POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Natural fibres and circularity in architecture – Environmental, economic, and social sustainability

Original
Natural fibres and circularity in architecture – Environmental, economic, and social sustainability / Thiebat, F., Masoero, A., Morselli, F., Fregonara, E., Senatore, C., Munoz Veloza, M.A., Giordano, R.. - In: AGATHÓN. - ISSN 2532-683X. - ELETTRONICO. - 18:(2025), pp. 316-331. [10.69143/2464-9309/18192025]

Availability:
This version is available at: 11583/3005170 since: 2026-02-09T12:46:18Z

Publisher:
LetteraVentidue Edizioni

Published
DOI:10.69143/2464-9309/18192025

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

16 November 2026

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 18 | 2025 | pp. 316-331
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/18192025

Article Info

Received	11 September 2025
Revised	22 October 2025
Accepted	23 October 2025
Published	30 December 2025

FIBRE NATURALI E CIRCOLARITÀ IN ARCHITETTURA
Sostenibilità ambientale, economica e sociale

NATURAL FIBRES AND CIRCULARITY IN ARCHITECTURE
Environmental, economic, and social sustainability

Francesca Thiébat, Alice Masoero, Fiamma Morselli, Elena Fregonara, Chiara Senatore, Mónica A. Muñoz Veloza, Roberto Giordano

Abstract

Nel quadro di riferimento nazionale e internazionale le fibre vegetali presentano notevoli potenzialità di integrazione nel settore edilizio. L'adozione di materiali a base biologica si allinea agli SDG dell'Agenda 2030, in quanto incide sul consumo di risorse idriche, sull'energia e sul carbonio incorporati e sulla promozione di filiere sostenibili. Una review sistematica esamina l'interazione tra due settori economici strategici, quello agricolo e quello delle costruzioni, con lo scopo di individuare potenzialità e limiti nel raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità. I risultati evidenziano che la sostenibilità ambientale delle fibre naturali nel settore delle costruzioni è un tema ampiamente presente in letteratura e sottolineano la necessità di promuovere l'integrazione tra strumenti di valutazione del ciclo vita per coniugare qualità ambientale, responsabilità sociale e impatto economico, contribuendo a un modello produttivo coerente con l'SDG 8.

~~Plant-based~~ fibres demonstrate substantial potential for integration within the construction sector in both national and international contexts. The use of bio-based materials aligns with the Sustainable Development Goals (SDGs) of the 2030 Agenda, influencing water consumption, embodied energy and carbon, and the establishment of sustainable supply chains. This systematic review investigates the relationship between two strategic economic sectors, agriculture and construction, with the aim of identifying their respective opportunities and constraints in advancing sustainability objectives. The findings reveal that the environmental sustainability of natural fibres in construction is extensively addressed in the existing literature. Yet, they also highlight the need to strengthen the integration of life-cycle assessment tools. Such integration is essential to balancing environmental quality, social responsibility, and economic performance, thereby supporting a production model consistent with the principles of SDG 8.

Keywords

fibre naturali, architettura sostenibile, valutazione del ciclo vita, analisi dei costi del ciclo vita, valutazione del ciclo vita sociale

natural fibres, sustainable architecture, life cycle assessment, life cycle costing, social life cycle assessment

Francesca Thiébat, Architect and PhD, is an Associate Professor of Architectural Technology and Environmental Design, Politecnico di Torino (Italy). E-mail: francesca.thiebat@polito.it

Alice Masoero, Architect and Researcher at the Department of Architecture and Design, Politecnico di Torino (Italy). E-mail: alice.masoero@polito.it

Fiamma Morselli, PhD Candidate in Design and Technology – People, Environment, Systems at the Politecnico di Torino (Italy). E-mail: fiamma.morselli@polito.it

Elena Fregonara, PhD, is a Full Professor of Economic Evaluation at the Politecnico di Torino (Italy). E-mail: elena.fregonara@polito.it

Chiara Senatore, Architect and PhD Candidate in Design and Technology – People, Environment, Systems, Politecnico di Torino (Italy). E-mail: chiara.senatore@polito.it

Mónica Alexandra Muñoz Veloza, Architect and PhD, is a Postdoctoral Research Fellow at the Politecnico di Torino (Italy). E-mail: monica.munozveloza@polito.it

Roberto Giordano, Architect and PhD, is a Full Professor at the Department of Architecture and Design, Politecnico di Torino (Italy). E-mail: roberto.giordano@polito.it



Negli ultimi anni l'importanza attribuita agli impatti ambientali e socioeconomici nei settori dell'architettura e del design ha alimentato l'interesse verso materiali a base biologica. In questo contesto le fibre vegetali presentano notevoli potenzialità nell'integrazione in prodotti e processi edilizi, sia perché rinnovabili sia perché solitamente caratterizzate da una limitata impronta ecologica (Carcassi et alii, 2022). Tali tematiche si inseriscono in modo coerente nel quadro degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG) dell'Agenda 2030 in particolare per raggiungere l'SDG 6 (Acqua pulita e servizi igienico-sanitari), l'SDG 7 (Energia pulita e accessibile) e l'SDG 13 (Lotta al cambiamento climatico), così come l'SDG 8 (Lavoro dignitoso e crescita economica), in quanto l'adozione di tali materiali implica aspetti legati al consumo di risorse idriche, all'energia e al carbonio incorporati nel ciclo vita e alla promozione di filiere sostenibili (Schroeder, Anggraeni and Weber, 2019; Cosentino, Fernandes and Mateus, 2024; Morpurgo, 2024). In particolare l'SDG 8 invita a migliorare l'efficienza nell'impiego delle risorse a livello mondiale e mira al disaccoppiamento tra crescita economica e degrado ambientale (UN, 2015).

Nel settore edilizio, per tentare il raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità, occorre ripensare il processo produttivo e parallelamente quello progettuale e costruttivo, attraverso una visione sistemica che si basi sulle tre dimensioni della sostenibilità e sui principi dell'economia circolare (Le et alii, 2025; Kayaçetin, Piccardo and Versele, 2023). Tale obiettivo è anche alla base del progetto 'Circular Design For Natural Fibres' del PNRR MICS (Made in Italy – Circolare e Sostenibile) che mira alla valorizzazione delle fibre naturali recuperate o sottoutilizzate, anche in collaborazione con le comunità locali, per creare catene produttive più resilienti e sostenibili. Nell'ambito del progetto l'articolo si propone di restituire lo stato dell'arte della letteratura scientifica analizzando due settori economici strategici per l'Europa, quello agricolo e quello delle costruzioni, al fine di esplorare le interazioni, le potenzialità e i limiti nel raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità.

In particolare la revisione sistematica (Page et alii, 2021; Littell, Corcoran and Pillai, 2008) si focalizza sulle seguenti domande di ricerca: qual è lo stato dell'arte dei metodi di valutazione della sostenibilità ambientale, sociale ed economica in relazione alle fibre naturali? gli approcci di valutazione della sostenibilità Life Cycle Assessment (LCA), Life Cycle Costing (LCC), Social Life Cycle Assessment (S-LCA) possono favorire lo sviluppo di processi produttivi circolari tra il settore agricolo e quello edilizio? quali indicatori di impatto risultano maggiormente rilevanti nella valutazione delle fibre naturali per stimolare nuove filiere produttive che rispondano agli SDG?

A partire da un inquadramento scientifico dei temi trattati l'articolo si struttura nei seguenti paragrafi: metodologia e limiti della ricerca, principali risultati della revisione sistematica, tre paragrafi di approfondimento critico sulle tematiche individuate nelle domande di ricerca e conclusioni. Il presente studio è finalizzato alla definizione di un quadro di riferimento indirizzato alla comunità scientifica sul tema della valutazione della sostenibilità nell'ambito delle fibre naturali per l'architettura e il design. In particolare l'analisi sistematica restituisce una revisione strutturata della letteratura esistente che mira a sintetizzare le migliori evidenze disponibili per rispondere a una specifica domanda di ricerca e agevolare una vasta diffusione dei risultati (Zumsteg, Cooper and Noon, 2012).

Gli esiti della revisione indicano che tra i numerosi casi studio individuati l'LCA è l'approccio più diffuso, l'LCC è in genere associato all'LCA e il S-LCA è scarsamente applicato, mentre le fibre più indagate sono gli scarti delle coltivazioni del riso nei bio-cementi, della canapa nell'involucro termo-isolante e del mais nei biocombustibili. Le conclusioni sottolineano l'importanza di promuovere l'integrazione tra strumenti di valutazione basati sul ciclo vita (Dace et alii, 2024) per coniugare qualità ambientale, equità e responsabilità sociale e impatto economico nell'ambito delle costruzioni, contribuendo al raggiungimento di un modello produttivo circolare e coerente con l'obiettivo SDG 8.

Inquadramento scientifico e originalità del contributo | Negli ultimi cinquant'anni l'estrazione mondiale di materiali è più che triplicata, superando i 100 miliardi di tonnellate annue (Circle Economy, 2025), di cui il 60% è destinato all'ingegneria civile e all'edilizia (Zabalza Bribiàn, Valero Capilla and Aranda Usón, 2011). L'estrazione e l'uso dei materiali sono infatti responsabili di circa due terzi delle emissioni globali di gas serra e di oltre il 90% della perdita di biodiversità e dello stress idrico (International Resource Panel, 2024). La produzione di materiali da costruzione contribuisce inoltre per oltre l'80% al consumo energetico complessivo del processo edilizio (Zhang et alii, 2019), determinando un rilevante impatto in termini di energia incorporata ed emissioni (Piccardo et alii, 2020).

Le scelte progettuali si configurano quindi come momenti critici nei quali vengono determinati non solo gli aspetti estetico-funzionali, ma anche gli impatti ambientali, sociali ed economici di un manufatto lungo il suo intero ciclo vita (Mesa, Esparragoza and Maury, 2018; Singh and Ordoñez, 2016). In questo contesto l'Economia Circolare rappresenta il paradigma di riferimento per ridurre la dipendenza da risorse primarie e promuovere modelli rigenerativi, essendo basata su principi di prevenzione dei rifiuti, simbiosi industriale e 'design out waste' (McDonough and Braungart, 2002; Bocken et alii, 2016; Ferrara and Squatrito, 2022).

L'Economia Circolare è stata istituzionalizzata a livello europeo attraverso il Circular Economy Action Plan (European Commission, 2020), il Green Deal (European Commission, 2019) e il New European Bauhaus (European Commission, 2021, 2023) che riconoscono il settore edilizio come uno degli ambiti prioritari di intervento. Queste strategie sono supportate dal quadro metodologico consolidato della LCA, definito nel 2006 dalle UNI EN ISO 14040 e 14044 e aggiornate nel 2021 e poi dalle UNI EN 15978:2011 e UNI EN 15804:2021, che permettono di valutare gli impatti ambientali di prodotti e servizi e di verificare l'efficacia delle iniziative di contrasto proposte dall'Agenda 2030 e integrate nei Piani europei (Backes and Traverso, 2022; Giordano and Andreotti, 2023).

A supporto del Life Cycle Assessment diversi autori riconoscono la necessità di integrare il Life Cycle Costing (ISO 15686:2017), che consente una valutazione dei costi lungo il ciclo vita e il Social Life Cycle Assessment (Fig. 1), sviluppato secondo le linee guida UNEP / SETAC (2009) e quelle della UNEP (2020). L'integrazione delle tre metodologie nella Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) è al centro di molti programmi europei come Level(s) e Orienting (2020-2024) che supportano lo sviluppo di metodologie e indicatori al fine di agevolarne l'applicazione da parte di aziende, organizzazioni e ricercatori, con particolare attenzione alle PMI operanti in diversi settori.

In tale cornice assumono rilievo i materiali a base biologica, definiti dalla norma UNI EN 16575:2014 come 'materiali interamente o parzialmente derivati da biomassa, ossia materie di origine biologica, escluse le fonti fossili contenute nella geosfera' (EN 16575:2014, punto 2.1). All'interno di questa categoria le fibre naturali rappresentano una risorsa strategica per l'architettura sostenibile (Thiébat and Morselli, 2025), includendo materiali di origine vegetale caratterizzati da cicli di crescita brevi, disponibilità diffusa e capacità di sequestro del carbonio.

Oltre alla riduzione dell'energia incorporata e delle emissioni le fibre naturali si distinguono per la loro idoneità a processi di circolarità intersettoriale, in cui scarti agricoli o sottoprodotti agroalimentari possono essere riconvertiti in isolanti, pannelli o componenti edilizi a carbonio neutro e negativo (Göswein et alii, 2022). Inoltre ricerche recenti confermano che la progettazione con fibre naturali non risponde soltanto a criteri prestazionali, ma integra valutazioni ambientali, economiche e sociali, ampliando le opportunità applicative in architettura e design (Violano, Cannaviello and Del Prete, 2021; Sposito and Scalisi, 2023; Mouton, Allacker and Röck, 2023).

Le review che affrontano il tema delle tre dimensioni della sostenibilità e della circolarità dei biomateriali per l'edilizia non sono numerose. Tra queste Le, Salomone e Nguyen (2024) esaminano criticamente i metodi utilizzati per valutare le dimensioni di sostenibilità di soluzioni edilizie basate su materiali biogenici, mentre l'analisi dello stato dell'arte condotta da Rigillo et alii (2023) mette in evidenza come il rapporto tra strumenti digitali e circolarità sia ancora poco indagato nell'Unione Europea, soprattutto nelle discipline dell'Architettura. In tale contesto l'originalità del presente contributo consiste nella definizione di un quadro di riferimento aggiornato sull'uso delle fibre naturali nel settore delle costruzioni mettendo in relazione filiere e processi produttivi circolari con gli approcci sul ciclo vita e analizzando le connessioni con gli SDG.

Metodologia adottata e limiti della ricerca | La revisione della letteratura è stata condotta seguendo il metodo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), sviluppato da Moher et alii nel 2009 e aggiornato nel 2021 (Page et alii, 2021) che si articola in quattro fasi e include una check list per l'identificazione degli studi rilevanti per la review e uno schema denominato 'flow diagram'. La review è stata quindi condotta sulla base delle fasi che si riportano a seguire.

Fase 1) Formulazione delle domande di ricerca e definizione delle query di ricerca: la prima fase si è basata sugli obiettivi e sulle domande, descritti nell'introduzione, per l'identificazione delle parole chiave di ricerca. La query (Fig. 2) si è concentrata su tre raggruppamenti di parole chiave che riguardano i seguenti ambiti: fibre naturali, con un focus sulle fibre vergini o di scarto coltivate in Italia; approcci di valutazione in ottica ciclo vita che considerano le tre dimensioni della sostenibilità; filiere e processi produttivi circolari. Una seconda query ha circoscritto la ricerca precedente ai settori dell'architettura e del design; gli operatori booleani 'AND' e 'OR' sono stati impiegati per affinare la ricerca.

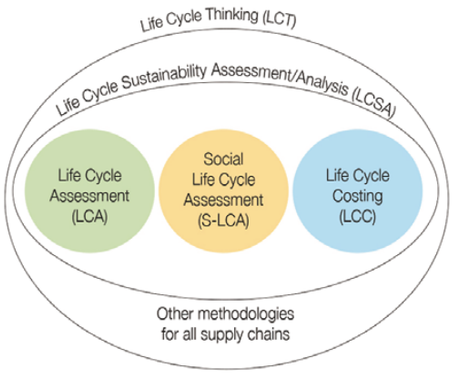


Fig. 1 | Life Cycle approaches in the context of Life Cycle Sustainability Assessment and Life Cycle Thinking (source: Caldeira et alii, 2022).

Fase 2) Procedure di campionamento: la seconda fase ha riguardato la selezione degli studi sulla base di criteri di inclusione e esclusione sul database Scopus; è stata condotta in data 18 aprile 2025 e nuovamente l'8 agosto 2025 per la verifica e l'aggiornamento dei risultati; sono state escluse risorse non facilmente consultabili online (libri e capitoli di libri) e/o non in lingua inglese.

Fase 3) Raccolta, analisi e sintesi dei dati: in questa fase sono stati estratti i dati dagli studi selezionati, poi analizzati e sintetizzati in modo sistematico. I contenuti sono stati approfonditi attraverso un'analisi qualitativa delle risorse bibliografiche, sulla base delle informazioni contenute nel titolo, abstract e keywords. Sono stati esclusi gli articoli di review e altre risorse non accessibili e per ciascun articolo selezionato sono stati estratti ed elaborati su fogli di calcolo i seguenti elementi: tipo di risorsa bibliografica, anno di pubblicazione, approccio ciclo vita (LCA, LCC, S-LCA, LCSA), filiera di riferimento, oggetto dello studio, tipologia di fibra naturale, origine della fibra (vergine o sotto-prodotto / rifiuto).

Fase 4) Interpretazione dei risultati: l'ultima fase ha approfondito criticamente i temi individuati nelle domande di ricerca.

Uno dei limiti della ricerca consiste nella rapidità con cui i risultati della review possono variare. L'attuale interesse per le tematiche legate alla sostenibilità si collega a un rapido aumento della produzione scientifica, tuttavia l'adozione di un approccio sistematico consente di ripetere e aggiornare nel tempo la ricerca, superando tale criticità. In Figura 2 sono riportati i valori più recenti tra parentesi. Un altro limite è legato all'accessibilità delle risorse bibliografiche: la ricerca potrebbe infatti risultare parziale in quanto libri e altre risorse non open access sono stati esclusi in quanto spesso non consultabili. Infine un ulteriore vincolo può essere la mancanza di una nomenclatura standardizzata che potrebbe aver portato a una ricerca parziale per parole chiave. Lo stesso limite è emerso nell'interpretazione dei risultati in cui acronimi e indicatori di impatto simili possono creare ambiguità nella lettura degli esiti.

Risultati | Dalla prima query sono stati individuati 785 articoli nell'arco temporale dal 2005 al 2025 (Fig. 3) e in seguito alla fase di screening sono stati selezionati 108 risultati che includono articoli e atti di convegno (Fig. 4). Si evidenzia una tendenza crescente del numero di pubblicazioni a partire dal 2009 con un aumento significativo a partire dal 2020 e una prevalenza di pubblicazioni nel contesto italiano (Fig. 5); il dato conferma l'interesse verso i temi della sostenibilità e della decarbonizzazione introdotti dall'Agenda 2030 e dal Green Deal europeo.

Tuttavia sul totale di 108 solo 4 studi considerano tutte e tre le dimensioni della sostenibilità, 18 studi affrontano congiuntamente gli aspetti ambientali ed economici e tra gli articoli che considerano una sola dimensione (Tab. 1), predominano 102 studi LCA rispetto a uno studio LCC e uno studio S-LCA (Fig. 6). Dalle query di ricerca emerge che i paper più citati su Scopus sono quelli di Gursel, Maryman and Ostertag (2016), Belaud et alii (2019), Yu, Tan e Ruan (2011) e Buratti et alii (2018), che valutano prevalentemente la dimensione ambientale, e di Fernando et alii (2021) che tratta in maniera congiunta le dimensioni ambientale ed economica.

Inoltre, sulla base delle informazioni contenute nel titolo, abstract e keywords è stata condotta un'analisi qualitativa sui risultati in cui emerge che gli approcci LCA, LCC e S-LCA applicati al settore delle costruzioni hanno ricadute su diversi ambiti produttivi, quali l'edilizia e l'ingegneria civile per il 45%, l'energia (bio-carburanti) per il 22%, l'agro-alimentare per il 13.8%, la chimica per il 9%, il design per il 4.6%, l'automotive per il 2.8% e abbigliamento per il 2.8% (Fig. 7). Per facilitare la lettura dei risultati è stata eseguita un'elaborazione grafica attraverso il software VOSviewer, sviluppato dalla Leiden University, su 108 articoli come illustrato nella Figura 8.

Analizzando la tipologia e l'origine delle fibre naturali oggetto degli articoli si riscontra una predominanza di residui della filiera del riso (18%), seguita da canapa (12 %) e mais (8%) e da altre fibre con valori intorno al 4 %, tra cui bambù, scarti del legno e lana di pecora (Fig. 9). Dai risultati si evince che gli scarti delle coltivazioni del riso e del mais, tra le più presenti nel settore alimentare a livello mondiale, sono ampiamente analizzati, soprattutto nel settore dei bio-carburanti (tutolo di mais) e dei prodotti per l'edilizia (lolla e paglia di riso).

Un successivo approfondimento su 43 casi studio selezionati nell'ambito dell'edilizia, dell'ingegneria civile e del design (Tab. 2) ha permesso di individuare le fibre naturali maggiormente diffuse e le relative applicazioni in edilizia, quali ad esempio materiali bio-compositi, materiali per l'imballaggio, prodotti cementizi, elementi di muratura e pannelli di involucro (Fig. 10). Le fibre maggiormente indagate sono i residui della coltivazione del riso, impiegati soprattutto in prodotti cementizi e materiali isolanti; la canapa, in bio-compositi, elementi di muratura e pannelli termoisolanti; il bambù, alla scala di edificio e nel packaging.

Dall'analisi della letteratura emerge che gli indicatori di valutazione della sostenibilità delle fibre naturali (Tab. 3) sono principalmente concentrati sul calcolo della CO_{2eq} (GWP, EC, CF, GHG, CO_2) e sul consumo energetico cumulativo (CED, OE, EE, OC), sul consumo idrico, sul potenziale di acidificazione, sul potenziale di eutrofizzazione, sul consumo di suolo, sulla tossicità per l'uomo e infine sul calcolo di assorbimento e stoccaggio di CO_2. Tra gli indicatori economici si citano il 'payback period' e il 'net present value', mentre per gli indicatori sociali viene presa come riferimento la banca dati PSILCA che ne include 34.

Dai risultati sono emersi tre principali ambiti di discussione connessi alle domande di ricerca: l'integrazione tra approcci ciclo vita, la relazione tra filiere e processi produttivi circolari e le connessioni con gli SDGs.

Potenzialità e limiti dell'integrazione tra approcci LCA, LCC, S-LCA | La scarsa presenza delle dimensioni sociale ed economica riscontrata nei risultati può essere attribuibile al fatto che la maggior parte degli studi si concentra sull'uso delle fibre naturali a livello sperimentale. Gli studi che affrontano l'integrazione degli approcci ciclo vita presentano due orientamenti metodologici: la combinazione delle dimensioni della sostenibilità in un unico framework analitico e lo sviluppo indipendente delle valutazioni con successivo confronto dei risultati.

Gli approcci combinati (Kristianto and Zhu, 2017; Hartini et alii, 2023; Arias et alii, 2024; Alderkamp et alii, 2025; Garkoti and Thengane, 2025; Komkova and Habert, 2023; Sifuentes-Nieves et alii, 2023; García-Velásquez, Leduc and van der Meer, 2022) evidenziano le relazioni critiche tra risultati economici e impatti ambientali, fornendo un contributo utile alla definizione di politiche e alla pianificazione sostenibile delle filiere produttive. Tali contributi rimangono tuttavia per lo più limitati ad analisi teoriche o basate su modelli di simulazione, prevalentemente dei settori alimentare, biocarburanti e costruzioni, non integrano in maniera sistematica le dimensioni economica e ambientale e non includono la dimensione sociale.

Gli approcci sviluppati in maniera parallela (Bartocci et alii, 2020; Cortés-Peña et alii, 2020; Pinelli et alii, 2020; Schonhoff et alii, 2023; Fernando et alii, 2021; Martínez and Miller, 2025; Paul, Islam and Elahi, 2023; Khan and Ali, 2019; Garas, Sayed and Bakhoum, 2021; Ondova, Stevulova and Meciarova, 2013; Gounni et alii, 2019) risultano prevalentemente applicati al settore delle costruzioni. In questi studi LCA e LCC sono condotte separatamente e messe a confronto, con il vantaggio di una maggiore chiarezza metodologica. Gli studi mostrano spesso benefici ambientali in termini di riduzione delle emissioni di CO_2 e mettono in evidenza alcuni limiti come i costi elevati, la dipendenza da disponibilità locali delle risorse e la limitata analisi di impatti diversi dal cambiamento climatico (Bartocci et alii, 2020; Paul, Islam and Elahi, 202; Khan and Ali, 2019).

Un contributo da considerare a parte è quello di Mancini et alii (2023) che affrontano esclusivamente la S-LCA e propongono una valutazione degli impatti sociali di 44 prodotti alimentari rappresentativi nel contesto europeo: a differenza degli impatti ambientali, i rischi sociali risultano elevati per frutta, verdure e riso. Sebbene lo studio sia rilevante in ottica di policy, non integra le dimensioni ambientali ed economiche limitandone l'applicabilità.

Gli studi LCA nel settore delle costruzioni si basano principalmente su valutazioni comparative per lo sviluppo di nuovi materiali non convenzionali, con risultati che solitamente non includono gli impatti ambientali durante l'uso e a fine vita del prodotto. Alcuni autori tentano di includere la fase d'uso normalizzando i risultati ambientali alle prestazioni meccaniche (Gursel, Maryman and Ostertag, 2016; Isopescu et alii, 2024; Sprenger et alii, 2025; Sinka et alii, 2020), igrotermiche (Aversa et alii, 2019; Dotelli et alii, 2020) e fisico-tecniche (Buratti et alii, 2018; Ricciardi et alii, 2021) o comparando le miscele a parità di prestazioni meccaniche (Soleimani and Shahandashti, 2017; Martínez and Miller, 2025; Sheshadri, Marathe and Sadowski, 2024). Solo alcuni studi ampliano il confine del sistema a tutto

il ciclo vita, 'dalla culla alla tomba' (Seyedabadi, Abolhassani and Eicker, 2023; Keena et alii, 2022; Ramos et alii, 2021; Giuffrida et alii, 2024) o 'dalla culla alla culla' (Salzer et alii, 2017), mettendo in evidenza le potenzialità e i limiti dell'uso di scarti agro-alimentari in edilizia e design. In altre ricerche emerge la capacità delle fibre di assorbire carbonio durante la fase di crescita delle piante (Giuffrida et alii, 2024) e pertanto di agire come serbatoio di stoccaggio della CO_2 durante la fase d'uso.

Tuttavia gli studi LCA individuati sono di tipo statico e non tengono conto delle dinamiche temporali legate ai diversi tassi di assorbimento ed emissione del carbonio né degli effetti legati ai ritardi tra sequestro e rilascio (Keena et alii, 2022). Alcuni autori sottolineano che, nonostante i biomateriali rappresentino un'alternativa rinnovabile ai materiali convenzionali, il loro impiego comporta alcuni rischi intrinseci: ad esempio possibili modifiche nell'uso del suolo potrebbero tradursi in fenomeni di deforestazione e perdita di biodiversità locale (Keena et alii, 2022).

Nella valutazione della sostenibilità dei materiali di scarto il contributo legato all'impatto dei trasporti costituisce un fattore di grande importanza: in aree geografiche come Stati Uniti (Gursel, Maryman and Ostertag, 2016), Canada (Keena et alii, 2022), Sud-Est Asiatico (Sheshadri, Marathe and Sadowski, 2024) ed Europa (Cucchiella et alii, 2024) in cui le distanze su gomma sono notevoli, i trasporti contribuiscono in larga parte alle emissioni e per questo motivo l'uso di materiali disponibili localmente rimane la scelta più sostenibile (Gursel, Maryman and Ostertag, 2016). Su tale ambito alcuni studi hanno svolto un'analisi di sensibilità per valutare le differenze dei risultati ambientali aumentando e riducendo i chilometri attribuiti (Soleimani and Shahandashti, 2017; Araujo et alii, 2022).

Analogamente la trasformazione dello scarto agricolo comporta spesso lavorazioni che richiedono un'elevata quantità di energia, come ad esempio la macinazione (Gursel, Maryman and Ostertag, 2016; Martínez and Miller, 2025) e l'estrusione (Cucchiella et alii, 2024). Inoltre l'uso di fibre vegetali, quali canapa, paglia, nocciolino di oliva, per la produzione di mattoni, cementi o intonaci, generalmente riduce l'impatto ambientale, ma compromette anche le proprietà meccaniche, in particolare la resistenza a compressione e la durabilità (Vilaboa Diaz, López and Bugallo, 2022). L'analisi di inventario (LCI) è stata condotta da alcuni autori sulla base di dati primari (Gursel, Maryman and Ostertag, 2016; Soleimani and Shahandashti, 2017), mentre da altri su dati tratti da letteratura e database (Onyelowe et alii, 2022; Sheshadri, Marathe and Sadowski, 2024; Martínez and Miller, 2025) o da Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (EPD; Aversa et alii, 2019; Dotelli et alii, 2020), tralasciando informazioni come la provenienza delle fibre naturali e del processo di incenerimento, i trasporti e l'energy mix nazionale di riferimento.

Interazioni tra agricoltura, architettura e design in ottica circolare | I risultati confermano il forte interesse verso l'attivazione di sinergie con il settore agricolo e industriale per favorire la transizione verso l'economia circolare e la decarbonizzazione dell'ambiente costruito. In merito agli scarti del riso, sebbene pochi studi mettano in evidenza informazioni sulla reperibilità della fibra vegetale, secondo i dati della FAO il riso è il terzo prodotto alimentare coltivato con 740 milioni di tonnellate per anno (Buratti et alii, 2018) e a livello mondiale 156 milioni di tonnellate di lolla di riso vengono smaltite annualmente (Gursel, Maryman and Ostertag, 2016). In India, seconda nazione al mondo per la produzione di riso, i residui della coltivazione vengono in genere bruciati contribuendo all'innalzamento critico delle emissioni di PM2.5 e solo l'1% di ceneri di lolla di riso (RHA) viene utilizzato, mentre milioni di tonnellate vengono conferite in discarica (Sheshadri, Marathe and Sadowski, 2024).

In ambito edilizio e civile è sempre più diffuso l'uso di materiali cementizi supplementari (SCM) all'interno delle miscele di calcestruzzo e cementizie per ridurre o eliminare il clinker (Martínez and Miller, 2025). Tra gli SCM è sempre più diffuso l'impiego di ceneri da termovalorizzazione di scarti agricoli, in particolare del RHA, per la produzione di biocementi, poiché migliora le proprietà ambientali, meccaniche e di durabilità del calcestruzzo e consente di sostituire fino al 30-40% di cemento Portland (Gursel, Maryman and Ostertag, 2016).

Gli studi LCA analizzati si concentrano principalmente sugli impatti di trasporti (sostanze inquinanti), sulle emissioni in fase di cottura del cemento e di incenerimento della frazione vegetale (gas a effetto serra e sostanze inquinanti), sull'energia primaria per le lavorazioni e sul consumo di acqua per le operazioni di cava. I risultati della fase di analisi di valutazione degli impatti (Fase LCIA – Life Cycle Impact Assessment, secondo la norma ISO 14040:

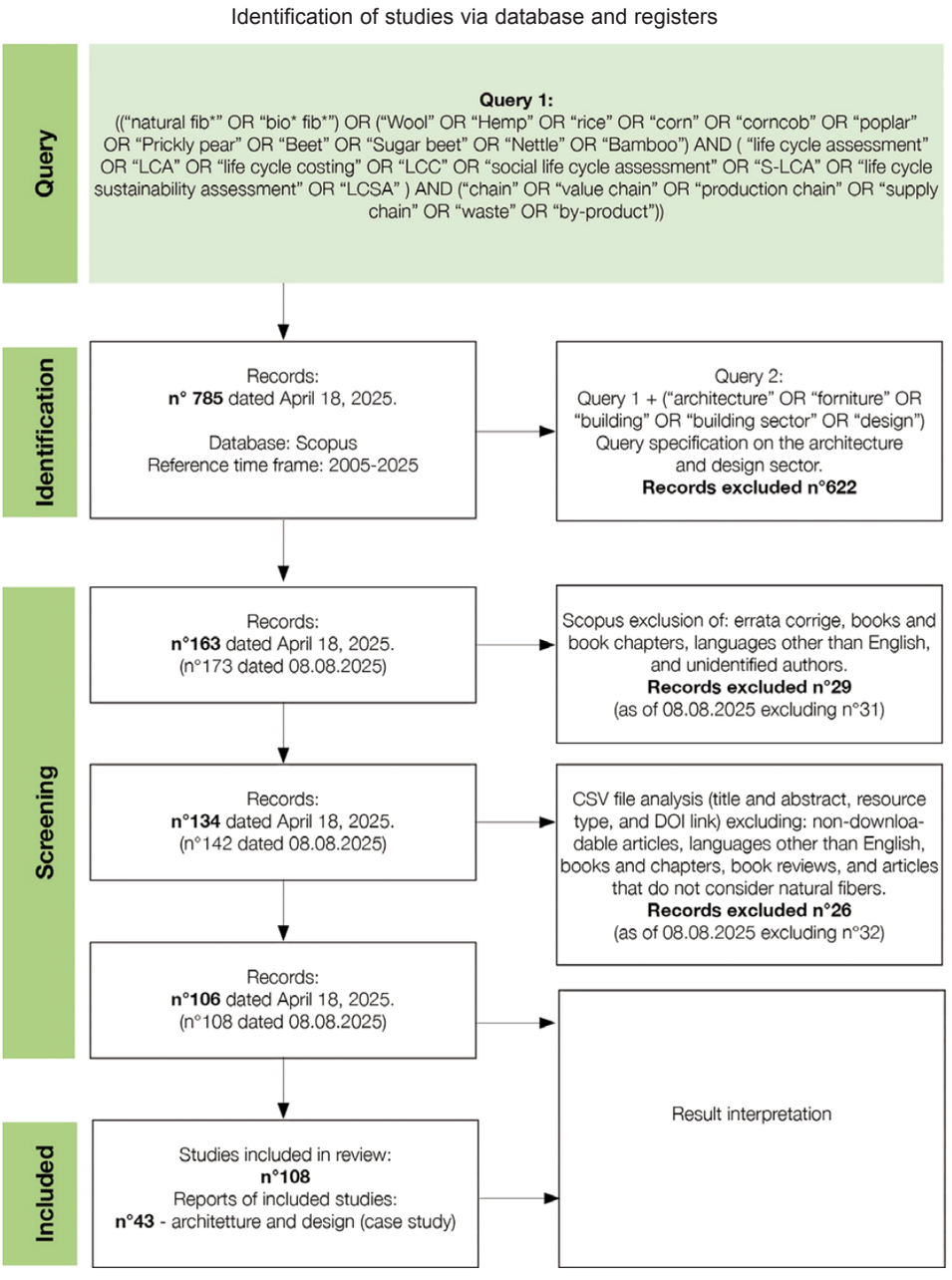


Fig. 2 | Flow diagram systematic review according to the PRISMA methodology (credit: the Authors, 2025).

2021) evidenziano la maggiore sostenibilità dei biocementi a base di RHA, anche in combinazione con altri SCM: l'indicatore GWP-GHG si attesta tra 284 e 329 kg CO_2/mc per miscele con RHA e scende fino a 194 kg CO_2/mc con RHA e geo-polimeri, a fronte dei 369-544 kg CO_2/mc del cemento convenzionale (Martínez and Miller, 2025).

Oltre che nei leganti i residui della coltivazione del riso, in particolare lolla e paglia, sono utilizzati per pannelli termo-isolanti, anche in combinazione con altre fibre (Quintana-Gallardo et alii, 2021); in particolare sulla base di dati primari Buratti et alii (2018) e Ricciardi et alii (2021) hanno confrontato le prestazioni ambientali, termiche e acustiche di campioni di isolanti a base di lolla di riso e altri materiali biogenici e di scarto, mostrando con un approccio LCA 'cradle to gate' i valori di emissione più bassi per pannelli in lolla di riso (1,11 kg CO_{2eq}/mq), in pula di caffè (0.56 kg CO_{2eq}/mq) e in miscela lolla 20% – sughero riciclato 60% – pula di caffè 20% (1,83 kg CO_{2eq}/mq). Va tuttavia rilevato che tali valori non includono la fase di coltivazione e trasformazione del riso, a differenza di studi (Scrucca et alii, 2020) che applicano una quota allocata al sottoprodotto. Infine Quintana-Gallardo et alii (2021), in uno studio LCA comparativo, hanno mostrato che l'impiego della paglia di riso in materiali da costruzione evita 40 kg CO_{2eq} rispetto all'incenerimento e 94,21 kg CO_{2eq} rispetto al suo abbandono in campo.

La fibra tecnica di canapa e il canapulo (parte legnosa della canapa) sono diffusi a tutte le scale edilizie, dai bio-compositi ai componenti di involucro (Tab. 2). Sprenger et alii (2025) integrano un'analisi LCA comparativa condotta su fibre di canapa, kenaf, lino e sisal con una valutazione delle prestazioni meccaniche delle quattro tipologie di fibra. Tuttavia lo studio comparativo 'cradle to gate' mostra che le fibre di lino derivanti dalla stoppa, sottoprodotto della produzione tessile, presentano il minor impatto ambientale e contemporaneamente elevate prestazioni meccaniche, rendendole particolarmente adatte alla produzione di compositi stampati a iniezione.

Aversa et alii (2019) e Dotelli et alii (2020) hanno condotto una LCA comparativa 'cradle to gate' su quattro sistemi di muratura non portanti, ciascuno caratterizzato da una differente stratigrafia: calce e canapulo, calcestruzzo aerato autoclavato, argilla espansa e laterizio. I risultati evidenziano che la parete in calce e canapulo presenta un impatto ambientale inferiore in termini di potenziale di acidificazione, di uso del suolo e di acqua, GWP, potenziale esaurimento abiotico (fossile e non fossile) e potenziale di formazione di smog fotochimico. Giuffrida et alii (2024) confrontano una parete in terra cruda isolata con materiali a base biologica (canapa, sughero e paglia) con alcuni benchmark di riferimento.

L'analisi LCA di tipo 'dalla culla alla tomba' simula l'intero ciclo vita di 100 anni di un metro quadro di parete e considera diversi indicatori di prestazione termica, energetica e ambientale. Gli autori hanno condotto un'analisi di sensibilità per valutare fibre vegetali vergini diverse aggiunte alla miscela in terra al fine di valutare con più attenzione gli indicatori di impronta di carbonio e di cattura di carbonio. Dai risultati le stabilizzazioni con paglia e con canapa rappresentano buone alternative in quanto richiedono poca irrigazione rispetto a juta e lino.

Il bambù, a differenza di molte altre fibre naturali, si distingue per l'elevata resistenza strutturale e costituisce quindi una risorsa di particolare interesse per le applicazioni in architettura sostenibile, con il potenziale di ridurre gli impatti ambientali legati alle strutture rispetto a materiali da costruzione convenzionali, e in particolare al calcestruzzo. Lo studio di Yu, Tan e Ruan (2011) dimostra infatti che un prototipo di abitazione in bambù in Cina comporta una riduzione significativa sia dell'energia incorporata sia delle emissioni di CO_{2eq} lungo il ciclo vita rispetto a edifici in cemento e laterizio.

Risultati analoghi emergono da Salzer et alii (2017) che includono il bambù tra le soluzioni costruttive a minore impatto ambientale nel contesto del social housing. Sebbene riferito a un diverso settore applicativo, lo studio di Chen et alii (2023) conferma tali evidenze mostrando come la fibra di bambù consenta una riduzione dei consumi energetici e delle emissioni anche nella produzione di imballaggi alimentari, rispetto a materiali plastici convenzionali. Araujo et alii (2022) sottolineano inoltre la necessità di approfondire aspetti di natura socio-economica legati allo sviluppo di filiere locali e alla creazione di occupazione nei Paesi emergenti.

Tra i materiali a base biologica innovativi che hanno suscitato un crescente interesse da parte della comunità scientifica vi sono i compositi termoisolanti a base di micelio con scarti agricoli (es. canapa, lino, legno; Babenko et alii, 2025) e a base di lana (Quintana-Guallardo et alii, 2020; Pennacchio et alii, 2017). Un aspetto rilevante in merito al micelio riguarda il fatto che la selezione e grandezza delle fibre naturali utilizzate nel substrato, la tipologia fungina, il processo produttivo e il periodo di incubazione influenzano in modo sostanziale le proprietà meccaniche dei componenti (Babenko et alii, 2025).

Sebbene la valutazione degli impatti ambientali non rappresenti il tema centrale degli studi sul micelio, essa sta acquisendo crescente rilevanza e studi come quello di Babenko et alii (2025) mostrano risultati promettenti in termini di sostenibilità di questi compositi. In particolare, gli autori conducono uno studio LCA 'dalla culla al cancello' che confronta gli impatti ambientali di due processi produttivi di compositi a base di micelio: un primo sviluppato a temperatura ambiente e un secondo in condizioni controllate all'interno di una camera climatica che presenta valori più elevati di emissioni GHG, uso di risorse, GWP, potenziale di acidificazione e potenziale di tossicità per l'uomo.

Per quanto riguarda la lana di pecora di scarto, proveniente dalla filiera zootecnica o da filiera tessile di abbigliamento e arredo, diversi autori hanno dimostrato la sua capacità di soddisfare prestazioni acustiche e termiche con valori equivalenti a prodotti isolanti convenzionali, quali ad esempio lane minerali e schiume polimeriche; la lana garantisce inoltre ottime capacità di resistenza al fuoco dovute alla proprietà ignifughe del materiale (Gounni et alii, 2019).

Pennacchio et alii (2017) e Quintana-Guallardo et alii (2020) hanno condotto analisi LCA per confrontare prodotti isolanti presenti sul mercato europeo con altri sperimentali in lana e canapa, in fibra di cellulosa e in lana di scarto e PET. L'uso della lana di scarto per l'isolamento termico è stato analizzato anche dal punto di vista dei costi da Gounni et alii (2019): l'analisi LCC ha tenuto conto dei costi iniziali e dei costi energetici in fase d'uso per definire il vantaggio economico nell'impiego dei materiali biogenici rispetto a EPS e lana di roccia.

Numerosi studi analizzano l'impiego di materiali e fibre naturali in edilizia non solo singolarmente, ma anche attraverso combinazioni o confronti tra alternative. Le ricerche riguardano componenti e materiali edilizi (Babenko et alii, 2025; Seyedabadi, Abolhassani and Eicker, 2023; Vilaboa Dìaz, López and Bugallo, 2022; Safaripour et alii, 2021; Gounni et alii, 2019; Boškovic and Radivojevi, 2023) e il confronto tra componenti (Babenko et alii, 2025; Keena et alii, 2022; Quintana-Gallardo et alii, 2021; Pittau et alii, 2020; Essaghouri, Mao and Li, 2023) o interi edifici (Chipade et alii, 2025; Salzer et alii, 2017),

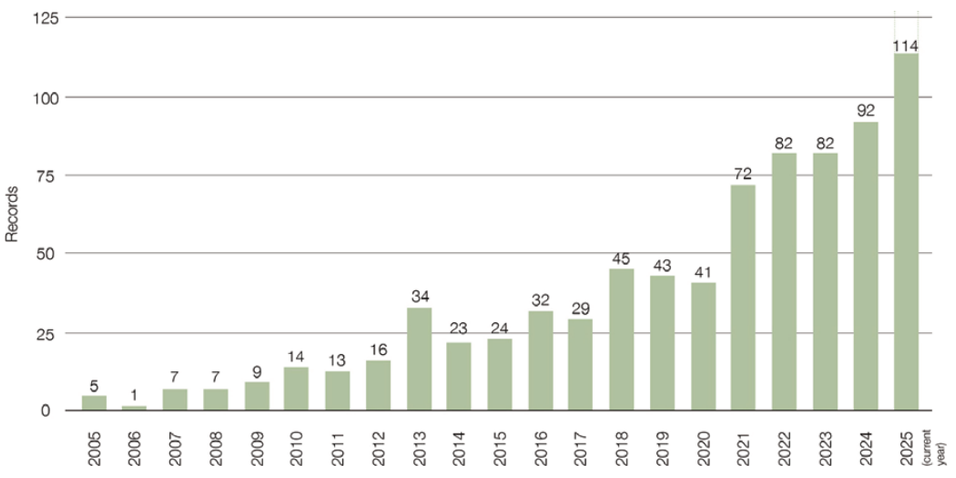


Fig. 3 | Records by year related to the first identification; n. 785 records found on 8/8/2025 (credit: the Authors, 2025).

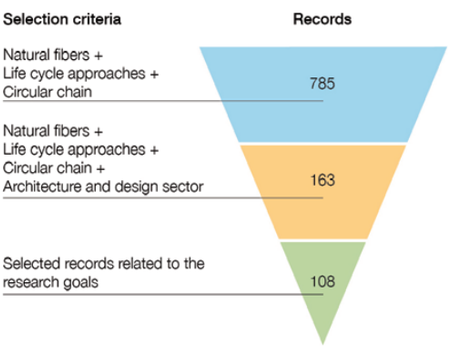


Fig. 4 | Records and criteria keywords related to the three selection filters (credit: the Authors, 2025).

con l'obiettivo di valutare i vantaggi e le riduzioni degli impatti lungo il ciclo vita. Altri studi comparativi (Salzer et alii, 2017; Keena et alii, 2022) mostrano come sistemi costruttivi basati su materiali naturali quali legno, bambù e fibra di cocco possano ridurre l'impatto ambientale dal 35% all'83% rispetto alle soluzioni tradizionali.

Life Cycle Thinking, Economia Circolare ed SDG | I risultati della presente review sono stati analizzati criticamente in relazione agli obiettivi di sviluppo sostenibile (SDGs). Nell'ambito del Life Cycle Thinking, l'Economia Circolare può essere considerata una traiettoria promettente per guidare le transizioni verso il raggiungimento degli SDG (Schroeder, Anggraeni and Weber, 2019). Tale prospettiva è principalmente attribuibile al suo notevole richiamo da parte dei decisori politici e degli attori industriali. Il forte legame tra gli scarti del settore agricolo e altre filiere produttive che emerge dall'analisi della letteratura condotta, ha un impatto diretto sull'SDG 8, in quanto mira a promuovere la creazione di nuove filiere, posti di lavoro e una crescita economica sostenibile. La circolarità ha inoltre un ruolo importante nel promuovere pratiche come la riparazione, la rigenerazione, il retrofit, il riciclo, la simbiosi industriale e le filiere a ciclo chiuso, che sono fondamentali per potenziare l'efficienza delle risorse (Schroeder, Anggraeni and Weber, 2019), così come indicato nel Target 8.4 'migliorare progressivamente, fino al 2030, l'efficienza delle risorse globali nel consumo e nella produzione nel tentativo di scindere la crescita economica dal degrado ambientale, in conformità con il quadro decennale di programmi sul consumo e la produzione sostenibili, con i paesi sviluppati che prendono l'iniziativa'.

L'impiego di fibre naturali nel settore dell'architettura e del design in ottica circolare è inoltre in sinergia con altri SDG, tra cui il 6 (Acqua), 7 (Energia), 12 (Consumo e produzione responsabili), 13 (Cambiamento climatico) e 15 (Vita sulla Terra). Nello studio di Parvathy et alii (2025) gli SDG 8 e 12 emergono come obiettivi chiave per il settore edilizio e riflettono un interesse crescente per le tecniche costruttive e i materiali sostenibili. Sull'esempio di Belmonte-Ureña et alii (2021) e UNEP (2020) sono stati classificati gli indicatori LCA, LCC e S-LCA rispetto agli SDG coerenti con il tema delle fibre naturali in architettura (Tab. 3). In base a tale classificazione, gli SDG selezionati sono stati raggruppati (Fig. 11) secondo una dimensione ambientale (SDG 3, 6, 7, 11, 12, 13, 14 e 15), una dimensione economica (SDG 8) e una dimensione sociale (SDG 1, 2, 3, 8, 11 e 12).

Conclusioni | Questo studio si è focalizzato sull'analisi dello stato dell'arte dei metodi di valutazione della sostenibilità ambientale, economica e sociale applicati alle fibre naturali, esaminando in particolare la potenzialità degli approcci LCA, LCC e S-LCA come strumenti per promuovere processi produttivi circolari tra il settore agricolo e quello edilizio. I risultati della revisione sistematica condotta hanno evidenziato che la valutazione della sostenibilità delle fibre naturali nel settore delle costruzioni è un tema ampiamente presente in letteratura e in linea con gli obiettivi europei. Riprendendo le domande di ricerca alla base dello studio si possono tuttavia evidenziare alcuni limiti al potenziale raggiungimento di alcuni SDG dell'Agenda 2030. Il primo riguarda l'applicazione dei metodi di valutazione della sostenibilità ambientale, sociale ed economica: nonostante le tre dimensioni della sostenibilità rientrino tra le priorità delle politiche nazionali e internazionali, spesso non si riscontra un effettivo allineamento con metriche e strumenti normativi; inoltre emerge come la maggior parte degli studi si concentri principalmente sulla dimensione ambientale, mentre solo una parte integra analisi di tipo economico e un numero ancora più limitato considera anche la dimensione sociale (Martínez and Miller, 2025).

Un secondo limite è legato alla scarsa considerazione degli aspetti relativi al reperimento delle fibre naturali e al loro smaltimento a fine vita. Gli studi di LCA presi in esame sono prevalentemente 'dalla culla al cancello' e non considerano tutte le fasi del ciclo vita, in particolare quelle relative alla coltivazione delle piante e allo smaltimento dei materiali, che risultano invece rilevanti per i materiali biogenici in relazione all'assorbimento di anidride carbonica, alle emissioni dei trasporti e al successivo rilascio di CO_2 e di altre sostanze incorporate nelle fibre.

Dall'analisi complessiva emergono tre elementi principali che evidenziano come l'applicazione delle metodologie basate sul ciclo vita possa favorire lo sviluppo di processi produttivi circolari tra il settore agricolo e quello edilizio.

In primo luogo l'interesse della comunità scientifica si sta orientando sempre di più verso la valutazione dell'impiego degli scarti del riso (18%) e del mais (8%) – tra le colture più diffuse in Italia e a livello globale – insieme a canapa (12%), bambù (4%) e altre fibre naturali per applicazioni nel settore delle costruzioni. Tale orientamento riflette una crescente sinergia tra i settori dell'agricoltura e dell'architettura, con potenziali benefici per le filiere agricole locali e prospettive di sviluppo in ambito europeo, in coerenza con gli obiettivi del progetto PNRR MICS (Made in Italy Circolare e Sostenibile).

In secondo luogo l'impiego di fibre naturali in edilizia, in particolare nei prodotti cementizi e nei materiali per l'isolamento termo-acustico, assume un ruolo strategico nel raggiungimento degli obiettivi europei di decarbonizzazione e sostenibilità (Mouton, Allacker and Röck, 2023). Tale approccio è rappresentato da alcuni elementi chiave, tra cui: la riduzione dello smaltimento dei rifiuti agricoli, spesso bruciati o abbandonati in campo; la diminuzione degli impatti ambientali nella fase di produzione dei materiali da costruzione e di conseguenza della domanda di nuove materie prime da estrarre; la riduzione delle emissioni di gas climalteranti durante la fase d'uso degli edifici grazie al miglioramento dell'isolamento termico dell'involucro; la possibilità di stoccare CO_2 all'interno delle costruzioni per periodi prolungati (30-50 anni) attraverso l'impiego di materiali edilizi di origine biogenica.

In ultimo l'integrazione tra metodi di valutazione complessi (Sposito and De Giovanni 2023) e la correlazione tra indicatori di sostenibilità in ottica di ciclo vita ed SDG (Backes and Traverso, 2022) risulta rilevante in particolare per gli indicatori di impatto ambientale, in stretta sinergia con gli obiettivi 6, 7, 12 e 13 e per gli indicatori di impatto sociale con forti connessioni con 14 SDG su 17. La ricerca evidenzia benefici concreti in termini di riduzione dell'impatto ambientale e di valorizzazione delle risorse locali in termini economico-finanziari, ma anche potenziali compromessi, ad esempio tra SDG 8 (Crescita economica) e SDG 13 (Azione per il clima).

L'implementazione di studi integrati in ottica Life Cycle Thinking (LCA, LCC, S-LCA e LCSA) potrebbe contribuire in modo sostanziale al raggiungimento dei target dell'Agenda 2030, consentendo di quantificare e misurare il grado di sostenibilità di un materiale, di un processo o di un edificio nel suo complesso. In conclusione si invita la comunità scientifica a promuovere e incentivare approcci interdisciplinari, a condividere banche dati aperte e a validare metriche e strumenti normativi comuni per la valutazione integrata della sostenibilità dei materiali biogenici o a base biologica, in quanto tali azioni risultano fondamentali per consolidare un linguaggio condiviso tra discipline e accelerare la transizione verso sistemi produttivi circolari e sostenibili, nei quali lo scarto di una filiera può acquisire valore ambientale, economico e sociale per altre.

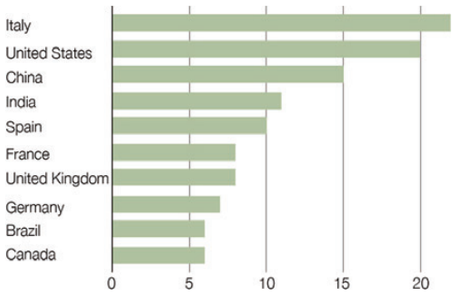


Fig. 5 | Records by country related to the screening phase; n. 142 records found on 8/8/2025 (credit: the Authors, 2025).

In recent years, the increasing recognition of environmental and socio-economic impacts within architecture and design has intensified scholarly and professional interest in bio-based materials. Within this framework, plant fibres exhibit considerable potential for incorporation into construction products and processes, owing to their renewable nature and generally limited ecological footprint (Carcassi et alii, 2022). These considerations closely align with the Sustainable Development Goals (SDGs) of the 2030 Agenda, specifically SDG 6 (Clean Water and Sanitation), SDG 7 (Affordable and Clean Energy), SDG 13 (Climate Action), and SDG 8 (Decent Work and Economic Growth). The adoption of bio-based materials entails implications for water resource consumption, embodied energy and carbon across the life cycle of these materials, as well as for advancing sustainable supply chains (Schroeder, Anggraeni and Weber, 2019; Cosentino, Fernandes and Mateus, 2024; Morpurgo, 2024). SDG 8, in particular, calls for enhanced efficiency in the global use of resources and seeks to decouple economic growth from environmental degradation (UN, 2015).

In the construction sector, achieving sustainability objectives requires rethinking production, design, and construction processes, as well as adopting a systemic approach grounded in the three dimensions of sustainability and the principles of the circular economy (Le et alii, 2025; Kayaçetin, Piccardo and Versele, 2023). This aim also underpins the 'Circular Design for Natural Fibres' project within PNRR MICS (Made in Italy – Circolare e Sostenibile), which seeks to valorise recovered or underused natural fibres, also in collaboration with local communities, in order to create more resilient and sustainable supply chains. Within this project, the article presents the state of the art in the scientific lit-

erature by examining two strategic economic sectors for Europe, agriculture and construction, to explore their interactions, potential, and limitations in meeting sustainability goals.

In particular, the systematic review (Page et alii, 2021; Littell, Corcoran and Pillai, 2008) addresses the following research questions: What is the state of the art in methods for assessing environmental, social and economic sustainability in relation to natural fibres? Can life-cycle-based sustainability approaches – Life Cycle Assessment (LCA), Life Cycle Costing (LCC) and Social Life Cycle Assessment (S-LCA) – support the development of circular production processes in both the agricultural and construction sectors? Which impact indicators are most relevant for evaluating natural fibres so as to stimulate new production chains aligned with the SDGs?

Building on a scientific framing of the topic, the article is organised as follows: it sets out the methodology adopted and the limitations of the study; presents the main results of the systematic review; offers three critical discussion sections on the themes identified in the research questions; and concludes with a final section. The aim is to provide a reference framework for the scientific community on sustainability assessment in relation to natural fibres for architecture and design. The systematic analysis constitutes a structured review of the existing literature that seeks to synthesise the best available evidence to answer a specific research question and facilitate broad dissemination of the results (Zumsteg, Cooper and Noon, 2012).

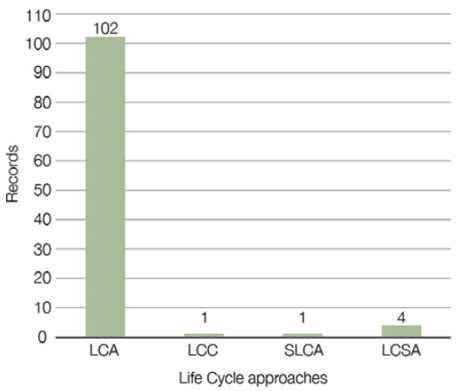
The findings indicate that, among the numerous case studies identified, LCA is the most widely used approach, LCC is generally coupled with LCA, and S-LCA is only rarely applied. The most frequently investigated fibres are rice-cultivation residues in biocements, hemp in thermal-insulating envelopes, and corncob in biofuels. The conclusions underline the importance of promoting integration among life-cycle-based assessment tools (Dace et alii, 2024) to reconcile environmental quality, social equity and responsibility, and economic impact in the construction sector, thereby contributing to a circular production model consistent with SDG 8.

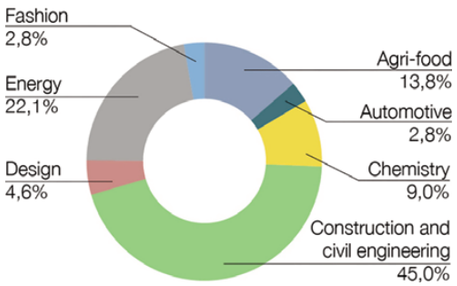
Scientific background and contribution originality | Over the past fifty years, global material extraction has more than tripled, surpassing 100 billion tonnes per year (Circle Economy, 2025), of which 60% is destined for civil engineering and construction (Zabalza Bribiàn, Valero Capilla and Aranda Usón, 2011). The extraction of materials and their subsequent use are responsible for roughly two-thirds of global greenhouse gas emissions and over 90% of biodiversity loss and water stress (International Resource Panel, 2024). The production of construction materials also accounts for more than 80% of the total energy consumption of the building process (Zhang et alii, 2019), with a substantial impact on embodied energy and emissions (Piccardo et alii, 2020). Design choices, therefore, constitute critical junctures at which not only aesthetic and functional qualities are determined, but also the environmental, social and economic impacts of an artefact across its entire life cycle (Mesa, Esparragoza and Maury, 2018; Singh and Ordoñez, 2016). In this context, the circular economy, being grounded in principles of waste prevention, industrial symbiosis, and designing out waste, provides the guiding paradigm for reducing dependence on primary resources and promoting regenerative models (McDonough and Braungart, 2002; Bocken et alii, 2016; Ferrara and Squatrito, 2022).

The circular economy has been institutionalised at the European level through the Circular Economy Action Plan (European Commission, 2020), the Green Deal (European Commission, 2019), and the New European Bauhaus (European Commission, 2021, 2023), which identify the construction sector as a priority area for intervention. The consolidated methodological framework of LCA supports these strategies, codified in 2006 by UNI EN ISO 14040 and 14044 and updated in 2021, and complemented by UNI EN 15978:2011 and UNI EN 15804:2021. Together, these standards enable the assessment of the environmental impacts of products and services and the verification of the effectiveness of the measures proposed by the 2030 Agenda and incorporated into European plans (Backes and Traverso, 2022; Giordano and Andreotti, 2023).

To support Life Cycle Assessment, various authors recognise the need to integrate Life Cycle Costing (ISO 15686:2017) for life-cycle cost evaluation, and Social Life Cycle Assessment, developed according to the UNEP / SETAC (2009) and UNEP (2020) guidelines (Fig. 1). The integration of these three methodologies within Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) is central to several European programmes, such as Level(s) and Orienting (2020-2024), which foster the development of methods and indicators to facilitate adoption by companies, or-

Social, Economic and Environmental	**Construction** Garas et alii, 2021	**Chemistry** Schonhoff et alii, 2021	**Fuel** Kristianto and Zhu, 2018; Kristianto, 2017
Economic and Environmental	**Construction** Chipade et alii, 2025; Khan and Ali, 2020; Fernando et alii,2021; Komkova and Habert, 2023; Martínez and Miller, 2025; Ondova et alii, 2013; Paul et alii, 2023; Poolsawad et alii, 2023;	**Chemistry** Schonhoff et alii, 2023 **Food** Arias et alii, 2023; Hartini et alii, 2023 **Agriculture** Alderkamp et alii, 2025; Pinelli et alii, 2020	**Fuel** Bartocci, 2020; Cortes-Peña, 2020; Garkoti and Thengane, 2025 **Design** García-Velásquez, 2022; Sifuentes-Nieves, 2023
Social	**Food** Mancini et alii, 2023;		
Economic	**Construction** Gounni et alii, 2019		
Environmental	**Construction** Araujo et alii, 2022; Aversa et alii, 2019; Babenko et alii, 2025; Baul et alii, 2024; Béjat et alii, 2025; Bošković and Radivojević, 2023; Botejara-Antúnez et alii, 2023; Buratti et alii, 2018; Caldarelli et alii, 2022; Cucchiella et alii, 2024; Dotelli et alii, 2020; Essaghouri et alii, 2023; Giuffrida et alii, 2024; Gursel et alii, 2016; Isopescu et alii, 2024; Kena et alii, 2022; Komkova and Habert, 2023; Liikanen et alii; 2017; Mendes Moraesa et alii, 2010; Pennacchio et alii, 2017; Pittau et alii, 2021; Quintana-Galardo et alii, 2021; Ricciardi et alii 2021; Salzer et alii, 2017; Seyedabadi et alii, 2023; Sinka et alii, 2020; Sprenger et alii, 2025; Yu et alii, 2011; Nishioka et alii, 2005; Oneylowe et alii, 2022; Quintana-Gallardo et alii, 2020; Romos et alii, 2021; Sheshadri et alii, 2024; Soleimani et alii, 2017; Vilaboa Dìaz, 2022; Wener et alii 2005; Yang et alii, 2024	**Chemistry** Bose et alii, 2020; Lammens et alii, 2011; Loya.Gonzàles et alii, 2019; Miller et alii, 2013; Nadeem et alii, 2024; Nascimento et alii, 2016; Samanta and Chakraborty, 2023; Sendão et alii, 2025 **Food** Arias et alii, 2021; Costa et alii, 2024; Hatcho et alii, 2012; Le Rose et alii, 2025; Jesewani et alii, 2015; Safaripour et alii, 2021; Sulistyo et alii, 2024 **Fashion** Duranti et alii, 2024; Hilderbrandt et alii, 2021; Yavuzkasap Ayakta et alii, 2024 **Design** Chen et alii, 2023; Enarevba et alii, 2023; Mirabella et alii, 2013	**Fuel** Akbarian-Saravi et alii, 2025; Belaud et alii, 2019; Càrdenas-Fernàndez et alii, 2017; Chum et alii, 2014; Gerrior et alii, 2022; Karlsdòttir et alii, 2015; Kowalski et alii, 2011; McKechnie et alii, 2015; Nguyen et alii, 2019; Oradhan et alii, 2022; Rashif et alii, 2025; Rathnayake et alii, 2018; Samanta and Chakraborty, 2024; Schoen and Bagley, 2012; Sengupta et alii, 2025; Sharara et alii, 2020; Sperandio et alii, 2021; Suhartono et alii, 2018; Urban Cordeiro et alii, 2024 **Agriculture** Frischknecht et alii 2016; Prioux et alii, 2023; Scrucca et alii, 2020





Tab. 1 | Classification of selected studies by Life Cycle approach and application sector related to screening phase (credit: the Authors, 2025).

Fig. 6 | Distribution of selected studies by Life Cycle approaches related to n. 108 records found on 8/8/2025 (credit: the Authors, 2025).

Fig. 7 | Distribution of selected studies by sector related to n. 108 records found on 8/8/2025 (credit: the Authors, 2025).

ganisations and researchers, with particular attention to SMEs operating across different sectors.

Within this framework, bio-based materials are defined in UNI EN 16575:2014 as 'materials wholly or partly derived from biomass, i.e., material of biological origin, excluding fossil sources contained in the geosphere' (EN 16575:2014 point 2.1) and assume particular relevance. Within this category, natural fibres constitute a strategic resource for sustainable architecture (Thiébat and Morselli, 2025), encompassing plant-derived materials characterised by short growth cycles, wide availability and carbon-sequestration capacity.

Beyond reducing embodied energy and emissions, natural fibres are notable for their suitability for inter-sectoral circularity processes, in which agricultural residues or agri-food by-products can be converted into panels or building components with neutral or negative carbon balances (Göswein et alii, 2022). Recent research further indicates that designing with natural fibres addresses not only performance criteria but also integrates environmental, economic and social assessments, thereby broadening application opportunities in architecture and design (Violano, Cannaviello and Del Prete, 2021; Sposito and Scalisi, 2023; Mouton, Allacker and Röck, 2023).

Reviews addressing the three dimensions of sustainability and the circularity of bio-materials for construction remain relatively limited. Among them, Le, Salomone and Nguyen (2024) critically examine the methods used to evaluate the sustainability dimensions of building solutions based on biogenic materials, while the state-of-the-art analysis conducted by Rigillo et alii (2023) highlights how the relationship between digital tools and circularity is still underexplored within the European Union, particularly in the disciplines of Architecture. In this context, the originality of the present contribution lies in providing an up-to-date framework on the use of natural fibres in the construction sector, relating circular supply chains and production processes to life-cycle approaches and analysing their connections with the SDGs.

Methodology and research limitations | The literature review was conducted following the PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) guidelines, developed by Moher et alii in 2009 and updated in 2021 (Page et alii, 2021). PRISMA comprises four phases and includes a checklist for identifying relevant studies, along with a 'flow diagram'. The review was therefore carried out in accordance with the phases outlined below.

Phase 1) Formulation of the research questions and definition of the search queries. The first phase drew on the objectives and questions set out in the introduction to identify the search keywords. The query (Fig. 2) focused on three groups of keywords relating to: natural fibres, with an emphasis on virgin or waste fibres cultivated in Italy; life-cycle-oriented assessment approaches that address the three dimensions of sustainability; and circular supply chains and production processes. A second query narrowed the previous search to the fields of architecture and design. Boolean operators 'AND' and 'OR' were used to refine the search.

Phase 2) Sampling procedures. The second phase involved selecting studies based on inclusion and exclusion criteria applied to the Scopus database; it was conducted on 18 April 2025 and repeated on 8 August 2025 to verify and update the results. Resources that were not readily accessible online (books and book chapters) and/or not in English were excluded.

Phase 3) Data collection, analysis and synthesis. In this phase, data were extracted from the selected studies, then analysed and synthesised systematically. The content was examined through a qualitative analysis of the bibliographic sources, based on information contained in the title, abstract and keywords. Review articles and other inaccessible resources were excluded. For each selected article, the following elements were extracted and processed in spreadsheets: type of bibliographic resource; year of publication; life-cycle approach (LCA, LCC, S-LCA, LCSA); reference supply chain; object of study; type of natural fibre; and origin of the fibre (virgin or by-product / waste).

Phase 4) Interpretation of results. The final phase offered a critical examination of the themes identified in the research questions.

One limitation of the study lies in the rate at which review results may change. Current interest in sustainability topics is associated with a rapid increase in scientific output. However, adopting a systematic approach enables the review to be replicated and updated over time, thereby mitigating this issue. In Figure 2, the most recent values are shown in parentheses. A further limitation concerns access to bibliographic resources: the review may be partial because books and other non-open-access ma-

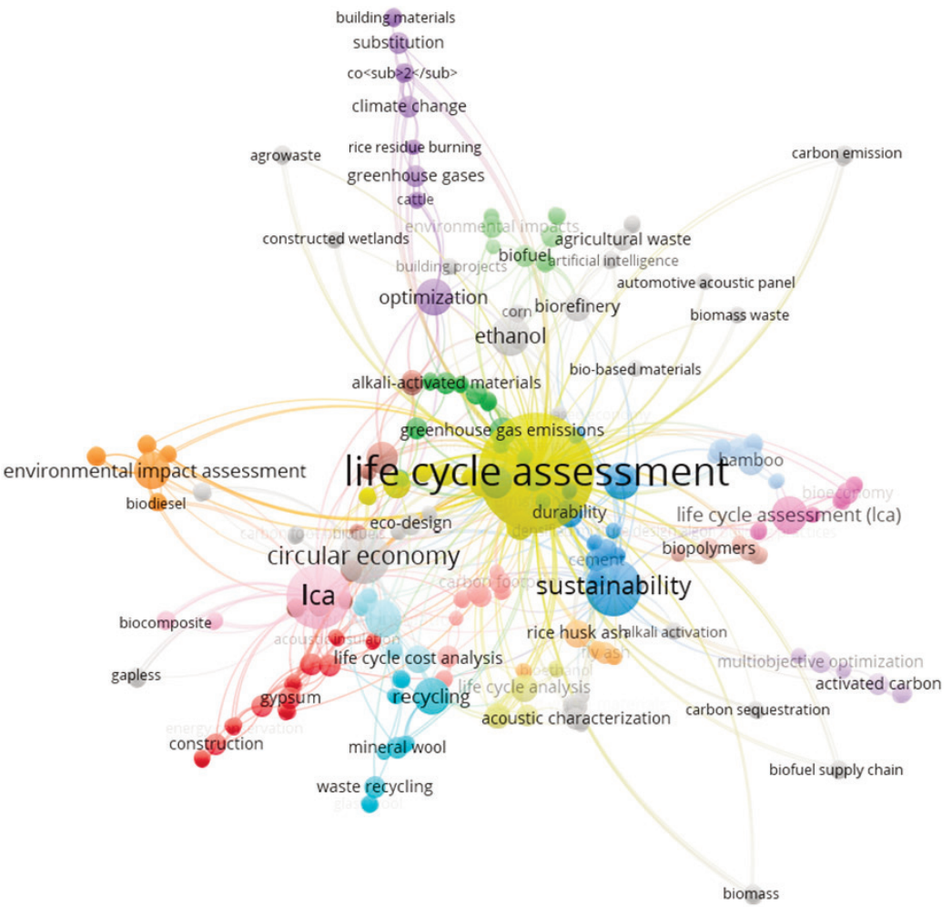


Fig. 8 | Keywords mapping performed by VOSviewer version 1.6.20 developed by Leiden University and related to 108 records found on 8/8/2025 (credit: the Authors, 2025).



Fig. 9 | Analysis of natural fibres by types and origins related to n. 108 records found on 8/8/2025: percentages relating to the most investigated fibres in applications in the energy and construction sectors (credit: the Authors, 2025).

	Composite materials	Concrete / mortar & plaster	Mansonery	Panels	Other construction materials	Packaging product
Bamboo		Araujo et alii, 2022			Yu et alii, 2011; Yang et alii, 2024; Salzer et alii, 2017; Chipade et alii, 2025	Chen et alii, 2023
Bio-fibers mix				Quintana-Gallardo et alii, 2020	Keena et alii, 2022; Seyedabadi et alii, 2023	Sifuentes-Nieves et alii, 2023
Coconut					Salzer et alii, 2017	
Coffee chaff				Ricciardi et alii, 2021; Buratti et alii, 2018		
Cork				Giuffrida et alii, 2024; Ricciardi et alii, 2021; Buratti et alii, 2018		
Corncob				Ramos et alii, 2021		
Flax	Sprenger et alii, 2025					
Hemp	Sinka et alii, 2020; Sprenger et alii, 2025	Bošković and Radivojević, 2023	Aversa et alii, 2019; Isopescu et alii, 2024; Dotelli et alii, 2020; Vilaboa Díaz et alii, 2022	Cucchiella et alii, 2024; Essaghouri et alii, 2023; Pittau et alii, 2020; Pennacchio et alii, 2017; Giuffrida et alii, 2024	Scrucca et alii, 2020; Chipade et alii, 2025	
Kenaf	Sprenger et alii, 2025					
Mycelium				Babenko et alii, 2025	Chipade et alii, 2025	
Rice husk		Khan and Ali, 2020		Ricciardi et alii, 2021; Buratti et alii, 2018		
Rice husk ash		Fernando et alii,2021; Garas et alii, 2021; Gursel et alii, 2016; Martínez and Miller, 2025; Mendes Moraesa et alii, 2010; Onyelowe et alii, 2022; Paul et alii, 2023; Sheshadri et alii, 2024; Soleimani et alii, 2017				
Rice straw				Quintana-Gallardo et alii, 2021		
Sheep wool				Pennacchio et alii, 2017; Quintana-Gallardo et alii, 2020		
Sisal	Sprenger et alii, 2025					
Sugar beet						García-Velásquez et alii, 2022
Sugar cane		Khan and Ali, 2020				
Textile waste				Gounni et alii, 2019		
Wheat straw			Vilaboa Díaz et alii, 2022			García-Velásquez et alii, 2022
Wheat bran				Safaripour et alii, 2021		
Wood waste					Poolsawad et alii, 2023	

Tab. 2 | Analysis of natural fibres by types and origins related to n. 43 records found on 8/8/2025: most investigated fibres in energy and construction applications (credit: the Authors, 2025).

terials were excluded, as they are often not readily consultable. Finally, a further constraint may be the lack of standardised nomenclature, which could have led to a partial keyword search. The same issue emerged in interpreting the results, where similar acronyms and impact indicators can create ambiguity in reading the findings.

Results | From the initial query, 785 publications were identified for the period 2005-2025 (Fig. 3). Following the screening phase, 108 records were retained, comprising journal articles and conference proceedings (Fig. 4). A rising trend in publication volume is evident from 2009, with a marked increase from 2020 and a predominance of contributions from the Italian context (Fig. 5). These findings confirm growing interest in sustainability and decarbonisation, catalysed by Agenda 2030 and the European Green Deal. However, out of the 108 studies, only 4 consider all three dimensions of sustainability; 18 address both environmental and economic aspects. Among the articles that focus on a single dimension (Tab. 1), 102 LCA studies dominate in comparison to an LCC study and an S-LCA study (Fig. 6). The search queries indicate that the most-cited papers on Scopus are those by Gursel, Maryman and Ostertag (2016), Belaud et alii (2019), Yu, Tan and Ruan (2011), and Buratti et alii (2018), which primarily assess the environmental dimension, and Fernando et alii (2021), which jointly addresses environmental and economic dimensions.

Additionally, based on information in the titles, abstracts and keywords, a qualitative analysis indicates that the LCA, LCC and S-LCA approaches applied to the construction sector have repercussions across several production domains, such as building and civil engineering for 45%, energy (biofuels) for 22%, agri-food for 13.8%, chemicals for 9%, design for 4.6%, automotive for 2.8% and clothing for 2.8% (Fig. 7). To facilitate the interpretation of the results, a graphical analysis was performed using the VOSviewer software, developed by Leiden University, on 108 articles, as illustrated in Figure 8.

Examining the type and origin of the natural fibres discussed in the articles reveals a predominance of residues from the rice value chain (18%), followed by hemp (12%) and corn (8%), and other fibres at around 4%, including bamboo, wood waste and sheep wool (Fig. 9). The results suggest that residues from the cultivation of rice and corn, which are among the most widespread crops globally, are widely analysed, particularly for biofuels (corncob) and construction products (rice husk and rice straw).

A subsequent in-depth review of 43 case studies in the fields of building, civil engineering and design (Tab. 2) identified the most widespread natural fibres and their applications in construction, such as bio-composites, packaging materials, cement-based products, masonry elements and envelope panels (Fig. 10). The most extensively analysed fibres are residues from rice cultivation, used mainly in cementitious products and insulating materials; hemp, used in bio-composites, masonry components and thermal insulation panels; and bamboo, at building scale and in packaging.

The literature review shows that sustainability assessment indicators for natural fibres (Tab. 3) focus primarily on CO_{2eq}-related metrics (GWP, EC, CF, GHG, CO_2), cumulative energy demand (CED, OE, EE, OC), water use (i.e., WF, water consumption / use), acidification potential, eutrophication potential, land use, human toxicity, and, finally, CO_2 uptake and storage. Economic indicators include 'payback period' and 'net present value', while the PSILCA database, comprising 34 indicators, was used as a reference for social indicators.

From the results, three main areas of discussion emerged regarding the research questions: the integration of life-cycle approaches; the relationship between supply chains and circular production processes; and connections to the SDGs.

Potential and limitations of integrating LCA, LCC and S-LCA approaches | The limited presence of the social and economic dimensions observed in the results may be attributable to the fact that most studies focus on the experimental use of natural fibres. Studies that address the integration of life-cycle approaches exhibit two methodological orientations: integrating sustainability dimensions within a single analytical framework, and developing assessments independently, followed by a comparison of results.

Combined approaches (Kristianto and Zhu, 2017; Hartini et alii, 2023; Arias et alii, 2024; Alderkamp et alii, 2025; Garkoti and Thengane, 2025; Komkova and Habert, 2023; Sifuentes-Nieves et alii, 2023; García-Velásquez, Leduc and van der Meer, 2022) show critical relationships between economic outcomes and environmental impacts, thereby offering a valuable contribution to policy-making and to the sustainable planning of production supply chains. However, these contributions remain confined mainly to theoretical analyses or simulation-based models predominantly in the food, biofuel and construction sectors, and do not systematically integrate the economic and environmental dimensions, nor do they include the social dimension.

Parallel approaches (Bartocci et alii, 2020; Cortés-Peña et alii, 2020; Pinelli et alii, 2020; Schonhoff et alii, 2023; Fernando et alii, 2021; Martínez and Miller, 2025; Paul, Islam and Elahi, 2023; Khan and Ali, 2019; Garas, Sayed and Bakhoum, 2021; Ondova, Stevulova and Meciarova, 2013; Gounni et alii, 2019) are applied predominantly to the construction sector. In these studies, LCA and LCC are conducted separately and subsequently compared, with the advantage of greater methodological clarity. The studies frequently report environmental benefits in terms of reduced CO_2 emissions, while highlighting limitations such as high costs, dependence on local resource availability, and the restricted consideration of impacts other than climate change (Bartocci et alii, 2020; Paul, Islam and Elahi, 202; Khan and Ali, 2019).

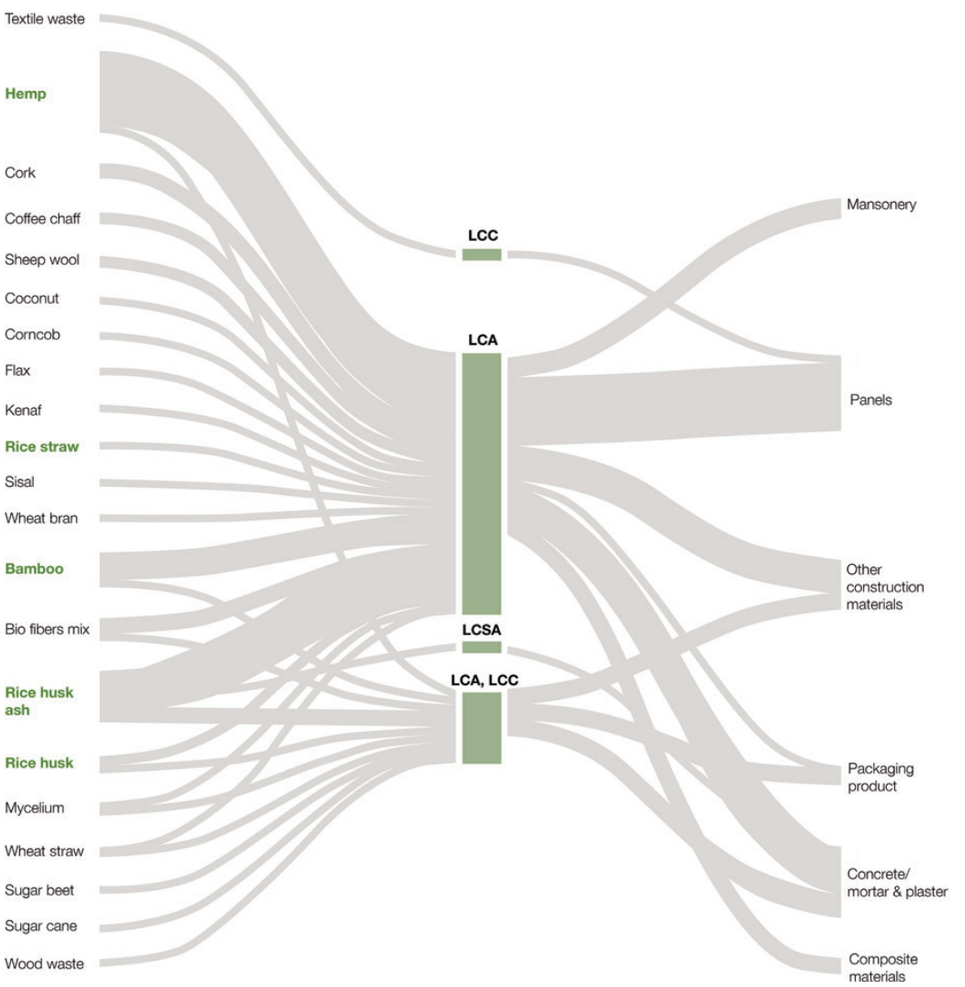


Fig. 10 | Analysis of natural fibres by types and origins related to n. 43 records found on 8/8/2025: most investigated fibres in energy and construction applications using life-cycle approaches (credit: the Authors, 2025).

Another contribution is that of Mancini et alii (2023), which addresses S-LCA exclusively and proposes an assessment of the social impacts of 44 representative food products in the European context: unlike environmental impacts, social risks are high in fruit, vegetable, and rice cultivation. Although the study is relevant from a policy perspective, it does not integrate the environmental and economic dimensions, thus limiting its applicability.

LCA studies in the construction sector primarily focus on comparative assessments to develop new, non-conventional materials, with results that generally do not include environmental impacts during use and at the end of life. Some authors attempt to incorporate the use phase by normalising environmental results to mechanical performance (Gursel, Maryman and Ostertag, 2016; Isopescu et alii, 2024; Sprenger et alii, 2025; Sinka et alii, 2020), hygrothermal performance (Aversa et alii, 2019; Dotelli et alii, 2020) and physico-technical performance (Buratti et alii, 2018; Ricciardi et alii, 2021), or by comparing mixtures at equal mechanical performance (Soleimani and Shahandashti, 2017; Martìnez and Miller, 2025; Sheshadri, Marathe and Sadowski, 2024).

Only a subset of studies expands the system boundary to the entire life cycle, 'cradle-to-grave' (Seyedabadi, Abolhassani and Eicker, 2023; Keena et alii, 2022; Ramos et alii, 2021; Giuffrida et alii, 2024) or 'cradle-to-cradle' (Salzer et alii, 2017), thereby highlighting the potential and limitations of using agri-food residues in construction and design. Other research identifies the capacity of fibres to absorb carbon during plant growth (Giuffrida et alii, 2024) and thus to act as a CO_2 storage pool during the use phase.

However, the identified LCA studies are static and do not account for temporal dynamics associated with differing carbon uptake and release rates, nor for effects linked to the lag between sequestration and emission (Keena et alii, 2022). Some authors emphasise that, although biomaterials constitute a renewable alternative to conventional materials, their use entails inherent risks; for example, changes in land use may lead to deforestation and the loss of local biodiversity (Keena et alii, 2017).

In the sustainability assessment of waste-derived materials, the contribution is linked to transport impacts, which are of considerable importance. In geographical areas such as the United States (Gursel, Maryman and Ostertag, 2016), Canada (Keena et alii, 2022), South-East Asia (Sheshadri, Marathe and Sadowski, 2024) and Europe (Cucchiella et alii, 2024), where road distances are substantial, transport constitutes a significant share of emissions; for this reason, the use of locally available materials remains the most sustainable option (Gursel, Maryman and Ostertag, 2016). In this regard, some studies have undertaken sensitivity analyses to evaluate differences in environmental results by increasing and decreasing the kilometres attributed (Soleimani and Shahandashti, 2017; Araujo et alii, 2022).

Similarly, the transformation of agricultural residues often entails processes that require high energy inputs, such as grinding (Gursel, Maryman and Ostertag, 2016; Martìnez and Miller, 2025) and extrusion (Cucchiella et alii, 2024). Moreover, the use of plant fibres, such as hemp, straw and olive stone, for the production of bricks, cementitious products or plasters, generally reduces environmental impacts but also compromises their mechanical properties, particularly compressive strength and durability (Vilaboa Dìaz, López and Bugallo, 2022). Some

Authors	Indicators	SDGs	Methods	Tools
Quintana-Guallardo et alii,2020; Salzer et alii, 2017; Buratti et alii, 2018; Keena et alii, 2017; Salzer et alii, 2022; Vilaboa Dìaz et alii, 2022; Sprenger et alii, 2025; Buratti et alii, 2018; Sinka et alii, 2020; Giuffrida et alii, 2024; Cucchiella et alii, 2024; Essaghouri et alii, 2023; Yu et alii, 2011; Kristianto e Zhu, 2018; Khan e Ali, 2019; Bartocci et alii, 2020; Pinelli et alii, 2020; Garas et alii, 2021; Ramos et alii, 2021; Ricciardi et alii, 2021; Araujo et alii, 2022; García-Velásquez et alii, 2022; Onyelowe et alii, 2022; Hartini et alii, 2023; Komkova and Habert, 2023; Paul et alii, 2023; Schonhoff et alii, 2023; Schonhoff et alii, 2023; Seyedabadi et alii, 2023; Sifuentes-Nieves et alii, 2023; Baul et alii, 2024; Sheshadri et alii, 2024; Babenko et alii, 2025; Garkoti and Thengane, 2025; Martínez and Miller, 2025; Yang et alii, 2024; Arias et alii, 2024	CO_2 emissions; GWP; GWP100; Climate change; GHG emissions; Carbon footprint; CO_{2eq} [Kg CO_{2eq}]	7, 11, 12, 13,15	IPCC CML-IA ReCiPe 2016 (midponit) ILCD 2011 (midpoint) MCDA N/a	SimaPro 8 Gabi SimaPro 9.3 SimaPro 9.2.0.2 Open LCA
Giuffrida et alii, 2024; Araujo et alii, 2022	CO_2 UPTAKE Carbon storage	13, 15	CML-IA	SimaPro 9.3
Pennacchio et alii 2017; Salzer et alii, 2017; Buratti et alii, 2018; Keena et alii, 2017; Salzer et alii, 2022; Vilaboa Dìaz et alii, 2022; Buratti et alii, 2018; Giuffrida et alii, 2024; Yu et alii, 2011; Kristianto and Zhu, 2018; Sheshadri et alii, 2024; Babenko et alii, 2025; Chipade et alii, 2025; Ricciardi et alii, 2021; Yang et alii, 2024; Cucchiella et alii, 2024; Essaghouri et alii, 2023; Seyedabadi et alii,2023	Cumulative Energy Demand; EE and OE [MJ/UF]	7, 11, 12, 13	CED EN 15804 + A2 N/a	SimaPro 8 SimaPro 9.3 SimaPro 9.2.0.2
Pennacchio et alii 2017; Vilaboa Dìaz et alii, 2022; Sprenger et alii, 2025; Keena et alii 2022	Non-renewable Energy [MJ/UF]	7, 12	N/a	N/a
Keena et alii, 2022; Sprenger et alii, 2025, Babenko et alii, 2025; Safaripour et alii, 2021	Acidification potential	6, 13	N/a	
Keena et alii, 2022; Sprenger et alii, 2025; Safaripour et alii, 2021; Chen et alii, 2023	Eutrophication potential	6, 13	N/a	
Keena et alii, 2022; Sprenger et alii, 2025; Sifuentes-Nieves et alii, 2023	Land use	12, 13, 15	N/a	
Sprenger et alii, 2025	Photochemical ozone formation	13	N/a	
Sifuentes-Nieves et alii, 2023; Safaripour et alii, 2021; Chen et alii, 2023	Ozone depletion	12, 13	N/a	
Soleimani and Shahandashti, 2017; Vilaboa Dìaz et alii, 2022; Sprenger et alii, 2025; Sifuentes-Nieves et alii, 2023	Water consumption	6	TRACI	Gabi
Giuffrida et alii, 2024	Water footprint	6	TRACI	AWARE
Babenko et alii, 2025; Chen et alii, 2023	Human toxicity	3		
Chen at alii, 2023	Marine aquatic ecotoxicity	6, 14	Eco indicator 99, CML	SimaPro 9.0, Gabi
Gounni et alii, 2019; Arias et alii, 2024; Garkoti e Thengane, 2025	Pay Back Period, Net Present Value	8		GaBi 10.7.0.183
Schonhoff et alii, 2023; Mancini et alii, 2023	Gender wage gap; 14 impact subcategories (34 PSILCA indicators)	1, 2, 3, 8, 11, 12	PSILCA	

Tab. 3 | Classification of selected SDGs according to environmental, economic, and social dimensions and correlation between sustainability Life Cycle indicators (credit: the Authors, 2025).

authors have conducted the Life-Cycle Inventory (LCI) based on primary data (Gursel, Maryman and Ostertag, 2016; Soleimani and Shahandashti, 2017), while others rely on data drawn from the literature and databases (Onyelowe et alii, 2022; Sheshadri, Marathe and Sadowski, 2024; Martínez and Miller, 2025) or from Environmental Product Declarations (EPD; Aversa et alii, 2019; Dotelli et alii, 2020), omitting information such as the provenance of the natural fibres and of the incineration process, transport, and the national reference energy mix.

Interactions between agriculture, architecture and design from a circular perspective | The results confirm strong interest in promoting synergies with the agricultural and industrial sectors to support the transition towards a circular economy and the decarbonisation of the built environment.

With regard to rice residues, although few studies report information on the availability of the plant fibre, FAO data indicate that rice is the third most cultivated food product, at 740 million tonnes per annum (Buratti et alii, 2018), and that, worldwide, 156 million tonnes of rice husk are disposed of annually (Gursel, Maryman and Ostertag, 2016). In India, the second-largest rice producer globally, cultivation residues are typically burned, contributing to critically high PM2.5 emissions; only 1% of rice husk ash (RHA) is utilised, while millions of tonnes are landfilled (Sheshadri, Marathe and Sadowski, 2024).

In building and civil engineering applications, the use of supplementary cementitious materials (SCMs) in concrete and cement mixes is becoming increasingly widespread to reduce or eliminate clinker (Martínez and Miller, 2025). Among SCMs, ashes from the energy recovery of agricultural residues, particularly RHA, are increasingly used to produce bio-cements, as they enhance the environmental, mechanical, and durability properties of concrete and allow up to 30-40% substitution for Portland cement (Gursel, Maryman and Ostertag, 2016).

The LCA studies reviewed focus primarily on the impacts of transport (pollutants), emissions during cement firing and incineration of the plant fraction (greenhouse gases and pollutants), primary energy for processing, and water consumption for quarrying operations. The results of the Life Cycle Impact Assessment phase (LCIA; ISO 14040:2021) indicate the greater sustainability of RHA-based bio-cements, including when combined with other SCMs: the GWP and GHG indicator ranges from 284 to 329 kg CO_2 per cubic metre for mixes with RHA. It falls to 194 kg CO_2 per cubic metre for RHA with geopolymers, compared with 369-544 kg CO_2 per cubic metre for conventional cement (Martínez and Miller, 2025).

Beyond binders, residues from rice cultivation, particularly husk and straw, are used to produce thermal insulation panels, also in combination with other fibres (Quintana-Gallardo et alii, 2021). On the basis of primary data, Buratti et alii (2018) and Ricciardi et alii (2021) compared the environmental, thermal and acoustic performance of insulation samples made from rice husk, other biogenic resources and waste materials. Using a 'cradle to gate' LCA approach, they reported the lowest emission values for rice husk panels (1.11 kg CO_{2eq} per square metre), coffee chaff panels (0.56 kg CO_{2eq} per square metre), and a mix of 20% husk, 60% recycled cork and 20% coffee chaff (1.83 kg CO_{2eq} per square metre). It should be noted, however, that these values exclude the cultivation and processing phases of rice, unlike studies (Scrucca et alii, 2020) that allocate a proportion of impacts to the by-product.



Fig. 11 | Classification of selected SDGs according to environmental, economic, and social dimensions (credit: the Authors, 2025).

Finally, in a comparative LCA, Quintana-Gallardo et alii (2021) showed that using rice straw in construction materials avoids 40 kg CO_{2eq} relative to incineration and 94.21 kg CO_{2eq} relative to leaving the straw in the field. Technical hemp fibre and shiv (the woody core) are used at all building scales, from bio composites to envelope components (Tab. 2). Sprenger et alii (2025) combine a comparative LCA of hemp, kenaf, flax and sisal fibres with an assessment of the mechanical performance of the four fibre types. However, the 'cradle-to-gate' comparison shows that flax fibres derived from tow, a by-product of textile production, exhibit the lowest environmental impact while simultaneously achieving high mechanical performance, making them particularly suitable for the injection-printed composites.

Aversa et alii (2019) and Dotelli et alii (2020) conducted a comparative 'cradle-to-gate' LCA on four non-load-bearing masonry systems, each with a different build-up: lime and hemp shiv, autoclaved aerated concrete, expanded clay, and clay brick. The results show that the lime and hemp shiv wall has a lower environmental impact in terms of acidification potential, land and water use, GWP, abiotic depletion potential (fossil and non-fossil), and photochem-

ical smog formation potential. Giuffrida et alii (2024) compare a raw earth wall insulated with bio-based materials (hemp, cork and straw) against benchmark solutions.

The 'cradle-to-grave' LCA simulates a 100-year life cycle for one square metre of wall and considers multiple indicators of thermal, energy and environmental performance. The authors conducted a sensitivity analysis to evaluate different virgin plant fibres added to the earth mix, with closer attention to carbon footprint and carbon capture indicators. The results indicate that stabilisation with straw and with hemp are good alternatives, as they require less irrigation than jute and flax.

Unlike many other natural fibres, bamboo is distinguished by high structural strength and is therefore of particular interest for sustainable architectural applications, with the potential to reduce structural impacts relative to conventional construction materials, especially concrete. Yu, Tan and Ruan (2011) demonstrate that a bamboo housing prototype in China achieves a significant reduction in both embodied energy and CO_{2eq} emissions across the life cycle compared with concrete and brick buildings.

Similar findings are reported by Salzer et alii (2017), who include bamboo among the lowest impact construction solutions in the context of social housing. Although in a different application sector, Chen et alii (2023) confirm this evidence by showing that bamboo fibre also reduces energy use and emissions in food packaging production compared with conventional plastics. Araujo et alii (2022) further emphasise the need to investigate socio-economic aspects related to the development of local value chains and job creation in emerging countries.

Among innovative bio-based materials that have gained increasing scientific interest are thermal insulations based from mycelium composites with agricultural residues, such as hemp, flax, and wood (Babenko et alii, 2025), as well as those based on wool (Quintana-Guallardo et alii, 2020; Pennacchio et alii, 2017). An important aspect regarding mycelium is that the selection and size of the natural fibres used in the substrate, the fungal species, the production process, and the incubation period substantially influence the mechanical properties of the components (Babenko et alii, 2025).

Although the assessment of environmental impacts is not the central theme of mycelium studies, it is gaining importance, and studies such as Babenko et alii (2025) show promising sustainability outcomes for these composites. In particular, the authors conduct a 'cradle-to-gate' LCA comparing the environmental impacts of two mycelium composite manufacturing processes: one developed at room temperature and one under controlled conditions in a climatic chamber, the latter exhibiting higher values for GHG emissions, resource use, GWP, acidification potential and human toxicity potential.

As for waste sheep wool, sourced from livestock systems or from textile and furniture supply chains, several authors have demonstrated its ability to achieve acoustic and thermal performance equivalent to conventional insulation products, such as mineral wools and polymer foams; wool also offers excellent fire resistance owing to its intrinsic flame-retardant properties (Gounni et alii, 2019).

Pennacchio et alii (2017) and Quintana-Guallardo et alii (2020) conducted LCA analyses comparing insulation products available on the European market with experimental alternatives in wool and hemp, cellulose fibre, and waste wool with PET. The use of waste wool for thermal insulation has also been analysed from a cost perspective by Gounni et alii (2019): the LCC considered upfront and in-use energy costs to define the economic advantage of biogenic materials over EPS and rock wool.

Numerous studies analyse the use of natural materials and fibres in construction not only individually, but also through combinations or comparisons between alternatives. The research spans building components and materials (Babenko et alii, 2025; Seyedabadi, Abolhassani and Eicker, 2023; Vilaboa Dìaz, López and Bugallo, 2022; Safaripour et alii, 2021; Gounni et alii, 2019; Boškovic and Radivojevic, 2023) and comparisons between components (Babenko et alii, 2025; Keena et alii, 2022; Quintana-Gallardo et alii, 2021; Pittau et alii, 2020; Essaghouri, Mao and Li, 2023) or whole buildings (Chipade et alii, 2025; Salzer et alii, 2017), to evaluate life cycle benefits and impact reductions. Other comparative studies (Salzer et alii, 2017; Keena et alii, 2022) show that construction systems based on natural materials such as timber, bamboo and coconut fibre can reduce environmental impact by 35% to 83% compared with traditional solutions.

Life Cycle Thinking, Circular Economy and SDG | The findings of this review have been critically examined in relation to the Sustainable Development Goals (SDGs). Within the Life Cycle Thinking framework, the Circular Economy can be regarded as a promising pathway to steer transitions towards achieving the SDGs (Schroeder, Anggraeni and Weber, 2019). This perspective is mainly attributable to its strong appeal among policymakers and industrial stakeholders. The close linkage between agricultural residues and other production sectors, as revealed by the literature analysis, directly impacts SDG 8, which aims to foster the creation of new value chains, jobs, and sustainable economic growth.

Circularity also plays an important role in promoting practices such as repair, regeneration, retrofitting, recycling, industrial symbiosis, and closed-loop supply chains, which are fundamental to enhancing resource efficiency (Schroeder, Anggraeni, and Weber, 2019). This aligns with Target 8.4, which aims to progressively improve global resource efficiency in consumption and production by 2030. With developed countries taking the lead, the objective is to decouple economic growth from environmental degradation, in line with the ten-year framework of programmes on sustainable consumption and production.

The use of natural fibres in architecture and design from a circular perspective also aligns with other SDGs, including 6 (Water), 7 (Energy), 12 (Responsible consumption and production), 13 (Climate action) and 15 (Life on land). In the study by Parvathy et alii (2025), SDGs 8 and 12 emerge as key objectives for the building sector and reflect growing interest in sustainable construction techniques and materials.

Following the examples of Belmonte-Ureña et alii (2021) and UNEP (2020), LCA, LCC and S-LCA indicators were classified against the SDGs, consistent with the theme of natural fibres in architecture (Tab. 3). Based on this classification, the selected SDGs were grouped (Fig. 11) into an environmental dimension (SDGs 3, 6, 7, 11, 12, 13, 14 and 15), an economic dimension (SDG 8) and a social dimension (SDGs 1, 2, 3, 8, 11 and 12).

Conclusions | This study focused on analysing the state of the art of environmental, economic, and social sustainability assessment methods applied to natural fibres, examining in particular the potential of LCA, LCC, and S-LCA as tools to promote circular production processes in both the agricultural and construction sectors. The results of the systematic review show that the sustainability assessment of natural fibres in the construction sector is widely addressed in the literature and aligns with European objectives.

Several limitations affect the potential attainment of specific Agenda 2030 goals, and these can be addressed by revising the research questions that support the study. The first concerns the application of environmental, social and economic sustainability assessment methods. Although the three dimensions of sustainability are priorities in national and international policies, there is often no effective alignment with metrics and regulatory instruments. Moreover, most studies focus primarily on the environmental dimension, while only a subset integrates economic analysis, and even fewer consider the social dimension (Martínez and Miller, 2025).

A second limitation concerns the limited consideration of sourcing issues for natural fibres and their end-of-life. The LCA studies examined are predominantly 'cradle to gate' and do not cover all life cycle stages, in particular those relating to plant cultivation and material disposal, which are in fact relevant to biogenic materials in relation to carbon dioxide uptake, transport emissions and the subsequent release of CO_2 and other substances embedded in the fibres.

From the overall analysis, however, three main elements emerge that highlight how the application of life-cycle methodologies can promote the development of circular production processes between the agricultural and construction sectors.

Firstly, the interest of the scientific community is increasingly focusing on the utilisation of rice husks (18%) and corn residues (8%) – among the most widespread crops in Italy and globally – together with hemp (12%), bamboo (4%), and other natural fibres for applications in the construction sector. This trend reflects a growing synergy between the agriculture and architecture sectors, with potential benefits for local agricultural supply chains and development prospects within Europe, in line with the objectives of the PNRR MICS (Made in Italy Circular and Sustainable) project.

Secondly, the use of natural fibres in construction, particularly in cement-based products and thermal acoustic insulation materials, plays a strategic role in achieving European decarbonisation and sustainability targets (Mouton, Allacker and Röck, 2023). This approach is reflected in several key elements, including: a reduction in the disposal of agricultural waste, which is often burned or left in the field; a decrease in environmental impacts during the production of construction materials and, consequently, in the demand for virgin raw materials; a reduction in greenhouse gas emissions during the use phase of buildings through improved thermal insulation of the envelope; and, finally, the possibility of storing CO_2 in buildings for extended periods of time, 30 to 50 years, through the use of construction materials of biogenic origin.

Finally, the integration of complex assessment methods (Sposito and De Giovanni 2023) and the correlation between life cycle sustainability indica-

tors and the Sustainable Development Goals (Backes and Traverso, 2022) is particularly relevant for environmental impact indicators, in close synergy with Goals 6, 7, 12 and 13, and for social impact indicators with strong connections to 14 out of 17 Goals. The research highlights tangible benefits in reducing environmental impact and valorising local resources, including economic and financial aspects, but also potential trade-offs – for example, between Goal 8 (Economic growth) and Goal 13 (Climate action).

Implementing integrated studies within a Life Cycle Thinking perspective, including LCA, LCC, S-LCA and LCSA, could contribute to achieving the targets of Agenda 2030 by enabling the quantification and measurement of the sustainability of a material, a process or a whole building. In conclusion, the scientific community is encouraged to promote and support interdisciplinary approaches, to share open databases, and to validate standard metrics and regulatory instruments for the integrated assessment of the sustainability of biogenic or bio-based materials. These actions are essential to consolidate a shared language across disciplines and to accelerate the transition towards circular and sustainable production systems, in which the waste of one value chain can acquire environmental, economic and social value for others.

Acknowledgements

The contribution is the result of a joint reflection by the authors. Nonetheless, the data collection and analysis phases were carried out by A. Masoero and F. Thiébat; the phases of preparation, methodology definition, analysis, and critical re-elaboration of the systematic review are attributable to F. Thiébat, A. Masoero, F. Morselli, C. Senatore and M. A. Muñoz Veloza. Validation of the results and supervision of the study are the responsibility of E. Fregonara, R. Giordano, and F. Thiébat. All the Authors have read and approved the final version of the manuscript.

The study was conducted within the framework of the MICS (lit. Made in Italy Circolare e Sostenibile) Extended Partnership funded by the European Union, NextGeneration EU, National Recovery and Resilience Plan, PNRR, Mission 4, Component 2, Investment 1.3, D.D. 1551.11-10-2022, PE00000004. The views and opinions expressed are solely those of the Authors and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Commission. Neither the European Union nor the European Commission can be held responsible for them. For the co-Author F. Morselli, this publication was produced within the PNRR NGEU project funded by the Italian Ministry of Universities and Research through Ministerial Decree 118/2023.

References

Alderkamp, L. M., Klootwijk, C. W., Schut, A. G. T., van der Linden, A., van Middelaar, C. E. and Taube, F. (2025), "Integrating crop and dairy production systems – Exploring different strategies to achieve environmental targets", in *Science of The Total Environment*, vol. 958, article 177990, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177990 [Accessed 30 September 2025].

Araujo, A., da Silva, N., Sá, T., Caldas, L. and Toledo Filho, R. (2022), "Potential of Earth-Based Bamboo Bio-Concrete in the Search for Circular and Net-Zero Carbon Solutions to Construction Industry", in *IOP Conference Series | Earth and Environmental Science*, vol. 1122, issue 1, article 012043, pp. 1-9. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1755-1315/1122/1/012043 [Accessed 30 September 2025].

Arias, A., Torres, E., García-Zamora, J. L., Pacheco-Aguirre, F. M., Feijoo, G. and Moreira, M. T. (2024), "Environmental prospective of valorizing corn processing effluent to produce ferulic acid grafted chitosan polymer", in *Journal of Environmental Management*, vol. 360, article 121210, pp. 1-8. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121210 [Accessed 30 September 2025].

Aversa, P., Daniotti, B., Dotelli, G., Marzo, A., Tripepi, C., Sabbadini, S., Lauriola, P. and Luprano, V. A. M. (2019), "Thermo-hygrometric behavior of hempcrete walls for sustainable building construction in the Mediterranean area", in *IOP Conference Series | Earth and Environmental Science*, vol. 296, issue 1, article 012020, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1755-1315/296/1/012020 [Accessed 30 September 2025].

Babenko, M., Klitou, T., Klumbyte, E. and Fokaides, P. A. (2025), "Environmental assessment of mycelium based straw insulation composite – A sustainability analysis at building material level", in *Case Studies in Construction Materials*, vol. 22, article e04572, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04572 [Accessed 30 September 2025].

Backes, J. G. and Traverso, M. (2022), "Life cycle sustainability assessment as a metrics towards SDGs Agenda 2030", in *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, vol. 38, article 100683, pp. 1-7. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100683 [Accessed 30 September 2025].

Bartocci, P., Zampilli, M., Liberti, F., Pistolesi, V., Massoli, S., Bidini, G. and Fantozzi, F. (2020), "LCA analysis of food waste co-digestion", in *Science of The Total Environment*, vol. 709, article 136187, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136187 [Accessed 30 September 2025].

Belaud, J.-P., Prioux, N., Vialle, C. and Sablayrolles, C. (2019), "Big data for agri-food 4.0 – Application to sustainability management for by-products supply chain", in *Computers in Industry*, vol. 111, pp. 41-50. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.compind.2019.06.006 [Accessed 30 September 2025].

Belmonte-Ureña, L. J., Plaza-Úbeda, J. A., Vazquez-Brust, D. and Yakovleva, N. (2021), "Circular economy, degrowth and green growth as pathways for research on sustainable development goals – A global analysis and future agenda", in *Ecological Economics*, vol. 185, article 107050, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107050 [Accessed 30 September 2025].

Bocken, N. M. P., de Pauw, I., Bakker, C. and van der Grinten, B. (2016), "Product design and business models strategies for a circular economy", in *Journal of Industrial and Production Engineering*, vol. 33, issue 5, pp. 308-320. [Online] Available at: doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124 [Accessed 30 September 2025].

Bošković, I. and Radivojević, A. (2023), "Life cycle greenhouse gas emissions of hemp-lime concrete wall constructions in Serbia – The impact of carbon sequestration, transport, waste production and end of life biogenic carbon emission", in *Journal of Building Engineering*, vol. 66, article 105908, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105908 [Accessed 30 September 2025].

McDonough, W. and Braungart, M. (2002), *Cradle to Cradle – Remarking the Way We Make Things,* North Point Press, New York.

Buratti, C., Belloni, E., Lascaro, E., Merli, F. and Ricciardi, P. (2018), "Rice husk panels for building applications – Thermal, acoustic and environmental characterization and comparison with other innovative recycled waste materials", in *Construction and Building Materials*, vol. 171, pp. 338-349. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.089 [Accessed 30 September 2025].

Caldeira, C., Farcal, F., Moretti, C., Mancini, L., Rauscher, H., Rasmussen, K., Riego Sintes, J. and Sala, S. (2022), *Safe and Sustainable by Design chemicals and materials – Review of safety and sustainability dimensions, aspects, methods, indicators, and tools*, EUR 30991 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, JRC127109. [Online] Available at: publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC127109 [Accessed 15 October 2025].

Carcassi, O. B., Habert, G., Malighetti, L. E. and Pittau, F. (2022), "Material diets for climate-neutral construction", in *Environmental Science and Technology*, vol. 56, issue 8, pp. 5213-5223. [Online] Available at: doi.org/10.1021/acs.est.1c05895 [Accessed 30 September 2025].

Chen, X., Chen, F., Yang, Q., Gong, W., Wang, J., Li, Y. and Wang, G. (2023), "An environmental food packaging material part I – A case study of Life-Cycle Assessment (LCA) for bamboo fiber environmental tableware", in *Industrial Crops and Products*, vol. 194, article 116279, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116279 [Accessed 30 September 2025].

Chipade, A. M., Vispute, P. P., Sonawane, S. K., Sasane, N. B., Jadhav, M. and Nerlekar, T. (2025), "Construction Materials for Sustainable Environment in Residential Buildings", in *Journal of Mines, Metals and Fuels*, vol. 73, issue 1, pp. 173-188. [Online] Available at: doi.org/10.18311/JMMF/2025/46248 [Accessed 30 September 2025].

Circle Economy (2025), *Circularity Gap Report 2025 – A circular economy to live within the safe limits of the planet*. [Online] Available at: circularity-gap.world/2025 [Accessed 30 September 2025].

Cortés-Peña, Y., Kumar, D., Singh, V. and Guest, J. S. (2020), "BioSTEAM – A Fast and Flexible Platform for the Design, Simulation, and Techno-Economic Analysis of Biorefineries under Uncertainty", in *ACS | Sustainable Chemistry and Engineering*, vol. 8, issue 8, pp. 3308-3310. [Online] Available at: doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b07040 [Accessed 30 September 2025].

Cosentino, L., Fernandes, J. and Mateus, R. (2024), "Fast-Growing Bio-Based Construction Materials as an Approach to Accelerate United Nations Sustainable Development Goals", in *Applied Sciences*, vol. 14, issue 11, article 4850, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.3390/app14114850 [Accessed 30 September 2025].

Cucchiella, F., Rotilio, M., Barile, G., De Berardinis, P., Leoni, A., Ragnoli, M., Scarsella, M. and Stornelli, V. (2024), "Renovation wave – A bioeconomy panel produced with waste", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 467, article 142868, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142868 [Accessed 30 September 2025].

Dace, E., Cascavilla, A., Bianchi, M., Chioatto, E., Zecca, E., Ladu, L. and Yilan, G. (2024), "Barriers to transitioning to a circular bio-based economy – Findings from an industrial perspective", in *Sustainable Production and Consumption*, vol. 48, pp. 407-418. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.spc.2024.05.029 [Accessed 30 September 2025].

Dotelli, G., Moletti, C., Aversa, P., Sabbadini, S., Marzo, A., Tripepi, C., Lauriola, P. and Luprano, V. A. M. (2020), "Hempcrete buildings – Environmental sustainability and durability of two case-studies in North and South Italy", in Serrat, C., Casas, J. R. and Gibert, V. (eds), *DBMC 2020 – XV International Conference on Durability of Building Materials and*

Components, Barcelona, Catalonia, October 20-23, 2020, Scipedia, pp. 1-8. [Online] Available at: doi.org/10.23967/dbmc.2020.213 [Accessed 30 September 2025].

EN 16575:2014, *Bio-based products – Vocabulary*. [Online] Available at: store.uni.com/en-16575-2014 [Accessed 15 October 2025].

Essaghouri, L., Mao, R. and Li, X. (2023), "Environmental benefits of using hempcrete walls in residential construction – An LCA-based comparative case study in Morocco", in *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 100, article 107085, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107085 [Accessed 30 September 2025].

European Commission (2023), "New European Bauhaus Academy to build skills for sustainable construction with innovative materials", in *ec.europa.eu*, 18/12/2023. [Online] Available at: ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_6593 [Accessed 30 September 2025].

European Commission (2021), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – New European Bauhaus – Beautiful, Sustainable, Together*, COM/2021/573 final. [Online] Available at: new-european-bauhaus.europa.eu/system/files/2021-09/COM(2021)_573_EN_ACT.pdf [Accessed 30 September 2025].

European Commission (2020), *Circular Economy Action Plan – International aspects*, Publications Office of the European Union, Luxembourg. [Online] Available at: data.europa.eu/doi/10.2779/085517 [Accessed 30 September 2025].

European Commission (2019), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – The European Green Deal*, document 52019DC0640, COM/2019/640 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52019DC0640 [Accessed 30 September 2025].

Fernando, S., Gunasekara, C., Law, D. W., Nasvi, M. C. M., Setunge, S. and Dissanayake, R. (2021), "Life cycle assessment and cost analysis of fly ash-rice husk ash blended alkali-activated concrete", in *Journal of Environmental Management*, vol. 295, article 113140, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113140 [Accessed 30 September 2025].

Ferrara, M. and Squatrito, A. (2022), "L'innovazione Design-driven dei materiali circolari a base biologica – Strategie e competenze per la progettazione | Design-driven innovation of bio-based circular materials – Design strategies and skills", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 11, pp. 288-299. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/11262022 [Accessed 30 September 2025].

Garas, G., Sayed, A. M. and Hana Bakhoum, E. S. H. (2021), "Application of nano waste particles in concrete for sustainable construction – A comparative study", in *International Journal of Sustainable Engineering*, vol. 14, issue 6, pp. 2041-2047. [Online] Available at: doi.org/10.1080/19397038.2021.1963004 [Accessed 30 September 2025].

García-Velásquez, C., Leduc, S. and van der Meer, Y. (2022), "Design of biobased supply chains on a life cycle basis – A bi-objective optimization model and a case study of biobased polyethylene terephthalate (PET)", in *Sustainable Production and Consumption*, vol. 30, pp. 706-719. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.spc.2022.01.003 [Accessed 30 September 2025].

Garkoti, P. and Thengane, S. K. (2025), "Techno-economic and life cycle assessment of circular economy-based biogas plants for managing organic waste", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 504, article 145412, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145412 [Accessed 30 September 2025].

Giordano, R. and Andreotti, J. (2023), "DEC50 – Strumenti per la decarbonizzazione dei manufatti edilizi | DEC50 – Building decarbonisation tools", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 26, pp. 207-216. [Online] Available at: doi.org/10.36253/techne-14435 [Accessed 30 September 2025].

Giuffrida, G., Dipasquale, L., Pulselli, R. M. and Caponetto, R. (2024), "Compared environmental lifecycle performances of earth-based walls to drive building envelope design", in *Sustainability*, vol. 16, issue 4, article 1367, pp. 1-22. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su16041367 [Accessed 30 September 2025].

Göswein, V., Arehart, J., Phan-Huy, C., Pomponi, F. and Habert, G. (2022), "Barriers and opportunities of fast-growing biobased material use in buildings", in *Buildings and Cities*, vol. 3, issue 1, pp. 745-755. [Online] Available at: doi.org/10.5334/bc.254 [Accessed 30 September 2025].

Gounni, A., Mabrouk, M. T., El Wazna, M., Kheiri, A., El Alami, M., El Bouari, A. and Cherkaoui, O. (2019), "Thermal and economic evaluation of new insulation materials for building envelope based on textile waste", in *Applied Thermal Engineering*, vol. 149, pp. 475-483. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.12.057 [Accessed 30 September 2025].

Gursel, A. P., Maryman, H. and Ostertag, C. (2016), "A life-cycle approach to environmental, mechanical, and durability properties of 'green' concrete mixes with rice husk ash", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, issue 1, pp. 823-836. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.029 [Accessed 30 September 2025].

Hartini, S., Azzahra, F., Purwaningsih, R., Ramadan, B. S. and Sari, D. P. (2023), "Framework for Increasing Eco-efficiency in the Tofu Production Process – Circular Economy Approach", in *Production Engineering Archives*, vol. 29, issue 4, pp. 452-460. [Online] Available at: doi.org/10.30657/pea.2023.29.50 [Accessed 30 September 2025].

ISO 15686-5:2017, *Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 5 – Life-Cycle Costing*. [Online] Available at: store.uni.com/en/iso-15686-5-2017 [Accessed 30 September 2025].

Isopescu, D. N., Adam, L., Nistorac, A. and Bodoga, A. (2024), "Carbon Footprint Assessment – Case Studies for Hemp-Based Eco-Concrete Masonry Blocks", in *Buildings*, vol. 14, issue 10, article 3150, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings14103150 [Accessed 30 September 2025].

Kayaçetin, N. C., Piccardo, C. and Versele, A. (2023), "Social Impact Assessment of Circular Construction: Case of Living Lab Ghent", in *Sustainability*, vol. 15, issue 1, article 721, pp.1-15. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su15010721 [Accessed 30 September 2025].

Keena, N., Raugei, M., Lokko, M.-L., Aly Etman, M., Achnani, V., Reck, B. K. and Dyson, A. (2022), "A Life-Cycle Approach to Investigate the Potential of Novel Biobased Construction Materials toward a Circular Built Environment", in *Energies*, vol. 15, issue 19, article 7239, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en15197239 [Accessed 30 September 2025].

Khan, N. W. and Ali, Y. (2019), "Sustainable construction – Lessons learned from life cycle assessment (LCA) and life cycle cost analysis (LCCA)", in *Construction Innovation – Information Process Management*, vol. 20, issue 2, pp. 191-207. [Online] Available at: doi.org/10.1108/CI-05-2019-0040 [Accessed 30 September 2025].

Komkova, A. and Habert, G. (2023), "Optimal supply chain networks for waste materials used in alkali-activated concrete fostering circular economy", in *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 193, article 106949, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106949 [Accessed 30 September 2025].

Kristianto, Y. and Zhu, L. (2017), "Techno-economic optimization of ethanol synthesis from rice-straw supply chains", in *Energy*, vol. 141, pp. 2164-2176. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.077 [Accessed 30 September 2025].

Le, D. L., Salomone, R., Nguyen, Q. T., Versele, A. and Piccardo, C. (2025), "Drivers for adopting circular bio-based building materials to facilitate a circular transition – A case of a developed economy", in *Journal of Environmental Planning and Management*, pp. 1-27. [Online] Available at: doi.org/10.1080/09640568.2025.2475448 [Accessed 30 September 2025].

Le, D. L., Salomone, R. and Nguyen, Q. T. (2024), "Sustainability assessment methods for circular bio-based building materials – A literature review", in *Journal of Environmental Management*, vol. 352, article 120137, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120137 [Accessed 15 October 2025].

Littell, J. H., Corcoran, J. and Pillai, V. (2008), *Systematic Reviews and Meta-Analysis – Pocket Guides to Social Work Research Methods*, Oxford University Press, New York. [Online] Available at: doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195326543.001.0001 [Accessed 30 September 2025].

Mancini, L., Valente, A., Barbero Vignola, G., Sanyé-Mengual, E. and Sala, S. (2023), "Social footprint of European food production and consumption", in *Sustainable Production and Consumption*, vol. 35, pp. 287-299. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.spc.2022.11.005 [Accessed 30 September 2025].

Martínez, A. and Miller, S. A. (2025), "Life cycle assessment and production cost of geopolymer concrete – A meta-analysis", in *Resources, Conservation & Recycling*, vol. 215, article 108018, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.108018 [Accessed 30 September 2025].

Mesa, J., Esparragoza, I. and Maury, H. (2018), "Developing a set of sustainability indicators for product families based on the circular economy model", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 196, pp. 1429-1442. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.131 [Accessed 30 September 2025].

Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G. and PRISMA Group (2009), "Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses – The PRISMA statement", in *PLOS Medicine Journal*, vol. 6, issue 7, article e1000097, pp. 1-6. [Online] Available at: doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097 [Accessed 15 October 2025].

Morpurgo, E. (2024), "Biomateriali e zone umide – Filiere per l'edilizia e il tessile dalla valorizzazione di ecosistemi locali | Biomaterials and wetlands – Supply chains for construction and textiles through the enhancement of local ecosystems", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 314-323. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16262024 [Accessed 30 September 2025].

Mouton, L., Allacker, K. and Röck, M. (2023), "Bio-based building material solutions for environmental benefits over conventional construction products – Life cycle assessment of regenerative design strategies (1/2)", in *Energy and Buildings*, vol. 282, article 112767, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112767 [Accessed 30 September 2025].

Ondova, M., Stevulova, N. and Meciarova, L. (2013), "The potential of higher share of fly ash as cement replacement in the concrete pavement", in *Procedia Engineering*, vol. 65, pp. 45-50. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.009 [Accessed 30 September 2025].

Onyelowe, K. C., Ebid, A. M., Mahdi, H. A., Soleymani, A., Jahangir, H. and Dabbaghi, F. (2022), "Optimization of Green Concrete Containing Fly Ash and Rice Husk Ash Based on Hydro-Mechanical Properties and Life Cycle Assessment Considerations", in *Civil Engineering Journal*, vol. 8, issue 12, pp. 3912-3938. [Online] Available at: doi.org/10.28991/CEJ-2022-08-12-018 [Accessed 30 September 2025].

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., McGuinnes, L. A., Stewart, L. A., Thomas, J., Tricco, A. C., Welch, V. A., Whiting, P. and Moher, D. (2021), "The PRISMA 2020 statement – An updated guideline for reporting systematic reviews", in *JCE | Journal of Clinical Epidemiology*, vol. 134, pp. 178-189. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclinepi.2021.03.001 [Accessed 30 September 2025].

Parvathy, S. U., Kolil, V. K., Raman, R., Vinuesa, R. and Achuthan, K. (2025), "Integrating sustainable development goals into life cycle thinking – A multidimensional approach for advancing sustainability", in *Environment, Development and Sustainability*, pp. 1-39. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s10668-024-05810-z [Accessed 30 September 2025].

Paul, S., Islam, M. S. and Elahi, T. E. (2023), "Potential of waste rice husk ash and cement in making compressed stabilized earth blocks – Strength, durability and life cycle assessment", in *Journal of Building Engineering*, vol. 73, article 106727, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106727 [Accessed 30 September 2025].

Pennacchio, R., Savio, L., Bosia, D., Thiébat, F., Piccablotto, G., Patrucco, A. and Fantucci, S. (2017), "Fitness – Sheep-

wool and Hemp Sustainable Insulation Panels", in *Energy Procedia*, vol. 111, pp. 287-297. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.030 [Accessed 30 September 2025].

Piccardo, C., Dodoo, A., Gustavsson, L. and Tettey, U. (2020), "Retrofitting with different building materials – Life-cycle primary energy implications", in *Energy*, vol. 192, article 116 648, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.energy.20 19.116648 [Accessed 30 September 2025].

Pinelli, D., Zanaroli, G., Rashed, A. A., Oertle, E., Wardenaar, T., Mancini, M., Vettore, D., Fiorentino, C., Frascari, D. (2020), "Comparative preliminary evaluation of 2 in-stream water treatment technologies for the agricultural reuse of drainage water in the Nile Delta", in *Integrated Environmental Assessment and Management*, vol. 16, issue 6, pp. 920-933. [Online] Available at: doi.org/10.1002/ieam.4277 [Accessed 30 September 2025].

Pittau, F., Giacomel, D., Iannaccone, G. and Malighetti, L. (2020), "Environmental consequences of refurbishment versus demolition and reconstruction – A comparative life cycle assessment of an Italian case study", in *Journal of Green Building*, vol. 15, issue 4, pp. 155-172. [Online] Available at: doi.org/10.3992/jgb.15.4.155 [Accessed 30 September 2025].

Quintana-Gallardo, A., Alba, J., del Rey, R., Crespo-Amorós, J. E. and Guillén-Guillamón, I. (2020), "Life-cycle assessment and acoustic simulation of drywall building partitions with bio-based materials", in *Polymers*, vol. 12, issue 9, article 1965, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.3390/polym12091965 [Accessed 30 September 2025].

Quintana-Gallardo, A., Romero Clausell, J., Guillén-Guillamón, I. and Mendiguchia, F. A. (2021), "Waste valorization of rice straw as a building material in Valencia and its implications for local and global ecosystems", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 318, article 128507, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128507 [Accessed 30 September 2025].

Ramos, A., Briga-Sá, A., Pereira, S., Correia, M., Pinto, J., Bentes, I. and Teixeira, C. A. (2021), "Thermal performance and life cycle assessment of corn cob particleboards", in *Journal of Building Engineering*, vol. 44, article 102998, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102998 [Accessed 30 September 2025].

Ricciardi, P., Belloni, E., Merli, F. and Buratti, C. (2021), "Sustainable panels made with industrial and agricultural waste – Thermal and environmental critical analysis of the experimental results", in *Applied Sciences*, vol. 11, issue 2, article 494, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.3390/app11020494 [Accessed 30 September 2025].

Rigillo, M., Galluccio, G. and Paragliola, F. (2023), "Digitale e circolarità in edilizia – Le KETs per la gestione degli scarti in UE | Digital and circularity in building – KETs for waste management in the European Union", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 247-258. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13212023 [Accessed 30 September 2025].

Safaripour, M., Hossain, K. G., Ulven, C. A. and Pourhashem, G. (2021), "Environmental impact tradeoff considerations for wheat bran-based biocomposite" in *Science of the Total Environment*, vol. 781, article 146588, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146588 [Accessed 30 September 2025].

Salzer, C., Wallbaum, H., Ostermeyer, Y. and Kono, J. (2017), "Environmental performance of social housing in emerging economies – Life cycle assessment of conventional and alternative construction methods in the Philippines", in *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 22, issue 11, pp. 1785-1801. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11367-017-1362-3 [Accessed 30 September 2025].

Schonhoff, A., Stöckigt, G., Wulf, C., Zappab, P. and Kuckshinrichs, W. (2023), "Biosurfactants' production with substrates from the sugar industry – Environmental, cost, market, and social aspects", in *RSC Sustainability*, vol. 1, pp. 1798-1813. [Online] Available at: doi.org/10.1039/d3su00122a [Accessed 30 September 2025].

Schroeder, P., Anggraeni, K. and Weber, U. (2019), "The Relevance of Circular Economy Practices to the Sustainable Development Goals", in *Journal of Industrial Ecology*, vol. 23, issue 1, pp.77-95. [Online] Available at: doi.org/10.1111/jiec.12732 [Accessed 30 September 2025].

Scrucca, F., Ingrao, C., Maalouf, C., Moussa, T., Polidori, G., Messineo, A., Arcidiacono, C. and Asdrubali, F. (2020), "Energy and carbon footprint assessment of production of hemp hurds for application in buildings", in *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 84, article 106417, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106417 [Accessed 30 September 2025].

Seyedabadi, M. R., Abolhassani, S. S. and Eicker, U. (2023), "District cradle to grave LCA including the development of a localized embodied carbon database and a detailed end-of-life carbon emission workflow", in *Journal of Building Engineering*, vol. 76, article 107101, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107101 [Accessed 30 September 2025].

Sheshadri, A., Marathe, S. and Sadowski, Ł. (2024), "Development of sustainable, high strength slag based alkali activated pavement quality concrete using agro-industrial wastes – Properties and life cycle analysis", in *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 25, issue 1, article 2410953, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.1080/10298436.2024.2410953 [Accessed 30 September 2025].

Sifuentes-Nieves, I., Molina-Cervantes, A., Flores-Silva, P. C., Garza-Santibañez, A., Saucedo-Salazar, E., Garcia-Hernandez, A. and Hernández-Hernández, H. (2023), "Structural performance and eco-efficiency assessment of biofilms obtained by a green single-step modification of starch and agave fibers", in *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 31, pp. 4829-4841. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s10924-023-02905-y [Accessed 30 September 2025].

Singh, J. and Ordoñez, I. (2016), "Resource recovery from post-consumer waste – Important lessons for the up-coming circular economy", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 134, part. A, pp. 342-353. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.020 [Accessed 30 September 2025].

Sinka, M., Zorica, J., Bajare, D., Sahmenko, G. and Korjakins, A. (2020), "Fast setting binders for application in 3D printing of bio-based building materials", in *Sustainability*, vol. 12, issue 21, article 8838, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su12218838 [Accessed 30 September 2025].

Soleimani, M. and Shahandashti, M. (2017), "Comparative process-based life-cycle assessment of bioconcrete and conventional concrete", in *Journal of Engineering, Design and Technology*, vol. 15, issue 5, pp. 667-688. [Online] Available at: doi.org/10.1108/JEDT-04-2017-0033 [Accessed 30 September 2025].

Sposito, C. and De Giovanni, G. (2023), "Affrontare la complessità – Integrare LCA, ERA ed ESA per valutare impatti e benefici antropici sulla biosfera | Dealing with complexity – Integrating LCA, ERA and ESA to assess human impacts and benefits on the biosphere", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 12-39. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1412023 [Accessed 30 September 2025].

Sposito, C. and Scalisi (2023), "Riflessioni e traiettorie di ricerca interdisciplinari sulla transizione ecologica | Reflections and trajectories for interdisciplinary research on the ecological transition", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 3-18. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1302023 [Accessed 30 September 2025].

Sprenger, J.-M., Albrecht, K., Minkov, N., Finkbeiner, M., Schönfeld, L., Meyer, K. V. and Müssig, J. (2025), "Stiffness and Strength-Related Sustainability Assessment of Natural Fibers for Injection Molded Composites", in *Journal of Natural Fibers*, vol. 22, issue 1, article 2531372, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.1080/15440478.2025.2531372 [Accessed 30 September 2025].

Thiébat, F. and Morselli, F. (2025), "Materiali biogenici per la decarbonizzazione dell'ambiente costurito | Biogenic materials for the decarbonisation of the built environment", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 29, issue 1, pp. 108-117. [Online] Available at: doi.org/10.36253/techne-16598 [Accessed 30 September 2025].

UN – United Nations (2015), *Transforming Our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development – A/RES/70/1*. [Online] Available at: sdgs.un.org/2030agenda [Accessed 30 September 2025].

UNEP – United Nations Environment Programme (2020), *Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products and Organizations*. [Online] Available at: lifecycleinitiative.org/library/guidelines-for-social-life-cycle-assessment-of-products-and-organisations-2020/ [Accessed 15 October 2025].

UNEP – United Nations Environment Programme and IRP – International Resource Panel (2024), *Bend the trend – Pathways to a liveable planet as resource use spikes – Global resource outlook 2024*. [Online] Available at: unep.org/resources/Global-Resource-Outlook-2024 [Accessed 15 October 2025].

UNEP – United Nations Environment Programme and SETAC – Society of Environmental Toxicology and Chemistry (2009), *Guidelines for social life cycle assessment of products*. [Online] Available at: unep.org/resources/report/guidelines-social-life-cycle-assessment-products [Accessed 15 October 2025].

UNI EN 16575:2014, *Bio-based products – Vocabulary*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-en-16575-2014 [Accessed 30 September 2025].

UNI EN 15978:2011, *Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-en-15978-2011 [Accessed 30 September 2025].

UNI EN 15804:2021, *Sustainability of construction works – Environmental Product Declarations – Core rules for the product category of construction products*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-en-15804-2021 [Accessed 30 September 2025].

UNI EN ISO 14044:2021, *Environmental management – Life Cycle Assessment – Requirements and guidelines*. [Online] Available at: store.uni.com/en/search/ALL/1/14044 [Accessed 30 September 2025].

UNI EN ISO 14040:2021, *Environmental management – Life Cycle Assessment – Principles and framework*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-en-iso-14040-2021 [Accessed 30 September 2025].

Vilaboa Díaz, A., López, A. F. and Bugallo, P. M. B. (2022), "Analysis of biowaste-based materials in the construction sector – Evaluation of thermal behaviour and life cycle assessment (LCA)", in *Waste and Biomass Valorization*, vol. 13, pp. 4983-5004. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s12649-022-01820-y [Accessed 30 September 2025].

Violano, A., Cannaviello, M. and Del Prete, S. (2021), "Materiali rigenerativi bio-based – Una proposta innovative per il packaging e i prodotti da costruzione | Bio-based circular materials – Innovative packaging and construction products", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 9, pp. 244-253. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/9242021 [Accessed 30 September 2025].

Yu, D., Tan, H. and Ruan, Y. (2011), "A future bamboo-structure residential building prototype in China – Life cycle assessment of energy use and carbon emissions", in *Energy and Buildings*, vol. 43, issue 10, pp. 2638-2646. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.013 [Accessed 30 September 2025].

Zabalza Bribián, I., Valero Capilla, A. and Aranda Usón, A. (2011), "Life cycle assessment of building materials – Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential", in *Building and Environment*, vol. 46, issue 5, pp. 1133-1140. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.002 [Accessed 30 September 2025].

Zhang, Y., Yan, D., Hu, S. and Guo, S. (2019), "Modelling of energy consumption and carbon emission from the building construction sector in China – A process-based LCA approach", in *Energy Policy*, vol. 134, article 110949, pp. 1-9. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enpol.2019.110949 [Accessed 30 September 2025].

Zumsteg, J. M., Cooper, J. S. and Noon, M. S. (2012), "Systematic review checklist – A standardized technique for assessing and reporting reviews of life cycle assessment data", in *Journal of Industrial Ecology*, vol. 16, issue s1, S12-S21. [Online] Available at: doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00476.x [Accessed 15 October 2025].