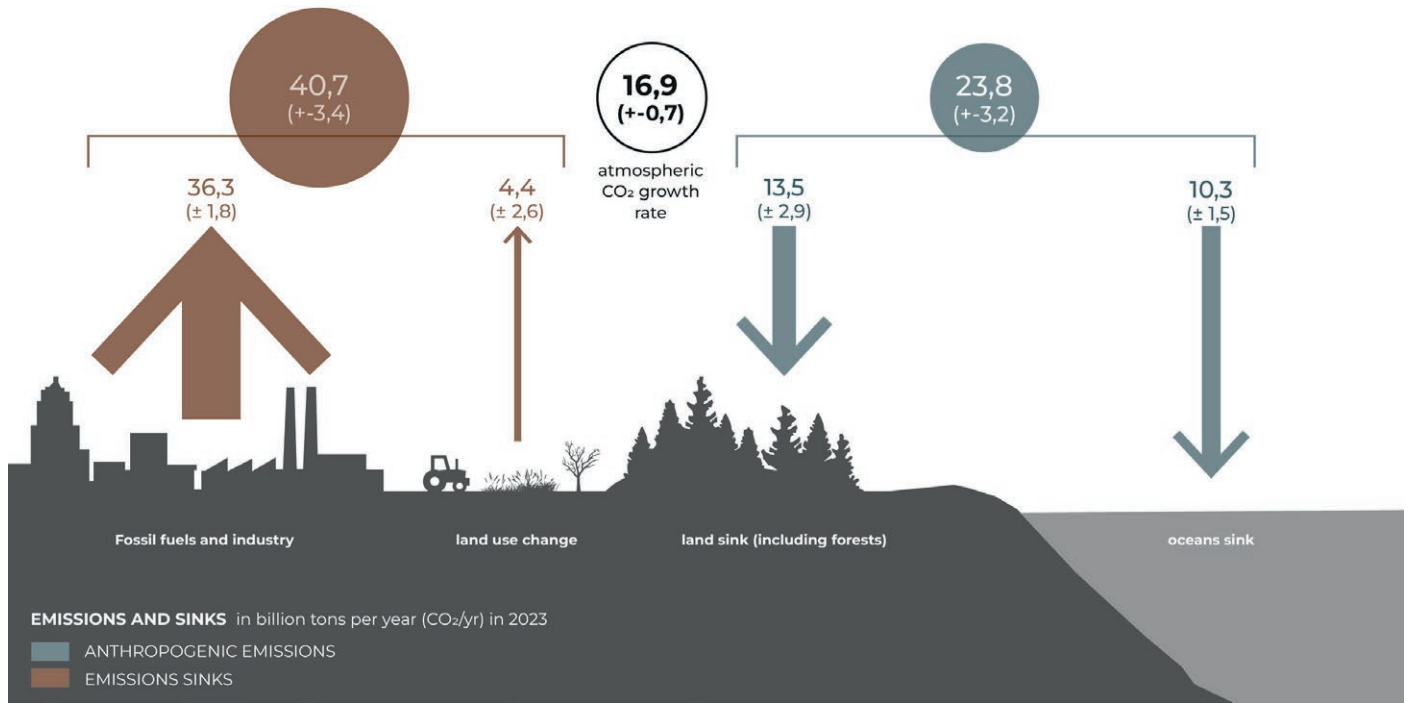
Fixed-term embodied carbon

The enthusiasm underlying an architectural timber-based future sometimes leads to the non-specific use of the related terms (Arehart *et al.*, 2021). Will the construction sector be a carbon sink (EC, 2021) or are cities displaced carbon storages (Pomponi *et al.*, 2020)? Do timber elements sequester

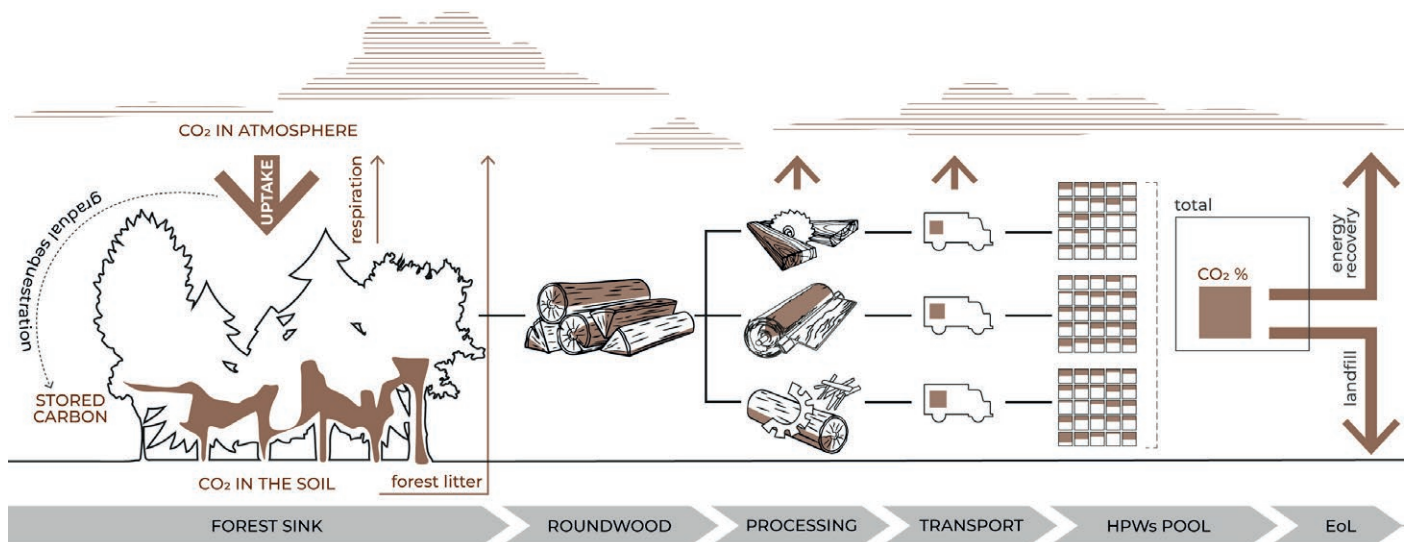
02| Ciclo del carbonio: principali fonti e pozzi a scala globale, adattato da globalcarbonatlas.org
Global carbon cycle: main sources and sinks, adapted from globalcarbonatlas.org

03| Ruolo di foreste e prodotti legnosi nel ciclo del carbonio, Elisa Zatta
The role of forests and HPW products in the carbon cycle, Elisa Zatta

| 02



| 03

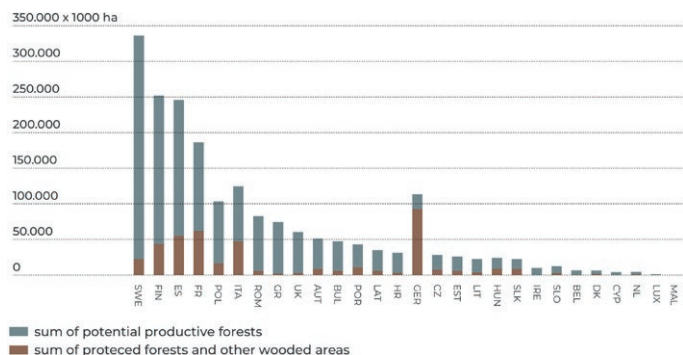


carbon (EC, 2018) or do forests store it (Ramage *et al.*, 2017)? These semantic ambiguities can be clarified by contextualising forests and timber within the carbon cycle phases (Fig. 2), and by considering the different lifespans of trees and wood-based products. During their growth cycle, trees absorb carbon dioxide through photo-

synthesis and by converting it into biomass. The process of carbon removal from the atmosphere is defined as “carbon uptake” or “capture”, resulting in subsequent (biologic) “carbon sequestration” (IPCC, 2019), which occurs by gradual accumulation of biomass within the tree (Ramage *et al.*, 2017). Being «biogeochemical

feature[s] or system[s] within the territory [...] within which carbon [...] is stored» by accumulating CO₂, forests are “carbon pools”, and the mass of carbon stored in a pool is defined “carbon stock” (EP, 2018). A carbon pool operates as a “net carbon sink” if, «during a given time interval, more carbon is flowing into it than is flow-

ing out» (Grassi *et al.*, 2021), since it activates a «process, activity or mechanism that removes a greenhouse gas [...] from the atmosphere» (EP, 2018) (IPCC, 2019). When part of a forest is cut, the carbon sequestered during the plants’ growth cycle remains stored in the roundwood, and keeps on being stored in the products that will be later



estese per fornire la quantità di materiale richiesta (Fig. 4) e, al contempo, compensare il carbonio dislocato nei prodotti che, prima o poi, rilasceranno la CO₂ immagazzinata in atmosfera o nel suolo?

Assorbimento e sequestro operati dagli alberi variano in base a specie, latitudine e fase del ciclo di vita della pianta. I prodotti in legno con funzione strutturale derivano da specie arboree diverse, i cui tondami sono soggetti a lavorazioni differenti in base a caratteristiche del legno e proprietà dei prodotti. La fabbricazione di *mass timber*, categoria più diffusa nel contesto europeo, si basa su conifere da cui derivare le tavole che compongono gli elementi stratificati. Il *composite lumber*, di più recente introduzione nel mercato comunitario, è realizzato con sfogliati (*veneer*) o scaglie (*strand*) – spesso di latifoglie a rapido accrescimento. In ottica di effettivo “rinnovo” delle risorse, una valutazione complessiva dovrebbe considerare le dinamiche estrattive unitamente alla vita utile di edifici e prodotti (Fig. 5), ma anche l’energia e le emissioni relative a manifattura e distanze di trasporto perché tali esternalità non vanifichino il carbonio già stoccato nei prodotti.

Una ricerca di Ramage *et al.* (2017) nota che per compensare l’attuale budget globale di carbonio sarebbe richiesto un (improbabile) incremento del 20% dell’area attualmente dedicata a foreste sul pianeta, assumendo l’efficace stoccaggio di carbonio nei prodotti edilizi – ovvero, in quelli dalla vita utile più lunga. Grassi *et al.* (2021) hanno stimato che la neutralità climatica europea entro il 2050 implicherebbe «aumentare il pozzo [di foreste] dal livello corrente di -360 Mt CO_{2eq}/anno a quello di -450 Mt CO_{2eq}/anno», notando che «valutare gli effetti della sostituzione materiale è molto più complesso dello stimare l’entità

di un pozzo di carbonio» (Grassi *et al.*, 2021). Pomponi *et al.* (2020) hanno analizzato la capacità delle foreste terrestri di fornire materiale sufficiente per costruire la superficie di pavimento prevista, in base alle proiezioni globali, per la metà del secolo. Il loro modello semplificato indica un bilancio sfavorevole tra domanda e offerta, suggerendo che la competizione dei mercati per l’uso del suolo minaccia «la capacità della Terra di rigenerare le risorse e fornire beni e servizi nel futuro» e sollevando dubbi sul «legno come soluzione “taglia unica”» (Pomponi *et al.*, 2020).

Conflitti di interesse

Le foreste immagazzinano carbonio e forniscono tondame per il legno da costruzione, ma non solo. La strategia di sostituzione su cui si basa la bioeconomia ha recentemente comportato una crescita nella domanda di prodotti derivati da attività forestali (UN and FAO, 2021), soprattutto bioplastiche e, paradossalmente, biocombustibili. La complessa interazione tra questi due settori, la domanda di legno per l’edilizia e il *carbon storage* delle foreste andrebbe esaminata in una prospettiva sistemica (Grassi *et al.*, 2021) e con sguardo interdisciplinare (Hetemaki *et al.*, 2024).

La bioeconomia forestale si basa su due concetti principali: che gli uomini possono soddisfare bisogni e desideri con l’uso sostenibile di risorse rinnovabili provenienti dalle foreste, e che

manufactured. The remaining part of the forest witnesses a reduction in its carbon stock. Indeed, continuing to perform uptake and sequestration, it still operates as carbon pool (storing carbon) and sink (removing more carbon from the atmosphere than the one released). The decrease in the forest carbon stock² corresponds to a transfer of carbon to another pool, namely to the harvested wood products (HWPs) (Fig. 3). Therefore, timber used in construction does store carbon. Nevertheless, as it no longer performs the uptake and sequestration processes, it can hardly be defined a carbon sink – nor can the buildings it is used in – but rather a carbon pool.

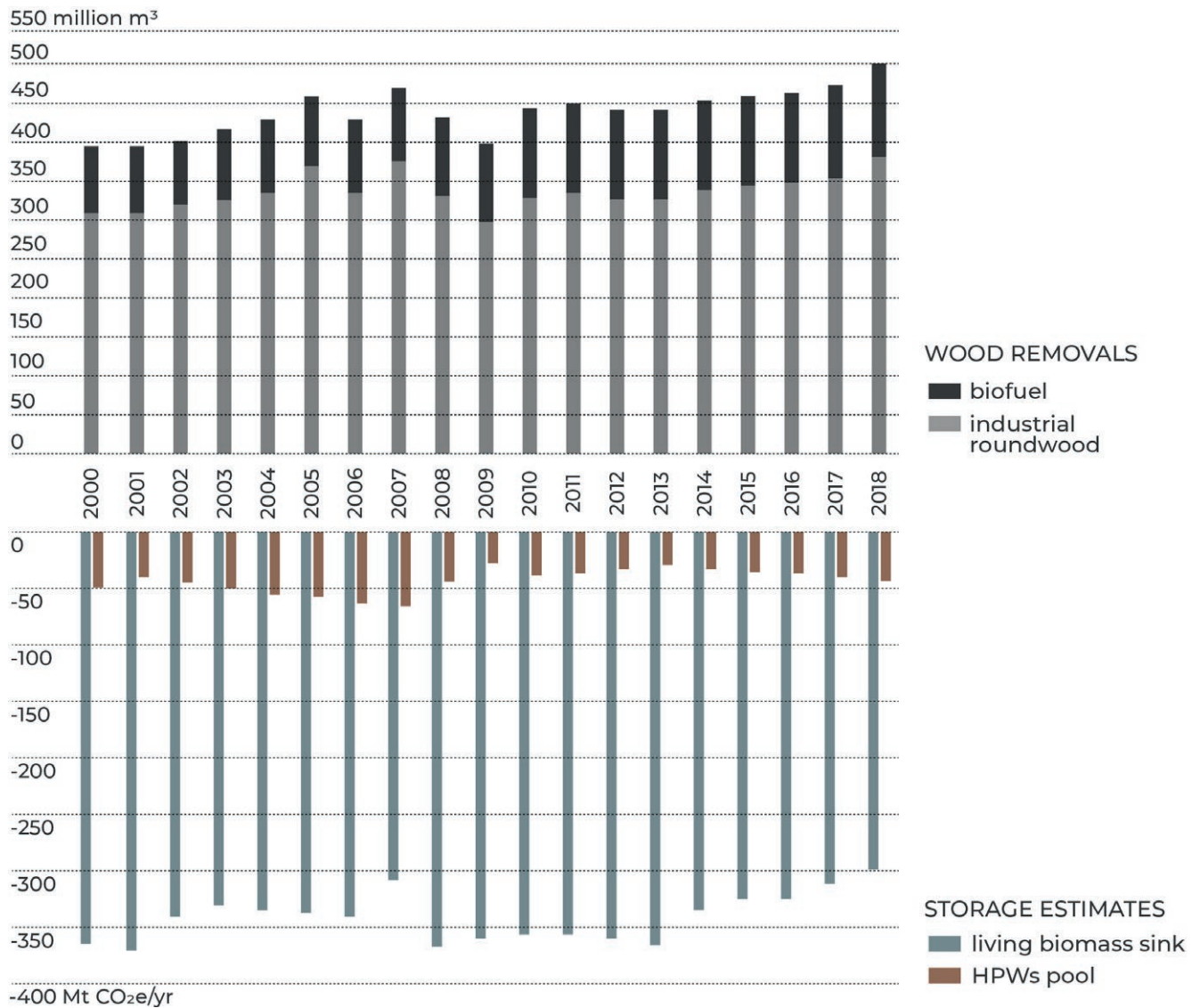
Estimating the biogenic carbon content in wood-based products is essential to evaluate the potential of HWPs in contributing to Carbon Capture and Storage (CCS) processes. It is a challenging

topic (Ramage *et al.*, 2017). Besides doubts in allocating the carbon transferred from one pool to the other, the lack of a consensus on how to calculate biogenic carbon in a building’s Life Cycle Assessment (LCA) depending on the system boundaries is a crucial factor. According to the “0/0” approach, which sees the building as detached from other systems, the amount of carbon released by HPWs at the end of life is the same one accumulated in the initial biomass (Hoxha *et al.*, 2020), an assumption that is quite distant from reality (Leturcq, 2020). Conversely, the “-1/+1” approach evaluates the input and output carbon flows for the building in a static or dynamic mode, considering the negative value resulting from the uptake (that took place in the “forest system”), and the positive one that would happen in the scenario depicted by module D, beyond the sys-

tem boundaries (Hoxha *et al.*, 2020; Andersen *et al.*, 2021). Although the latter approach supports a more realistic evaluation, and is based on more information, the results could be misleading, whereas the LCA is limited to A1-A3 phases (cradle to gate). Moreover, even if the evaluation of the loads and benefits beyond the system boundaries entails recycling, the CO₂ storage in renewable construction products has an expiry date that cannot be overlooked. One way or another, and regardless of the amount of carbon embodied, at the element’s End-of-Life the CO₂ will be released back into the soil, if landfilled, or into the atmosphere, if processed for energy recovery. The service life of elements deeply affects this timeframe and, since timber construction is in its youth, more data are needed about its durability performance to fully evaluate its advantages.

Material provision and provided sequestration

If timber is to be an essential construction material in the future, its availability should be investigated considering the window set by the European overarching policies addressing decarbonisation. This requires going beyond the conventional definition of “renewable” applied to resources, which assumes unlimited means at the designers’ disposal, given that also fossil resources could be considered non-finite in a millions-of-years’ time interval. 2050 is the deadline envisaged for carbon neutrality by the EU Green Deal and, accordingly, the New European Bauhaus, the initiative translating its objectives into tangible actions to deliver sustainable and inclusive built environments³. Forests are the resources that both absorb and store carbon, as well as allow its transfer into HWPs.



Are they sufficiently extensive to provide for the estimated amount of material required (Fig. 4) while, at the same time, compensating for the carbon displaced in wood-based products that will sooner or later be released into the atmosphere or the soil?

The carbon uptake and sequestration performed by trees varies depending on species, latitude, and the plant growth cycle phase. Moreover, wooden structural products derive from different tree species, which undergo specific manufacturing processes depending on their characteristics and the properties required for the products. Mass timber, the most widespread engineered wood in the European context, relies on fir or spruce plants to obtain the sawn planks it is composed of. Conversely, composite lumber, more recently introduced in the EU market, is made up of veneer

layers or strands – deriving in many cases from fast-growing broadleaved plants. In light of an actual “renewal” of resources, a comprehensive evaluation should consider the extractive dynamics together with the lifespans of buildings and products (Fig. 5), but also the energy and emissions related to manufacturing and transport to prevent such aspects from nullifying the carbon stored in products.

An extensive review provided by Ramage *et al.* (2017) observed that the current global carbon budget would require an (unlikely) 20% increase in the existing area of forests worldwide, assuming an effective storage of carbon in building products – that is, in long-lasting ones. Grassi *et al.* (2021) estimated that, by 2050, European carbon neutrality would imply «increasing the net sink [of forest land] from the current level of -360 Mt CO_{2eq}/yr

to -450 Mt CO_{2eq}/yr», remarking how «estimating the material substitution [strategy] effects is more complex than estimating a net carbon sink» (Grassi *et al.*, 2021). Pomponi *et al.* (2020) considered the capacity of global forests to deliver the planned required floor area by mid-century. Their simplified model depicts an unfavourable worldwide balance between supply and demand, leading the researchers to observe that market competition for land undermines «Earth’s capacity to regenerate resources and provide goods and services in the future», and to question «timber as a “one-size-fits-all” solution» (Pomponi *et al.*, 2020).

Conflicts of interest

Forests store carbon and supply roundwood to be manufactured into timber, but those are not their only supplies. The substitution strategy on

which bioeconomy relies has been recently increasing the demand of forest-based products (UN and FAO, 2021) in the bioplastics sector and, paradoxically, in the biofuels one. The complex interaction between these two aspects, namely timber demand and carbon storage of forests, should be examined through a systemic perspective (Grassi *et al.*, 2021) and by cross-disciplinary research (Hetemaki *et al.*, 2024).

A forest bioeconomy relies on two main concepts, the first being that humans can fulfil their needs or desires with the sustainable use of renewable forest resources, and the second that such economy can introduce innovative, resource efficient, circular and sustainable forest-based products into markets (Hetemaki *et al.*, 2024). Forests and other wooded land occupy around 43% of EU land and provide a wide range of ecosystem services, be-

questa economia può introdurre nei mercati prodotti innovativi, efficienti nell'uso di risorse, circolari e sostenibili (Hetemaki *et al.*, 2024). Foreste e aree boschive occupano circa il 43% della superficie europea, fornendo un ampio range di servizi ecosistemici oltre a cattura e stoccaggio di carbonio (EC, 2018, p. 38), inclusi regolazione e purificazione delle acque, biodiversità, mitigazione del cambiamento climatico, ma anche servizi di tipo economico, sociale e culturale. La domanda di bioplastiche, utilizzate in packaging, elettronica di consumo, automotive, agricoltura e tessili tra gli altri, ha visto una crescita in aderenza a quella dell'intera bioeconomia (EC, 2018). La biomassa supplisce al 12% della domanda di energia finale europea (EC, 2018) e, nella regione UNECE, alcuni regolamenti ancora ne «incoraggiano l'uso [...] (inclusa la legnosa) per l'energia come parte delle strategie per ridurre la dipendenza dai combustibili fossili» (UN and FAO, 2021).

Non solo le foreste, per quanto rinnovabili, sono risorse limitate (Hetemaki *et al.*, 2024), ma la transizione verso l'economia bio-based aggrava le «capacità rigenerative degli ecosistemi forestali [che] hanno [già] visto una riduzione per ragioni che includono cambiamento climatico, degrado del paesaggio, erosione del suolo, incendi e parassiti, per citarne alcune» (UN and FAO, 2021). Inoltre «negli ultimi anni sono stati osservati segni di una riduzione nello stoccaggio di carbonio, per lo più dovuta ai cambiamenti nell'età media delle foreste europee» (EC, 2018), mentre il futuro, inevitabile, adattamento delle stesse al cambiamento climatico è ancora poco studiato (Hetemaki *et al.*, 2024). Ciò aumenta le incertezze sulle stime dei servizi ecosistemici che le foreste potranno fornire nel tempo. Considerando che le strategie di sostituzione materiale difficilmente compen-

sides carbon capture and storage (EC, 2018, p. 38). Such services include water regulation and purification, biodiversity, climate change mitigation, but also economic and social services, as well as cultural ones. The demand for bioplastics, used in packaging, consumer electronics, automotive, agriculture and textiles, among other products, has been globally growing, and so has the whole bioeconomy (EC, 2018). Bioenergy currently supplies 12% of the EU's final energy demand (EC, 2018) and, in the UNECE Region, several regulations still «encourage solid biomass use (including woody biomass) for bioenergy use as a part of ongoing efforts to reduce dependence on fossil-based products» (UN and FAO, 2021). Despite being renewable, forests are still limited resources (Hetemaki *et al.*, 2024), and the transition towards a bio-based

economy weighs on «the regenerative capacities of forest ecosystems [that] have [already] been decreasing for reasons that include climate change, landscape degradation, soil erosion, forest fires and pests to name but a few» (UN and FAO, 2021). Moreover, «signs of decreasing carbon storage have been observed in recent years mainly due to the changing age structure of EU forests» (EC, 2018), and the future, unavoidable, adaptation of forests to climate change has been scarcely addressed by research (Hetemaki *et al.*, 2024). This adds some uncertainty to the estimates of ecosystem services forests will supply in the future. All the depicted trade-offs are crucial, considering that the material substitution strategy will unlikely compensate for the related reduction of the forests' carbon sink in a short to medium term (Grassi *et al.*, 2021), a time frame in

seranno la riduzione dei *carbon sink* forestali a breve e medio termine (Grassi *et al.*, 2021), arco di tempo in cui «costruire in legno non è *climate neutral*» (Goswein *et al.*, 2022), tutti i trade-off delineati sono cruciali.

Conclusioni

«Gli edifici sono raramente fatti isolati. Le forme urbane possiedono le proprie dinamiche interne, circa il modo in cui gli edifici si relazionano tra loro [...] o con la natura» (Sennett, 2023).

Le città come infrastrutture puramente *carbon neutral* nel loro perimetro non possono esistere, ma la neutralità climatica è possibile se si rispetta una condizione essenziale: introdurre in quella semplice equazione – «più carbonio imprigionato negli edifici, meno carbonio nell'atmosfera» – il contesto territoriale, così da correggerla. Il capitale naturale richiede una comprensione sistemica e, per costruire proiezioni solide e consapevoli del contesto, che guidino le politiche in modo coordinato verso il gol delle emissioni zero, è necessario un approccio interdisciplinare. Le dinamiche tecniche e costruttive delle aree urbane dovrebbero quindi basarsi sulla relazione simbiotica con il territorio dal quale estraggono incessantemente risorse.

E per quanto riguarda il legno? «Qualcuno potrebbe chiedersi, ne vale ancora la pena? La risposta è, come sempre, dipende» (Pomponi *et al.*, 2020). L'uso del legno ingegnerizzato può giocare una parte significativa nella decarbonizzazione delle aree urbane. Se le città agiranno come depositi di carbonio, è necessario aumentare la vita utile e il grado di circolarità degli elementi a base legno, nonché considerare il contributo fornito anche da altri materiali *bio-based*.

which «timber construction is not climate neutral» (Goswein *et al.*, 2022).

Conclusion

«Buildings are seldom isolated facts. Urban forms have their own inner dynamics, as in how buildings relate to one another [...] or to nature» (Sennett, 2023). Cities cannot exist as purely carbon neutral infrastructures within their own perimeter, but climate neutrality is possible if one essential condition is met, namely by introducing the territorial context into that simple equation – «the more carbon locked up in buildings, the less in the atmosphere», in order to correct it. Our natural capital requires a systemic understanding, and multidisciplinary research is required to build solid and context-based projections steering coordinated policies accordingly towards the net zero emissions goal. Technical

and construction dynamics of urban areas should, therefore, inherently be managed based on the symbiotic relationship with the territory they ceaselessly draw resources from.

And what about timber? «One might ask, is it still worth it? The answer is, as usual, it depends» (Pomponi *et al.*, 2020). Of course, the use of engineered wood could play a significant role in decarbonising urban areas. If cities will act as carbon storage, then the wood-based building elements' lifespan and circularity must be improved, and the contribution of other bio-based materials considered.

Although renewable, forests will unlikely supply the expected amount of timber in a short timeframe, and it is even more unlikely that they will meet this demand while guaranteeing the other bioeconomy markets the same without a decline in the ecosystem ser-

Per quanto rinnovabili, le foreste difficilmente potranno fornire la quantità di legno da costruzione richiesta in un arco temporale limitato e, ancor più difficilmente, soddisfare tale domanda garantendo lo stesso agli altri settori della bioeconomia senza una riduzione nei servizi ecosistemici. Una futura gestione integrata città-territorio dovrebbe affrontare questo tema, prediligendo prodotti edilizi *bio-based* legati al contesto più prossimo e derivati da coltivazioni dai rapidi cicli di accrescimento, per regolare in modo più efficiente l'andamento dei trasferimenti di risorse e carbonio.

ATTRIBUZIONE E RICONOSCIMENTI

Questa ricerca e IAPC sono stati finanziati dall'Unione Europea, RFF *Next-GenEU grant number ECS00000043*, attraverso il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) italiano, M4C2 – investimento 1.5: Creazione e rafforzamento di “Ecosistemi di Innovazione per la Sostenibilità”, attraverso il programma di ricerca *Interconnected Nord-Est Innovation Ecosystem (iNEST) – Spoke 4, CUP F43C22000200006*. L'autore ringrazia il prof. M. Condotta per i suoi suggerimenti e M. Dereani per la Fig. 4.

NOTE

¹ Anche se l'apporto dei prodotti naturali per l'isolamento potrebbe essere considerato in termini di decarbonizzazione, la Strategia per la Bioeconomia menziona solo il legno ingegnerizzato.

² Definito *net carbon source*.

³ Il *Wood Sector Alliance* esplicita il ruolo immaginato per il legno nel contesto del NEB: «materiale naturale estremamente versatile [...], circolare per eccellenza [che] può immagazzinare carbonio per decenni o secoli in edifici e ambienti di vita» (<https://wood4bauhaus.eu/>, accessed on 23.08.2024).

vices provided. A future city-territory integrated management should address this issue by leaning toward bio-based building products deriving from fast-growing resources, and coherent with the nearby context to better regulate resources and carbon transfer patterns.

ACKNOWLEDGMENTS

This research and the APC were funded by the European Union, RFF *Next-GenEU grant number ECS00000043*, through the Italian National Recovery and Resilience Plan (PNRR), M4C2 – investment 1.5: Creation and strengthening of “Innovation Ecosystems for Sustainability”, through the *Interconnected Nord-Est Innovation Ecosystem (iNEST) research programme – Spoke 4, CUP F43C22000200006*. The author thanks prof. Massimiliano Condotta for his valuable suggestions

REFERENCES

- Andersen, C.E., Rasmussen, F.N., Habert, G. and Birgisdóttir, H. (2021) “Embodied GHG Emissions of Wooden Buildings – Challenges of Biogenic Carbon Accounting in Current LCA Methods”, *Front. Built Environ* 7, 729096. Available at: [10.3389/fbuil.2021.729096](https://doi.org/10.3389/fbuil.2021.729096) (Accessed on 03/02/2025).
- Arehart, J. H., Hart, J., Pomponi, F., and D'Amico, B. (2021). “Carbon sequestration and storage in the built environment”, *Sustainable Production and Consumption* n. 27, pp. 1047–1063. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.028> (Accessed on 03/02/2025).
- European Commission (EC) (2018), *A sustainable bioeconomy for Europe: strengthening the connection between economy, society and the environment*, Luxembourg: Publications Office of the European Union. Available at: <https://doi.org/10.2777/792130> (Accessed on 03/02/2025).
- European Commission (EC) (2021), *New EU Forest Strategy for 2030. COM (2021) 572 final*. Brussels, Belgium. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52021DC0572> (Accessed on 03/02/2025).
- European Parliament (EP) (2018), *Regulation (EU) 2018/841 of 30 May 2018 on the inclusion of greenhouse gas emissions and removals from land use, land use change and forestry in the 2030 climate and energy framework and amending Regulation (EU) No 525/2013 and Decision No 529/2013/EU*. OJ L 156, 19.6.2018, pp. 1–25.
- Göswein, V., Arehart, J., Phan-huy, C., Pomponi, F. and Habert, G. (2022). “Barriers and opportunities of fast-growing biobased material use in buildings”, *Buildings and Cities* vol.3 (1), pp. 745–755. Available at: <https://doi.org/10.5334/bc.254> (Accessed on 03/02/2025).
- Grassi, G., Fiorese, G., Pilli, R., Jonsson, K., Blujdea, V., Korosuo, A. and Vizzarri, M. (2021), *Brief on the role of the forest-based bioeconomy in mitigating climate change through carbon storage and material substitution*, European Commission, JRC124374. Available at: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC124374> (Accessed on 03/02/2025).
- Hetemaki, L., D'Amato, D., Giurca, A., and Hurmekoski E. (2024), “Synergies and trade-offs in the European forest bioeconomy research: State of

and Martino Dereani for Fig. 4.

NOTES

¹ Although natural insulation products could also be considered relevant, the Bioeconomy Strategy only mentions engineered wood to support construction decarbonisation.

² Defined as “net carbon source”.

³ The established Wood Sector Alliance exemplifies the role envisaged in the NEB context for timber «an extremely versatile natural material [...], a circular material par excellence [that] can store carbon for decades or even centuries in buildings and living spaces» (<https://wood4bauhaus.eu/>, accessed on 23.08.2024).

the art and the way forward”, *Forest Policy and Economics* 163, 103204. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2024.103204> (Accessed on 03/02/2025).

Hoxha, E., Passer, A., Ruschi Mendes Saade, M., Trigaux, D., Shuttleworth, A., Pittau, F., Allacker, K. and Habert, G. (2020), “Biogenic carbon in buildings: a critical overview of LCA methods”, *Buildings and Cities*, vol.1 (1), pp. 504–524. Available at: <https://doi.org/10.5334/bc.46> (Accessed on 03/02/2025).

IPCC (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Glossary*. Available at: <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/> (Accessed on 03/02/2025).

Le Den, X., Steinmann, J., Kovacs, A., Kockat, J., Toth, Z., Röck, M., Allacker K. (2023), *Supporting the development of a roadmap for the reduction of whole life carbon of buildings – Final report*. Available at: <https://op.europa.eu/s/zQh7> (Accessed on 03/02/2025).

Leturcq, P. (2020), “GHG displacement factors of harvested wood products: the myth of substitution”, *Scientific Reports* 10, 20752. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77527-8> (Accessed on 03/02/2025).

Mancuso S. (2023), *Fitopolis, la città vivente*, Bari, Laterza

Pomponi, F., Hart, J., Arehart, J.H. and D’Amico, B. (2020), “Buildings as a Global Carbon Sink? A Reality Check on Feasibility Limits”, *One Earth* Vol. 3, pp. 157-161. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.07.018> (Accessed on 03/02/2025).

Ramage, M., Burrridge, H., Busse-Wicher, M., Fereday, G., Reynolds, T., Shah, D., Wu, G., Yu, L., Fleming, P., Densley-Tingley, D., Allwood, J., Dupree, P., Linden, P.F., Scherman, O. (2016), “The wood from the trees: The use of timber in construction”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Vol. 68, pp. 333–359. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107> (Accessed on 03/02/2025).

Sennett R. (2023), *Building and Dwelling: Ethics for the City*, New Haven, London, Yale University Press.

United Nations Environment Programme (UNEP) and Yale Center for Ecosystems + Architecture (YCE+A) (2023), *Building Materials and the Climate: Constructing a New Future*. United Nations Environment Programme, Nairobi. Available at: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/43293> (Accessed on 03/02/2025).

United Nations (UN) and Food and Agriculture Organisation (FAO) (2021), *Circularity concepts in forest-based industries*, United Nations, Geneva. Available at: <https://unece.org/forests/publications/circularity-concepts-forest-based-industries> (Accessed on 03/02/2025).

United Nations Environment Programme (UNEP) and Global Alliance for Buildings and Construction (GABC), *Global Status Report for Buildings and Construction – Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector*. Available at: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/45095> (Accessed on 03/02/2025).