

ANALISI INPUT-OUTPUT PER LA LIFE CYCLE ASSESSMENT

*Mattia Rozzanigo, Dario Trabucco, Giovanni Perrucci
IUAV Venezia*

Abstract

La valutazione del ciclo di vita (in inglese Life Cycle Assessment – LCA) rappresenta il principale riferimento internazionale per la quantificazione degli impatti ambientali nel settore delle costruzioni, e si basa sull'analisi dell'intero ciclo di vita di interi edifici, singoli prodotti o servizi. In ambito europeo e italiano la sua applicazione avviene prevalentemente attraverso l'approccio convenzionale fondato sull'impiego di dati di processo derivanti da Dichiarazioni ambientali di prodotto (in inglese Environmental Product Declarations – EPD) e banche dati dedicate.

Nonostante la loro consolidata diffusione, effettuando un'analisi della letteratura è possibile dedurre che tale modello soffra di una sistematica sottostima degli impatti ambientali. Se da un lato, infatti, garantisce un'elevata accuratezza rappresentativa grazie alla specificità dei dati utilizzati, dall'altro risulta limitato in termini di completezza, a causa di una copertura parziale della catena produttiva che comporta l'esclusione di contributi emissivi indiretti, come ad esempio quelli associati ai servizi economico-amministrativi, alla produzione e manutenzione del capitale fisso e ai beni strumentali. Tali sottostime possono essere quantificate mediante approcci alternativi basati su dati macroeconomici, in particolare attraverso analisi input-output con estensioni ambientali (in inglese Environmentally Extended Input-Output Analysis – EEIO). Esse utilizzano tabelle input-output che, descrivendo i flussi intersettoriali all'interno di una completa economia nazionale, consentono di sviluppare modelli di LCA capaci di includere sia gli impatti diretti sia quelli indiretti, restituendo generalmente stime emissive superiori rispetto agli approcci di processo. Queste divergenze dei risultati si accentuano con gli approcci ibridi che combinano i vantaggi dei due modelli, integrando dettaglio e completezza sistemica. Tuttavia, l'affidabilità di tali metodologie dipende in mi-

sura rilevante dal livello di disaggregazione settoriale e qualità delle tabelle input-output disponibili. In particolare, nel contesto italiano, le tavole attualmente pubblicate presentano un livello di dettaglio limitato rispetto ad altri contesti internazionali in cui tali strumenti sono più ampiamente sviluppati e utilizzati nelle valutazioni ambientali.

Alla luce delle criticità evidenziate, il contributo propone la necessità di un'evoluzione delle tavole input-output italiane, orientata a renderle maggiormente idonee all'applicazione nell'ambito dell'LCA per il settore delle costruzioni. Tale sviluppo non implica un incremento generalizzato del livello di dettaglio dell'intero sistema economico, ma può essere perseguito attraverso una disaggregazione mirata dei settori riconducibili alla filiera delle costruzioni. Un intervento di questo tipo consentirebbe di supportare in modo più robusto l'applicazione degli approcci LCA basati sul modello EEIO, contribuendo ad accrescere l'affidabilità delle stime ambientali nel contesto nazionale e quantificare le attuali sottostime delle pratiche attualmente in uso. Questa esigenza assume ulteriore rilevanza in relazione al quadro normativo europeo, che prevede entro il 2030 l'introduzione, nei diversi Stati membri, dell'obbligo di calcolo del GWP lungo il ciclo di vita degli edifici di nuova costruzione.

La LCA nel settore delle costruzioni

La crescente sensibilità verso la tutela ambientale sta gradualmente rinnovando le pratiche umane, con l'obiettivo di allinearle a modelli maggiormente sostenibili ed eco-compatibili. Questa trasformazione interessa in modo diretto anche il settore delle costruzioni che, notoriamente caratterizzato da un elevato fabbisogno energetico, impiego di risorse e rilevanti emissioni climateranti, è sempre più coinvolto nei processi di transizione verso la neutralità climatica. La gestione delle

prestazioni ambientali di materiali, prodotti e processi edilizi ricopre quindi un ruolo centrale per la gestione degli impatti ambientali del comparto edilizio.

Per far fronte a tale necessità esistono numerosi strumenti di valutazione ambientale, ciascuno dei quali propone un differente approccio all'individuazione di strategie volte ad ottimizzare il profilo emissivo di prodotti, processi e servizi. Tra questi vi sono metodologie che si focalizzano sulla quantificazione dei carichi ambientali associati a specifiche fasi produttive o determinati indicatori ambientali. Con l'applicazione di questi metodi valutativi però l'analisi si concentra su pochi aspetti isolati, risultando in una rappresentazione parziale incapace di cogliere la natura sistemica e interconnessa dei processi dell'industria delle costruzioni. Tale criticità può condurre a fenomeni di semplice redistribuzione dei carichi ambientali tra differenti fasi del ciclo produttivo o categorie di impatto, senza determinare un effettivo efficientamento delle prestazioni ambientali complessive ma una trasposizione della problematica [1].

Dalla consapevolezza che analisi troppo mirate – e limitate – non abbiano la capacità di cogliere la complessità delle interazioni ambientali lungo l'intero sistema

di prodotto, emerge l'esigenza di adottare approcci in grado di restituire una valutazione integrata dell'intero ciclo di vita. In tale prospettiva si colloca il Life Cycle Thinking (LCT), un paradigma interpretativo che consente di leggere gli impatti ambientali secondo una logica sistemica, estesa all'intera sequenza di fasi che caratterizzano uno specifico ciclo di vita [2]. L'approccio LCT non si limita quindi alla misurazione di singoli carichi ambientali, ma orienta l'analisi verso l'individuazione di strategie capaci di ridurre gli impatti complessivi e migliorare l'efficienza nell'uso delle risorse lungo tutto il ciclo di vita.

La traduzione metodologica più consolidata di tale impostazione è rappresentata dalla Life Cycle Assessment, un approccio olistico che considera l'onere ambientale attraverso tutte le fasi di vita di un prodotto e processo: dall'estrazione delle risorse, attraverso le fasi di produzione, utilizzo e riciclo, fino allo smaltimento dei rifiuti residui. Largamente impiegata in Europa, risulta infatti già integrata nelle pratiche progettuali di alcuni Paesi quali Francia, Danimarca e Finlandia, e sarà presto resa obbligatoria in tutti gli Stati membri per le nuove edifi

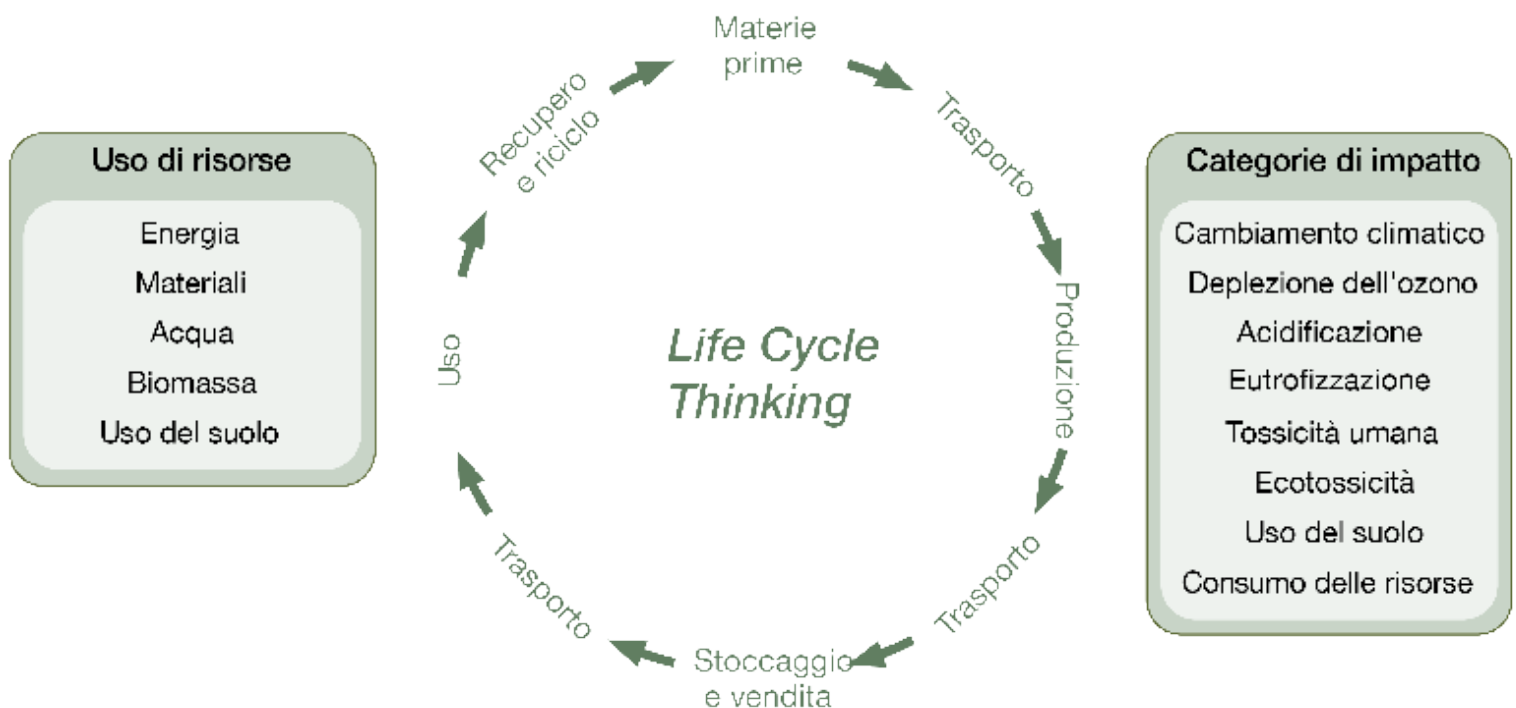


Fig.1 - Schematizzazione dell'approccio Life Cycle Thinking (LCT), orientato alla valutazione sistemica dei flussi di risorse e delle categorie di impatto ambientale lungo l'intero ciclo di vita di prodotti e processi, dalla fase di estrazione delle materie prime fino al recupero e riciclo finale.

cazioni dal 2030, come definito dalla direttiva europea Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) [3]. La sua integrazione interessa il settore delle costruzioni, in diversi ambiti di applicazione articolati su diverse scale di analisi. A livello di edificio essa può supportare valutazioni comparative tra materiali, componenti e sistemi costruttivi, orientando le scelte progettuali e tecnologiche attraverso indicatori quantitativi coerenti con gli obiettivi di sostenibilità. In modo complementare, la medesima impostazione metodologica può essere estesa alla fase produttiva, contribuendo a indirizzare i processi decisionali, sia aziendali che territoriali, verso una gestione preventiva e più consapevole degli impatti ambientali.

La LCA convenzionale basata su dati di processo

La LCA convenzionale rappresenta l'approccio di analisi del ciclo di vita maggiormente impiegato nel settore delle costruzioni capace di garantire un elevato livello di accuratezza rappresentativa del sistema studiato. La

metodologia si sviluppa secondo una struttura standardizzata articolata in quattro fasi operative: definizione degli obiettivi e del campo di applicazione, analisi dell'inventario, valutazione degli impatti e interpretazione dei risultati. Attraverso tali attività vengono raccolti ed elaborati i dati relativi ai flussi di materia, energia e risorse, che caratterizzano il ciclo di vita del sistema oggetto di valutazione, al fine di analizzarne le prestazioni ambientali alla luce degli obiettivi inizialmente definiti. Seguendo l'articolazione progressiva dei processi, dalle fasi di approvvigionamento agli scenari di fine vita, il modello mira a ricostruire in modo sistemico l'insieme delle interazioni e degli scambi che definiscono la catena produttiva. La modellazione delle interazioni che concorrono alla fabbricazione di un dato bene richiede quindi un'approfondita conoscenza delle dinamiche produttive ed operative. La mappatura di un'attività del settore edile tramite una LCA convenzionale risulta pertanto particolarmente complessa a causa dell'elevata stratificazione e articolazione della filiera produttiva. La

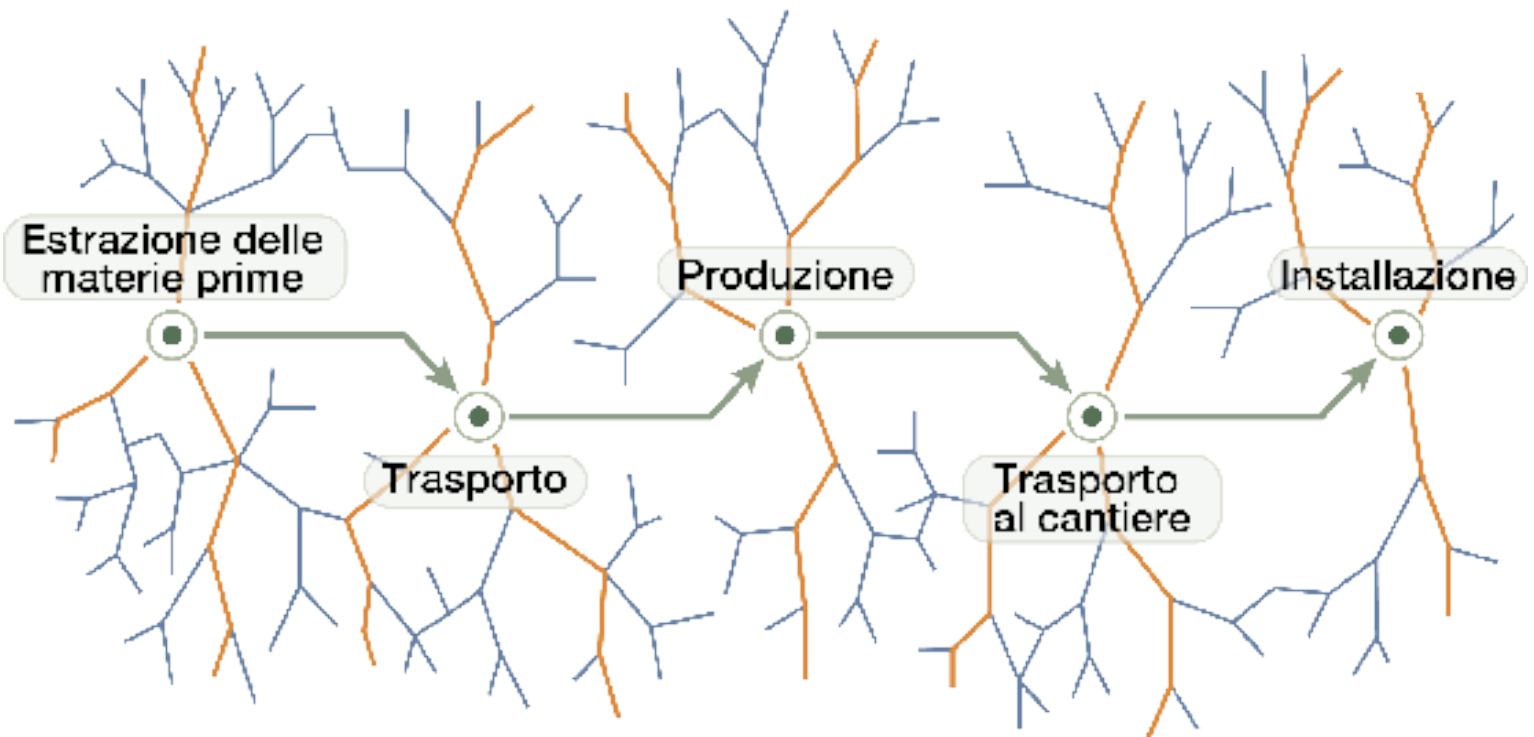


Fig.2 - Schematizzazione della copertura della LCA di processo applicata alla catena produttiva di un prodotto edile: l'analisi considera prevalentemente una parte dei flussi diretti (in arancione), mentre esclude quasi la totalità dei flussi indiretti (in blu) determinando una sottostima delle emissioni climalteranti complessive.

presenza di numerosi processi interconnessi, catene di approvvigionamento estese, molteplici attori coinvolti e di schemi di riciclo a ciclo aperto, rende particolarmente complessa la raccolta di dati completi e rappresentativi. Va inoltre evidenziato che per raggiungere un adeguato livello di rappresentatività è richiesta un'ingente mole di dati altamente specifici e granulari capaci di rappresentare accuratamente un determinato processo. Tale attività richiede infatti la raccolta di dati, che possono derivare da misurazioni dirette, rilevazioni presso i fornitori, database di settore o altre tipologie di risorse informative quali per esempio le EPD. La disponibilità di dati come database di settore o eco-etichette può notevolmente agevolare la fase di compilazione dell'inventario riducendone la complessità e le tempistiche di analisi. Tuttavia, va osservato che questo genere di dati sono spesso frutto dell'aggregazione di più dataset di specifici prodotti, risultando quindi eccessivamente approssimativi in alcune circostanze e richiedendo quindi di verificare il raggiungimento di un adeguato livello di accuratezza. Inoltre, nonostante la recente estesa diffusione delle EPD, la loro disponibilità rimane spesso circoscritta a specifiche tipologie di prodotto e a contesti geografici limitati, con conseguenti difficoltà di applicazione in ambiti locali differenti [4].

Pur essendo teoricamente possibile estendere i confini dell'analisi fino ad includere l'intera rete di interazioni che caratterizza una filiera produttiva, la compilazione dell'inventario rappresenta uno dei principali limiti operativi della LCA convenzionale. A causa dell'elevata onerosità richiesta in termini di tempo, risorse e disponibilità dei dati processuali, l'ampliamento dei confini sistemici comporta un incremento significativo della quantità delle informazioni necessarie, rendendo progressivamente più complessa la raccolta, la verifica e l'elaborazione di dati completi, coerenti e rappresentativi dei processi analizzati. Per far fronte a questa limitazione metodologica la scelta comunemente più adottata consiste nel limitare il sistema valutato principalmente alle fasi, ai beni e ai servizi coinvolti direttamente nella produzione di un prodotto. Per quanto l'omissione di processi e flussi sia prevista dagli standard di riferimento, l'esclusione dei contributi indiretti, quali le attività di approvvigionamento a supporto della produzione principale, può generare errori di troncamento [5]. Una considerazione circoscritta alle sole attività strettamente coinvolte tralascia infatti una quota rilevante dei carichi ambientali incorporati nelle relazioni intersettoriali

indirette che si propagano lungo l'intera economia. Nel settore delle costruzioni, tali contributi possono riguardare, ad esempio, gli impatti associati alla fabbricazione e manutenzione dei beni capitali necessari ai processi produttivi e di cantiere, come macchinari, impianti e attrezzature, ma anche quelli connessi ai servizi professionali, tecnici e amministrativi che supportano la progettazione, la gestione e il coordinamento delle attività edilizie. A questi si aggiungono i carichi derivanti da livelli più remoti della filiera, quali la produzione a monte di semilavorati, componenti intermedi e materie prime secondarie. L'esito dell'approccio di processo è quindi quello di una riduzione delle emissioni climalteranti che possono influenzare in modo significativo la completezza dei risultati conseguendo in sottostime, quantificabili attraverso approcci di LCA alternativi tra il 20% e il 50% [6].

Approcci alternativi di LCA:

il modello input-output e i modelli ibridi

In risposta alle criticità della LCA di processo nel corso degli ultimi decenni sono stati sperimentati diversi approcci alternativi che approfondiscono metodologie differenti di raccolta ed elaborazione dei dati.

Tra questi c'è la LCA basata sul modello input-output con estensioni ambientali (EEIO), metodologia proposta verso l'inizio degli anni Settanta da Wassily Leontief [7]. Questo metodo concentra la compilazione dell'inventario non più su dati fisici ricavati da misurazioni dirette o database di processo ma su dataset macroeconomici espressi dalle tavole IO pubblicate nei bilanci nazionali di ogni Paese. Queste tavole forniscono una rappresentazione complessiva dell'economia nazionale attraverso grandi matrici intersettoriali. Al loro interno, l'intera filiera produttiva viene disaggregata nei differenti rami di attività, quantificando per ciascuno di essi i flussi economici intersettoriali espressi in unità monetarie relative all'anno di riferimento considerato. È possibile quindi rintracciare tutte le relazioni che ogni tipologia di industria instaura con le altre al fine di produrre un determinato prodotto. Integrando questa tipologia di parametri con le misurazioni emissive annue di ogni settore è possibile calcolare i carichi ambientali associati a un prodotto, o servizio, comprensivi – contrariamente alla LCA convenzionale – sia dei flussi intersettoriali diretti che indiretti.

Tuttavia, per quanto fornisca un'elevata copertura sistemica della catena produttiva, traducibile in stime

emissive tendenzialmente maggiori rispetto all'approccio convenzionale, il modello EEIO risulta fortemente influenzato dalla qualità dei dati economici ed ambientali. La costruzione delle tavole IO risulta infatti estremamente eterogenea a livello globale.

Per esempio, le matrici input-output pubblicate dall'I-STAT hanno un livello di definizione settoriale altamente aggregato, semplificando l'economia nazionale italiana in sole 63 branche di attività, delle quali appena 10 riferite all'edilizia. Al contempo Paesi che invece usano attivamente il modello IO per scopi economico-ambientali producono tavole IO disaggregando il proprio comparto produttivo in molti più settori (114 per l'Australia) arrivando addirittura, nel caso statunitense e giapponese, alla definizione di oltre 400 industrie. Vista l'impossibilità di rappresentare un'economia regionale in modo pienamente fedele alla realtà, gli inventari IO sono vincolati

a strategie di semplificazione, tra cui l'assunzione che differenti gruppi di industrie, o prodotti, siano omogenei. L'aggregazione di molteplici attività comporta però inequivocabilmente una perdita di accuratezza rappresentativa dei risultati che, marcata in casistiche come quella italiana, può introdurre distorsioni rilevanti negli esiti della valutazione [8]. Questa procedura di accorpamento sistemico presuppone infatti l'ottenimento di intensità ambientali medie, poco rappresentative delle prestazioni ambientali di specifici prodotti, producendone una sovrastima nel caso in cui queste siano inferiori alla media e, viceversa, sottostime qualora siano maggiori.

Sebbene il modello input-output risulti quindi particolarmente efficace nel compensare i limiti di completezza propri della LCA di processo, esso presenta maggiori criticità nel garantire un adeguato livello di dettaglio

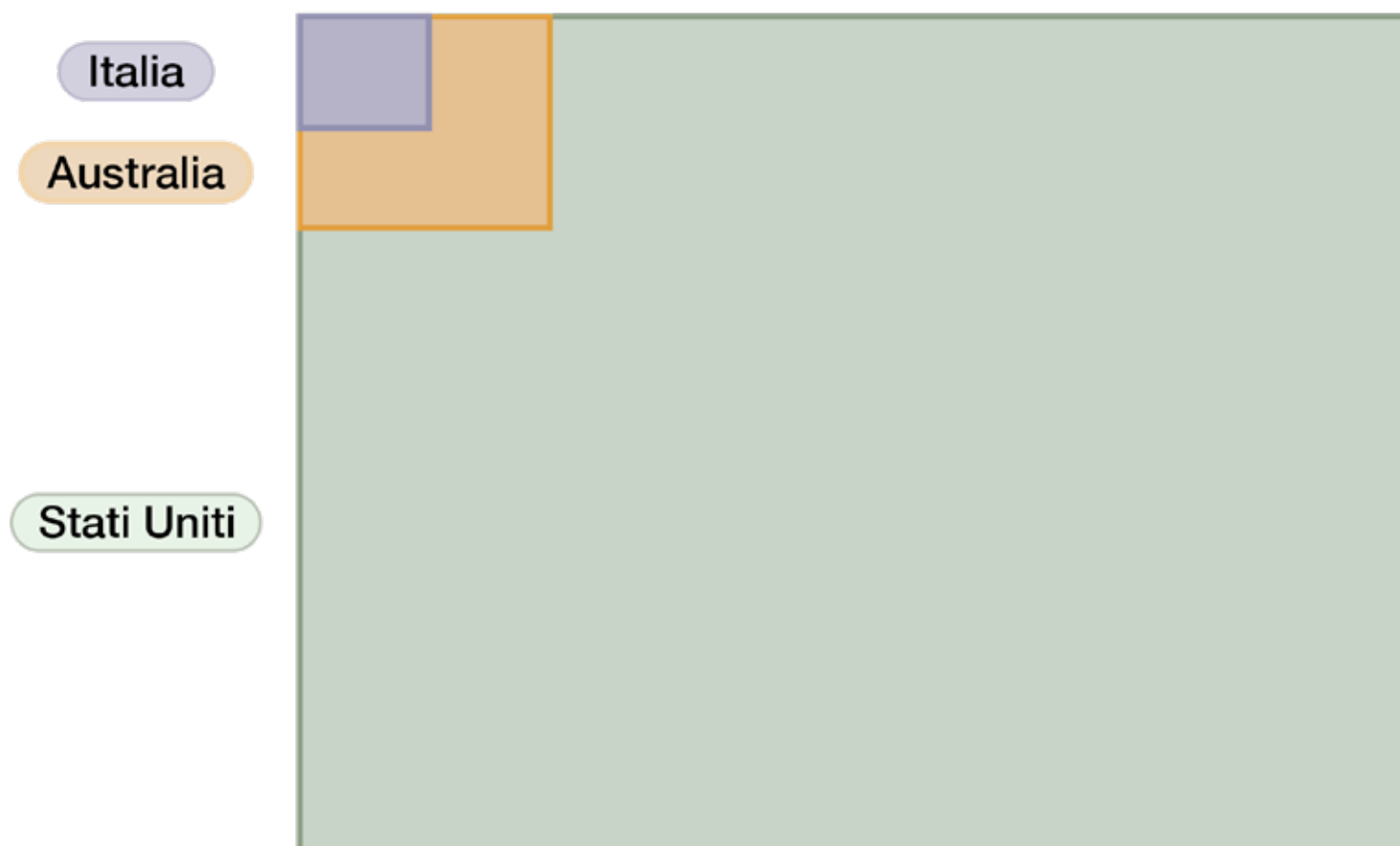


Fig.3 - Confronto tra diversi livelli di disaggregazione settoriale delle tavole IO: le tavole italiane, articolate in 63 industrie, presentano un livello di dettaglio significativamente inferiore rispetto a quelle australiane, suddivise in 114 branche di attività, e ancor più rispetto a quelle statunitensi, disaggregate in 405 settori.

representativo, che costituisce invece uno dei principali punti di forza della LCA convenzionale. Per risolvere questo nodo metodologico cruciale legato al bilanciamento tra accuratezza e completezza, negli ultimi anni sono stati sperimentati diversi modelli incentrati sulla reciproca integrazione tra dati di processo ed inventari economico-ambientali. Questi, definiti come modelli LCA ibridi, hanno quindi l'obiettivo di far convergere le due metodologie, convenzionale e IO, in un unico sistema capace di coniugare precisione e copertura estesa. Un'approfondita analisi della letteratura permette di evidenziare che le analisi del ciclo di vita basate su approcci ibridi presentano un elevato potenziale di miglioramento della qualità delle valutazioni ambientali [9]. Esse restituiscono sistematicamente, infatti, stime più elevate e complete rispetto agli altri due modelli, mostrando incrementi variabili tra il 5% e il 165% rispetto alla LCA di processo e tra il 9% e il 114% rispetto alla EEIO-LCA [10].

Per questo motivo è stata formalizzata la loro applicazione al settore delle costruzioni. Esempio ne è EPiC [11], database ibrido per i materiali da costruzione pub-

blicato dall'Università di Melbourne, attivamente impiegato nelle valutazioni ambientali australiane riferite all'edilizia.

I principali ostacoli che frenano la diffusione dei modelli ibridi sono legati principalmente a questioni operative e alla qualità dei dati necessari alla loro costruzione. L'integrazione delle due tipologie di inventari richiede elaborazioni complesse che possono richiedere ampi tempi di analisi e competenze altamente specialistiche. Nella gestione dei dataset di processo e input-output può dimostrarsi complicato definire i confini sistemici delle due componenti portando alla sovrapposizione dei contributi emissivi con conseguenti errori di doppio conteggio, che compromettono l'affidabilità dei risultati [12]. Basandosi in parte sulle tavole IO, i modelli ibridi rimangono inevitabilmente influenzati dal livello di definizione settoriale dei dati economici impiegati. Qualora tali matrici presentino un'eccessiva aggregazione merceologica, le intensità ambientali associate ai singoli comparti possono non rappresentare adeguatamente le specificità tecnologiche e produttive dei processi analizzati, comportando una possibile perdita di accuratezza e un maggior carico operativo richiesto per l'elaborazione [13].

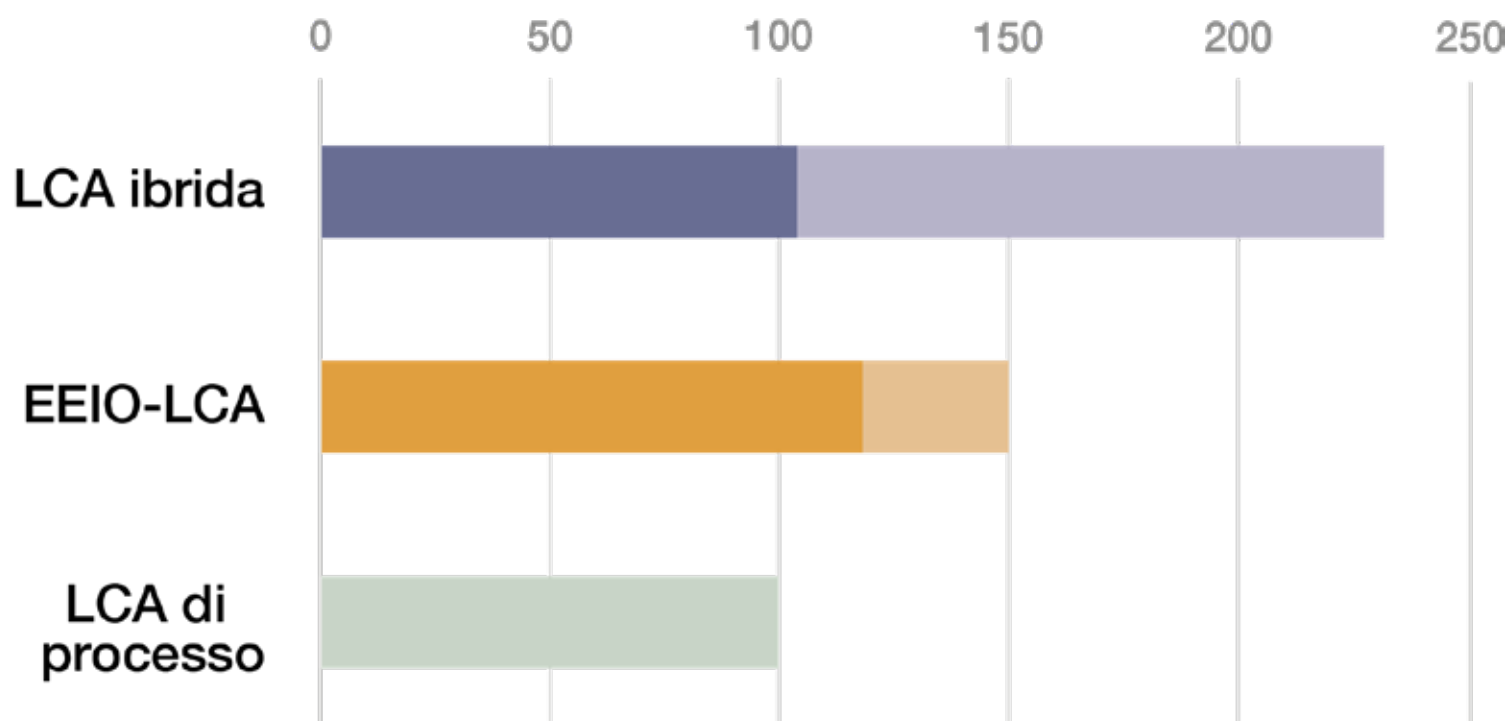


Fig.4 - Diagramma comparativo delle stime emissive ottenute mediante differenti approcci di LCA: la LCA di processo restituisce le stime più contenute, mentre la EEIO-LCA evidenzia valori superiori compresi tra il 20% e il 50% rispetto all'approccio convenzionale. Le stime più elevate sono associate alla Hybrid LCA, che può produrre valori superiori dal 5% fino al 165% rispetto al modello di processo.

Conclusioni

La scelta del modello di LCA da adottare esercita una forte influenza sugli esiti delle valutazioni ambientali, poiché ciascun approccio presenta specifici punti di forza e limiti applicativi. Ne consegue la necessità di individuare preliminarmente il modello che meglio si presta a soddisfare gli obiettivi fissati nell'analisi, in funzione dell'ambito di applicazione e delle risorse disponibili.

Sebbene benefici di una maggiore disponibilità di dataset specifici e di un più consolidato impiego operativo, l'LCA convenzionale presenta limiti metodologici legati alla completezza dei risultati. Al contrario, la EEIO-LCA consente una più ampia copertura sistemica, poiché intercetta le relazioni economiche tra settori, ma risulta spesso penalizzata da una minore accuratezza, dovuta alla limitata disponibilità di tavole IO sufficientemente disaggregate. In questo quadro i modelli ibridi rappresentano una soluzione metodologicamente promettente ma, tuttavia, la loro applicazione rimane fortemente condizionata dalla qualità, dalla granularità e dalla coerenza del tessuto informativo necessario alla loro costruzione.

Emerge quindi uno scarto significativo tra lo sviluppo teorico-metodologico degli approcci più avanzati e l'effettiva disponibilità di dati adeguati alla loro applicazione operativa. Per favorire il progresso delle valutazioni ambientali nel settore delle costruzioni, risulta pertanto necessario rafforzare la base informativa dei modelli input-output, intervenendo in particolare sul livello di disaggregazione e rappresentatività delle tavole IO. Nel caso italiano l'attuale rappresentazione del comparto delle costruzioni, articolato in un numero ridotto di branche di attività, costituisce un vincolo rilevante alla diffusione di approcci LCA più completi, inclusi quelli ibridi. Una classificazione settoriale eccessivamente aggregata riduce difatti la capacità del modello IO di distinguere le specificità dei materiali, dei processi e dei servizi che compongono la filiera, compromettendo la precisione delle stime ambientali indirette. Un possibile sviluppo futuro potrebbe quindi non necessariamente tradursi in una scomposizione generalizzata dell'intero sistema economico nazionale, ma consistere in una disaggregazione mirata delle branche maggiormente connesse al settore delle costruzioni, così da rendere il modello IO più idoneo all'integrazione nelle pratiche di valutazione ambientale nazionali.

Un simile avanzamento costituirebbe una condizione preliminare per la costruzione di modelli ibridi applicabili al contesto italiano, consentendo di quantificare con maggiore completezza le emissioni oggi non pienamente considerate nelle analisi basate su confini processuali convenzionali. Offrendo, infatti, una rappresentazione più solida degli impatti incorporati lungo la rete economica, i modelli ibridi rappresenterebbero una base

concreta per supportare decisioni più informate nella pianificazione ambientale del settore delle costruzioni.

Bibliografia

- [1] M. Lavagna. *Life Cycle Assessment in edilizia, Progettare e costruire in una prospettiva di sostenibilità ambientale*. Milano: Ulrico Hoepli Milano, 2008;
- [2] European Commission. *Making sustainable consumption and production a reality: A guide for business and policy makers to Life Cycle Thinking and Assessment*. Luxembourg: European Commission, Joint Research Centre, 2010;
- [3] European Parliament and Council of the European Union. *Directive (EU) 2024/1275 on the energy performance of buildings (recast)*. Official Journal of the European Union, Bruxelles 2024;
- [4] Alexander Passer, Sophie Lasvaux, Karen Allacker, Catherine De Wolf, Guillaume Habert e Matthieu Lotteau. «Environmental Product Declarations as Data Source for the Environmental Assessment of Buildings in the Context of Level(s) and DGNB: How Feasible Is Their Adoption?» In: *Sustainability* 13. 11 (2021), p. 6143
- [5] John Reap, Felipe Roman, Scott Duncan e Bert Bras. «A Survey of Unresolved Problems in Life Cycle Assessment: Part 1: Goal and Scope and Inventory Analysis». In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 13.4 (2008), pp. 290–300
- [6] Hauke Ward, Leonie Wenz, Jan C. Steckel e Jan C. Minx. «Truncation Error Estimates in Process Life Cycle Assessment Using Input-Output Analysis». In: *Journal of Industrial Ecology* 22.4 (2018), pp. 859–870
- [7] Wassily Leontief. «Environmental Repercussions and the Economic Structure: An Input-Output Approach». In: *The Review of Economics and Statistics* 52.3 (1970), pp. 262–271
- [8] Antti Säynäjoki, Jukka Heinonen, Juha-Matti Junnonen e Seppo Junnila. «Input-output and process LCAs in the building sector: are the results compatible with each other?» In: *Carbon Management* 8.2 (2017), pp. 155–166.
- [9] Robert H. Crawford, Paul-Antoine Bontinck, Andre Stephan, Thomas Wiedmann e Man Yu. «Hybrid life cycle inventory methods: A review». In: *Journal of Cleaner Production* 172 (2018), pp. 1273–1288
- [10] Guillaume Majeau-Bettez, Anders H. Strömman e Edgar G. Hertwich. «Hybrid life cycle assessment (H-LCA) for buildings and construction materials: A systematic review and meta-analysis». In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 123 (2020), p. 109736
- [11] Robert H. Crawford, André Stephan e Fabian Prideaux. «The EPIC database: Hybrid embodied environmental flow coefficients for construction materials». In: *Resources, Conservation and Recycling* 180 (2022), p. 106058
- [12] Sangwon Suh e Gjalit Huppes. «Methods for Life Cycle Inventory of a Product». In: *Journal of Cleaner Production* 13 (2005), pp. 687–697
- [13] Lise Mouton, Robert H. Crawford, Damien Trigaux e Karen Allacker. «Comparison of process-based and hybrid life cycle inventory data for environmental benchmarks of residential buildings». In: *Harmony in Architectural Science and Design: Sustaining the Future. Proceedings of the 57th International Conference of the Architectural Science Association 2024*. A cura di F. Zhang, R. Yu, C. Bischeri, T. Liu e M. Khoshbakht. Australia: The Architectural Science Association e Griffith University, 2024, pp. 500–507