

# RICICLO DI PANNELLI SOLARI E BATTERIE: NON SOLO UNA QUESTIONE AMBIENTALE

Elena Battiston<sup>1</sup>, Giulia Lovato<sup>1</sup>, Lisa Carlesso<sup>1</sup>, Anna Mazzi<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale, SAM.lab.

## Sommario

Le fonti energetiche rinnovabili si stanno affermando come energia del presente: l'impiego di risorse non soggette ad esaurimento riduce il ricorso a combustibili fossili. Produrre e utilizzare energia da fonti rinnovabili richiede lo sviluppo di nuove tecnologie, che spesso sono progettate senza pensare al loro fine vita; d'altra parte, nella logica dell'economia circolare e secondo l'approccio Life Cycle Thinking, pannelli fotovoltaici e batterie quando vengono dismessi costituiscono una rilevante criticità ambientale. Opportuni processi di riciclo permettono il recupero di materiali con vantaggi ambientali ed economici; tuttavia, per valutare in modo corretto la sostenibilità le varie opzioni di riciclo, dovrebbero essere adottati anche criteri di sicurezza e salubrità degli ambienti di lavoro. La ricerca condotta dal team SAM.lab dell'Università di Padova ha analizzato la letteratura più recente allo scopo di verificare l'attenzione data dalla comunità scientifica ad aspetti di salute e sicurezza per i processi di riciclo di tecnologie per la produzione di energia rinnovabile, in particolare pannelli fotovoltaici e batterie. I risultati dimostrano che la valutazione dei rischi per la salute e sicurezza dei lavoratori nei siti di raccolta e riciclo di queste tecnologie si sta affermando come tematica emergente. L'analisi di letteratura al contempo testimonia come gli impatti sociali dei processi di riciclo siano ancora poco esplorati, in particolare nei Paesi in cui la gestione del fine vita non viene presa in carico ed è prevalentemente trasferita ad altri. La ricerca evidenzia la necessità di integrare le valutazioni di impatto ambientale dei processi di riciclo con valutazioni di rischio per la salute e sicurezza dei lavoratori, così da promuovere l'innovazione circolare con soluzioni che evitino di trasferire il problema da una dimensione all'altra della sostenibilità e creare nuove criticità.

**Parole chiave:** *rifiuti, sostenibilità sociale, economia circolare, fine vita, salute e sicurezza sul lavoro.*

## RECYCLING OF SOLAR PANELS AND BATTERIES: NOT ONLY AN ENVIRONMENTAL ISSUE

### Abstract

Renewable energy sources are increasingly asserting themselves as the energy of the present: the use of energy deriving from sources that are not subject to depletion because they are naturally reintegrated reduces the consumption of fossil fuels which currently constitute the primary energy source. Producing and using energy from renewable sources requires the development of new technologies, which are often designed without thinking about their end-of-life. On the other hand, considering the circular economy approach, photovoltaic panels and batteries constitute a significant environmental problem at their end-of-life. With suitable recycling processes, it is possible to recover different types of precious materials from these technologies, with consequent environmental advantages and economic convenience. The convenience of using these technologies must be evaluated with a life cycle approach. A product as well as a technology cannot be called sustainable if the environmental, economic and social dimensions of sustainability are not investigated. The development of innovative processes for recycling cannot ignore assessments that have also to consider the social dimension of sustainability.

The research conducted by the SAM.lab team of the University of Padua aims to collect evidence from the international scientific community regarding the health and safety conditions of workers in disposal plants and in the recycling processes of photovoltaic panels and batteries. To achieve the objective, a structured analysis of the international scientific literature was performed to verify what is the interest regarding the assessment of the critical issues for occupational health and safety related to the recycling of photovoltaic panels and batteries. As part of the research, articles in English published in indexed journals

\* Per contatti: Via Marzolo 9, 35131, Padova. Tel. 0498271611.  
E-mail [anna.mazzi@unipd.it](mailto:anna.mazzi@unipd.it)

Ricevuto il 30-3-2023. Modifiche sostanziali richieste il 22-5-2023.  
Accettazione il 16-6-2023.

regarding sustainability assessments using a “life cycle” approach relating to the management of the end of life of photovoltaic panels, batteries and WEEE were included. The “Scopus” and “Web of Science” databases were used, carrying out surveys filtered through appropriately selected keywords, taking into consideration research articles and literature review articles that were published between 2019 and 2022.

The study led to the selection of 40 articles, relating to the assessment of the health and safety risks of the collection, selection and recycling processes of photovoltaic panels, batteries and WEEE using a life cycle approach. The results show that, in parallel with an exponential attention to the environmental problems associated with the management of the end of life of panels and batteries, the assessment of risks for the health and safety of workers in the collection

and recycling sites of these technologies is establishing itself as an emerging theme. At the same time, the literature analysis shows how the assessment of social sustainability of recycling processes is still little explored, particularly in countries where end-of-life management is not taken over and is mainly transferred to others. The research highlights the need to integrate environmental impact assessments of recycling processes with risk assessments for workers' health and safety, so as to promote circular innovation with solutions that avoid transferring the problem from one dimension to another of the sustainability and create new problems.

---

**Keyword:** *waste, social sustainability, circular economy, end of life, occupational health and safety.*

---

## 1. Introduzione

Le energie rinnovabili costituiscono la fonte energetica del futuro in quanto provengono da fonti non soggette ad esaurimento perché naturalmente reintegrate in una scala temporale umana (COM, 2021a). Le energie rinnovabili sono spesso dette “pulite” in quanto fonti alternative ai combustibili fossili, tra i principali responsabili di problemi ambientali come l'effetto serra, la produzione di polveri sottili, le piogge acide e l'inquinamento atmosferico. Al contrario, l'energia solare, eolica, geotermica, idroelettrica e delle biomasse presenta numerosi vantaggi, ovvero impatti evitati, riducendo l'effetto sul cambiamento climatico (IPCC, 2023).

La diffusione di tecnologie per la produzione e distribuzione di energia da fonti rinnovabili è oggi sostenuta anche da altri fattori, di tipo economico e politico. Il costo elevato di energia, acqua o materiali, i regolamenti esistenti, gli incentivi finanziari per innovazioni ambientali e la domanda di mercato sono le motivazioni principali che spingono i consumatori e le imprese verso buone pratiche ambientali all'interno di un settore (Zastempowski, 2023). In aggiunta, l'impiego diffuso di fonti rinnovabili limita i conflitti geopolitici e riduce la dipendenza energetica tra le nazioni. I sistemi di energia rinnovabile offrono la possibilità di un futuro energeticamente più democratico (Burke and Stephens, 2018).

In Europa l'impiego di fonti energetiche rinnovabili è in crescita esponenziale: se petrolio e gas naturale hanno continuato a essere le fonti di combustibile principali nel mix energetico dell'UE nel 2020, le fonti rinnovabili hanno ormai raggiunto e superato sia il carbone che il nucleare (Eurostat, 2022). Nel 2021 la quota del consumo finale lordo di energia da fonti rinnovabili in UE ha raggiunto il 21,8% (COM, 2022). La

produzione elettrica rinnovabile globale è raddoppiata nell'ultimo decennio e si stima possa arrivare a 12.000 TWh entro il 2026 (IEA, 2021). Il cambiamento verso l'impiego di fonti energetiche rinnovabili condiziona anche il tessuto economico locale e nazionale, introducendo nuove tecnologie e differenti processi di produzione. Appare chiaro quanto sia importante orientare l'economia verso una transizione energetica, senza diminuire l'attenzione agli impatti prodotti e ai nuovi rischi introdotti (COM, 2019; COM, 2021b).

Se si osservano queste nuove tecnologie con approccio circolare (Velenturf et al., 2021; Barros et al., 2021; Safarzyńska et al., 2023), è possibile affermare che pannelli fotovoltaici così come le batterie elettriche, verso cui si sono indirizzati rispettivamente il settore delle costruzioni e il mercato dell'automotive, presentano una serie di criticità a fine vita. Si prevede che il totale dei rifiuti fotovoltaici globali sarà di 43.000-250.000 tonnellate nel prossimo futuro con una domanda di riciclo di oltre 78 milioni di tonnellate entro il 2050 (Venkatachary et al., 2020). In accordo con la direttiva UE sulle batterie, anche l'efficienza del riciclo di batterie dovrebbe aumentare al 65% entro il 2025 (EPRS, 2022). Il riciclo di tali tecnologie permette di recuperare diverse materie prime critiche che oltre a non essere rinnovabili presentano una sfida per l'approvvigionamento (COM, 2020a; COM, 2023). Nel contesto globale, l'incremento della domanda di materie prime è dovuto alla crescita demografica, all'industrializzazione, alla decarbonizzazione dei trasporti, dei sistemi energetici e di altri settori industriali, alla crescente domanda dei paesi in via di sviluppo e alle nuove applicazioni tecnologiche. Considerato il potenziale riutilizzo dei materiali preziosi ricavati come materia prima seconda ne derivano anche vantaggi politici (COM, 2020b).

Nel panorama internazionale sono numerose le valutazioni ambientali relative alla gestione dei rifiuti (Andeobu et al., 2021). Le normative in molti Paesi, soprattutto in Europa, incentivano le aziende a considerare gli impatti associati al fine vita dei prodotti (UN General Assembly, 2015).

La metodologia Life Cycle Assessment (LCA) è ampiamente implementata per valutare i potenziali impatti ambientali in una prospettiva del ciclo di vita in tutti i settori. LCA e altre metodologie scientifiche che utilizzano l'approccio Life Cycle Thinking, ovvero osservano i prodotti e i sistemi con una visione estesa dell'intero ciclo di vita, sono particolarmente robuste in quanto riescono a valutare, ad esempio, gli impatti associati ad una soluzione tecnologica senza trascurare gli effetti che una innovazione può avere in altri momenti e in altri luoghi: si tratta di una visione *comprehensive* particolarmente importante nel caso di sviluppo di nuovi prodotti o nuovi processi, che consente di evitare il fenomeno del *burden shifting* (Mazzi, 2020).

Già da diversi anni, sono stati promossi studi di Life Cycle Assessment per la valutazione degli impatti ambientali di pannelli solari (Gerbinet et al., 2014; Ren et al., 2020) e batterie elettriche soprattutto applicate al settore dell'automotive (Middela et al., 2022; Raugel et al., 2019). Lo sviluppo di processi innovativi non può prescindere da valutazioni di sostenibilità che comprendano non solo la dimensione ambientale ed economica ma anche quella sociale (Kristensen et al., 2020; Torkayesh et al., 2022). Nella ricerca di alternative sostenibili per gestire la fine del ciclo di vita dei pannelli solari e delle batterie, dovrebbero essere condotte valutazioni che includono la sostenibilità sociale con attenzione alle condizioni di salute e sicurezza dei lavoratori. Infatti, i processi di riciclo rappresentano attività ad alto rischio per la salute umana, in particolare per i lavoratori.

La prospettiva sociale è difficile da quantificare (Rivela et al., 2022) anche perché riguarda la capacità di assicurare un'equa distribuzione delle condizioni di benessere umano che non è strettamente collegata a parametri di valutazione. La dimensione sociale può comprendere diversi indicatori e rifarsi a differenti metodi di indagine (Padilla-Rivera et al., 2021; Mies et al., 2021) ed è certamente un aspetto che sta assumendo sempre più importanza nelle valutazioni di sostenibilità, includendo aspetti come il miglioramento della qualità della vita, della salute e sicurezza e dei servizi per i cittadini (Huertas-Valdiva et al., 2020). Tra le metodologie di valutazione degli aspetti sociali della sostenibilità particolare importanza riveste la tecnica Social Life Cycle Assessment (S-LCA), che analogamente al modello per la valutazione ambientale Life Cycle Assessment (LCA), considera gli impatti associati

alle diverse fasi del ciclo vita di un prodotto e raccomanda di utilizzare indicatori di impatto per i lavoratori, la collettività, il contesto socio-economico e lo sviluppo locale (UNEP, 2022). Per la valutazione della sostenibilità sociale sono particolarmente efficaci le tecniche di Risk Assessment (RA) che quantificano i fattori di rischio associati alle condizioni di lavoro e ai siti produttivi (ISO 31010).

In generale, la comunità scientifica è concorde nel riconoscere la difficoltà nel misurare con tecniche oggettive la dimensione sociale della sostenibilità e sottolinea l'importanza di sperimentare metodologie robuste che consentano di tenere in giusta considerazione le criticità e le opportunità che le innovazioni comportano a livello sociale (Toniolo et al., 2019). L'urgenza di una valutazione consistente della sostenibilità sociale si manifesta anche nell'ambito dell'economia circolare e della transizione energetica.

Da queste premesse, emergono alcuni gap informativi su cui è opportuno concentrare l'attenzione per ottenere una valutazione davvero completa delle tecnologie energetiche emergenti:

- i) Qual è l'attenzione data dalla comunità scientifica alla componente sociale della sostenibilità per i processi di riciclo di tecnologie per la produzione di energia rinnovabile;
- ii) Quali sono i rischi per la salute e sicurezza sul lavoro (SSL) associati ad impianti e processi di riciclo di pannello fotovoltaici e batterie;
- iii) Quali sono le raccomandazioni derivanti dalla letteratura per minimizzare gli impatti sociali legati alla gestione del fine vita delle tecnologie di energia rinnovabile.

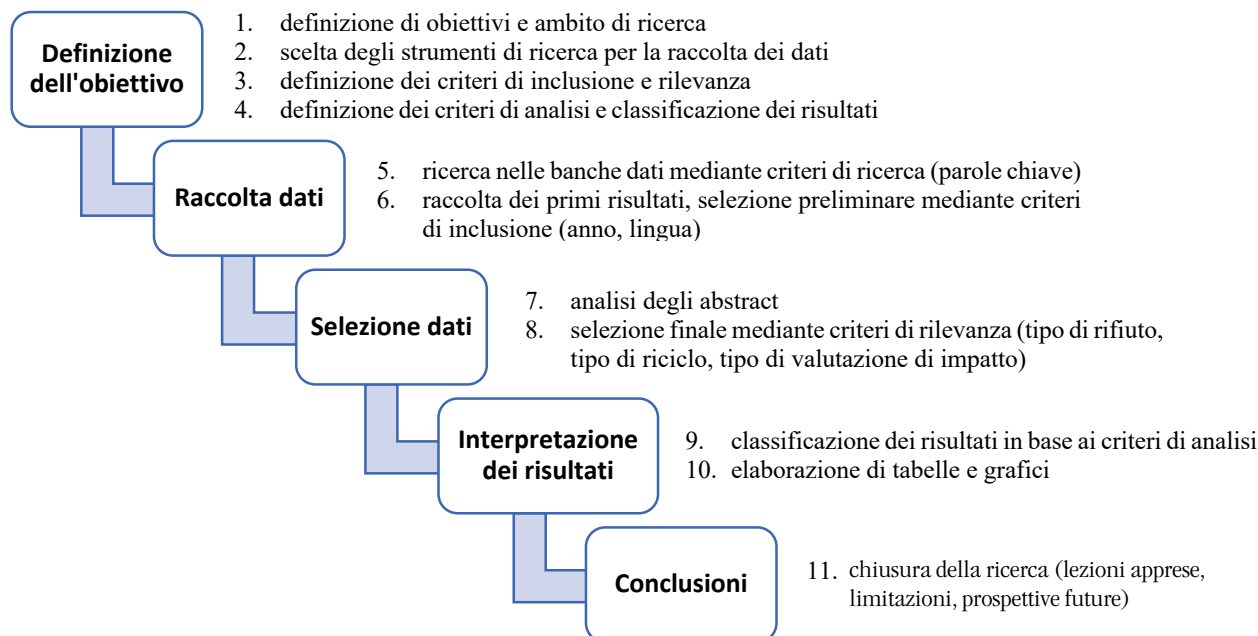
Per dare risposta a tali quesiti, è stata condotta un'analisi di letteratura, con l'obiettivo di verificare se la comunità scientifica internazionale sta affrontando il problema del fine vita di batterie e pannelli fotovoltaici considerando anche la componente sociale della sostenibilità.

I risultati attesi dalla ricerca sono:

1. individuare gli articoli scientifici che indagano i rischi di salute e sicurezza dei lavoratori impiegati negli impianti di riciclo e recupero di pannelli solari, batterie elettriche e, in generale, di RAEE;
2. evidenziare i rischi per SSL presenti nei siti di smaltimento e le criticità associate ai processi di riciclo in termini di sostenibilità sociale;
3. tracciare una mappa dei paesi dove vengono svolte queste ricerche e approfondire le tipologie di impianti e processi di riciclo studiati.

## 2. Materiali e metodi

La ricerca è costituita da un'attenta analisi della letteratura scientifica internazionale nell'ambito degli



**Figura 1.** Metodologia di analisi.

studi che si riferiscono a pannelli solari, batterie elettriche e RAEE. Per elaborare la metodologia di ricerca, si sono utilizzati in modo combinato tre approcci (Luederitz et al., 2017; Mazzi et al., 2016; Page et al., 2021a; Page et al., 2021b), arrivando ad elaborare una metodologia originale, rappresentata in Fig. 1.

Nella fase di definizione dell'obiettivo si sono tenuti in considerazione i seguenti elementi:

- Oggetto dell'analisi è la gestione del fine vita di tecnologie energetiche come pannelli fotovoltaici e batterie, classificati come rifiuti RAEE (D.Lgs del 3 aprile 2006 n. 152);
- Ambito di analisi è la letteratura scientifica pubblicata recentemente inerente alla valutazione della dimensione sociale della sostenibilità;
- Focus dell'analisi è la SSL dei lavoratori che operano in impianti di smaltimento o riciclo di tali tecnologie innovative.

Lo studio è proseguito con la fase di raccolta dei dati e ha sfruttato gli strumenti Scopus e Web of Scien-

ce con le loro banche dati per condurre l'analisi. La letteratura ha dimostrato che i due database si completano a vicenda: Web of Science garantisce una copertura temporale più estesa mentre Scopus ha un'interfaccia più intuitiva che facilita il reperimento delle nozioni cercate (Burnham et al., 2006). Entrambi gli strumenti di ricerca offrono la possibilità di adoperare filtri di ricerca e parole chiave al fine di selezionare con maggior cura e precisione gli articoli scientifici necessari allo studio. La fase di raccolta dei dati è avvenuta mediante l'introduzione di criteri di inclusione che hanno permesso di suddividere la ricerca in 3 gruppi, riferiti ciascuno ad un diverso tipo di rifiuto analizzato:

- a) fine vita di pannelli solari;
- b) fine vita di batterie elettriche;
- c) fine vita di RAEE.

Sono stati collezionati articoli riferiti sia a casi studio che a revisioni di letteratura; sono stati inclusi solamente articoli redatti in lingua inglese e pubblicati tra

**Tabella 1.** Criteri di inclusione e parole chiave utilizzati nella fase di raccolta dei dati.

Ricerca di riferimento	Criteri di inclusione	Caratteristiche della ricerca
a), b), c)	Database	"Scopus" e "Web of Science"
a), b), c)	Lingua	Inglese
a), b), c)	Arco temporale	2019-2022
a), b), c)	Tipologia di documento	"article" e "review article"
a)	Parole chiave	"recycling", "solar panel" AND "human health"
b)	Parole chiave	"recycling", "electric batteries" AND "human health"
c)	Parole chiave	"recycling", "WEEE" AND "human health"

il 2019 e il 2022. Sono state utilizzate le parole chiave correlate dal connettore “AND”. I risultati dei tre studi sono confrontabili perché ottenuti inserendo gli stessi filtri di ricerca e utilizzando le medesime banche dati, come visibile in Tab. 1 – Criteri di inclusione e parole chiave utilizzati nella fase di raccolta dati.

Nella fase di selezione dei dati gli articoli ottenuti dalla precedente fase sono stati organizzati e raccolti in tavole riassuntive di estrazione dei dati per l’analisi. L’osservazione è proseguita con la lettura degli articoli allo scopo di escludere i paper non coerenti con l’ambito di ricerca. Da questa ulteriore cernita, ne è derivato il “campione selezionato” da approfondire nella fase successiva di interpretazione dei risultati.

### 3. Risultati e discussioni

La fase di raccolta dei dati ha portato ad individuare 40 articoli. La lettura di ciascun articolo nella fase di selezione dei dati ha permesso di verificare che molti degli articoli raccolti non rispettavano il criterio di coerenza rispetto all’ambito di ricerca: è stato pertanto escluso dall’analisi un numero significativo di articoli che discutono i pericoli di riciclo e smaltimento di pannelli solari, batterie e RAEE con valutazioni esclusivamente di impatto sull’ambiente o sulla salute delle comunità locali. L’ulteriore step nella fase di selezione dei dati ha permesso dunque di individuare 18 articoli, che trattano effettivamente la valutazione di rischio per SSL di processi e impianti di riciclo: tali articoli costituiscono il “campione selezionato” e sono stati studiati nella fase di interpretazione dei risultati.

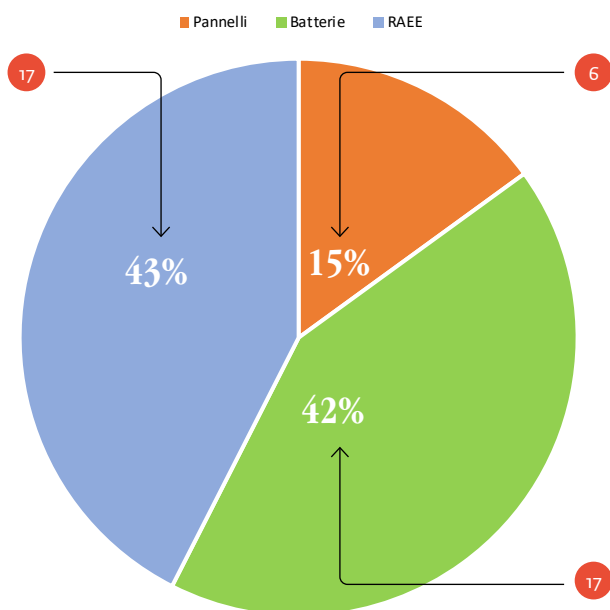
Come evidenziato in Fig. 2, i risultati della fase di raccolta dei dati testimoniano come la comunità scientifica stia privilegiando l’analisi degli impatti so-

ciali associati al fine vita di RAEE e batterie, mentre i pannelli fotovoltaici sono studiati solo in pochi casi. Focalizzando l’attenzione ai risultati della fase di selezione dei dati riportati in Fig. 3, tra gli articoli che trattano l’aspetto SSL, solamente 2 articoli analizzano processi di riciclo dei pannelli fotovoltaici, 5 articoli considerano il riciclo di batterie e 11 studiano i rischi associati ai RAEE.

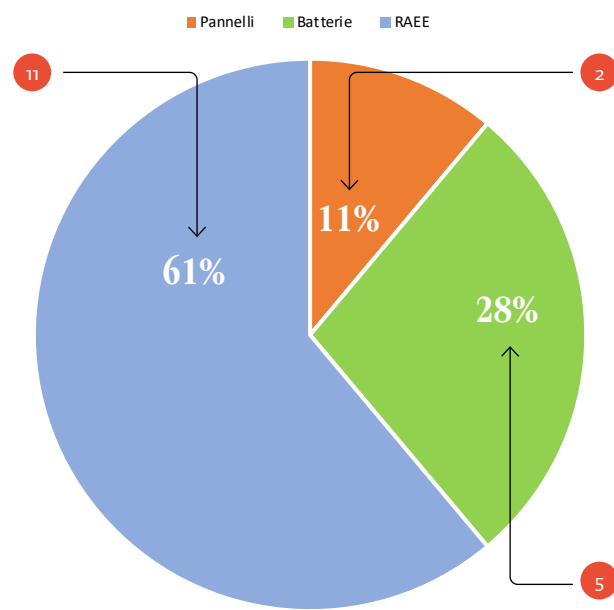
In Tab. 2, sono riportati i dettagli degli articoli risultanti dalla fase di selezione dei dati sui quali sono state condotte ulteriori analisi. La tabella costituisce una sintesi delle informazioni raccolte e mostra solamente alcuni delle voci tramite cui gli articoli sono stati catalogati. Per prima cosa, si può notare come le pubblicazioni di interesse siano molto recenti; inoltre, è possibile sottolineare come sia Scopus la banca dati che ha fornito i maggiori risultati.

Proseguendo con l’analisi degli articoli inerenti alla valutazione dei rischi per SSL nei processi di riciclo, in Fig.4 si nota negli anni una progressiva maggiore attenzione alla tematica. Questo risultato è coerente con le aspettative, dato che queste tecnologie stanno trovando maggiori applicazioni nel tempo e quindi la loro diffusione favorisce il dibattito e alimenta le ricerche scientifiche.

Considerando i Paesi in cui gli studi sono stati condotti, in Fig. 5 si può notare che maggiore attenzione al tema è data nei continenti in cui tali tecnologie sono gestite a fine vita, ovvero Africa e Asia. I Paesi dove prevalentemente sono state condotte le ricerche risultano essere quelli in via di sviluppo o sottosviluppati. Tra tutti emerge il Ghana che è certamente il Paese tenuto in maggiore considerazione: il 50% degli studi condotti in Africa riguarda questa nazione. Come in



**Figura 2.** N. di articoli dalla fase di raccolta dei dati inerenti alle tipologie di rifiuti (40 articoli analizzati).

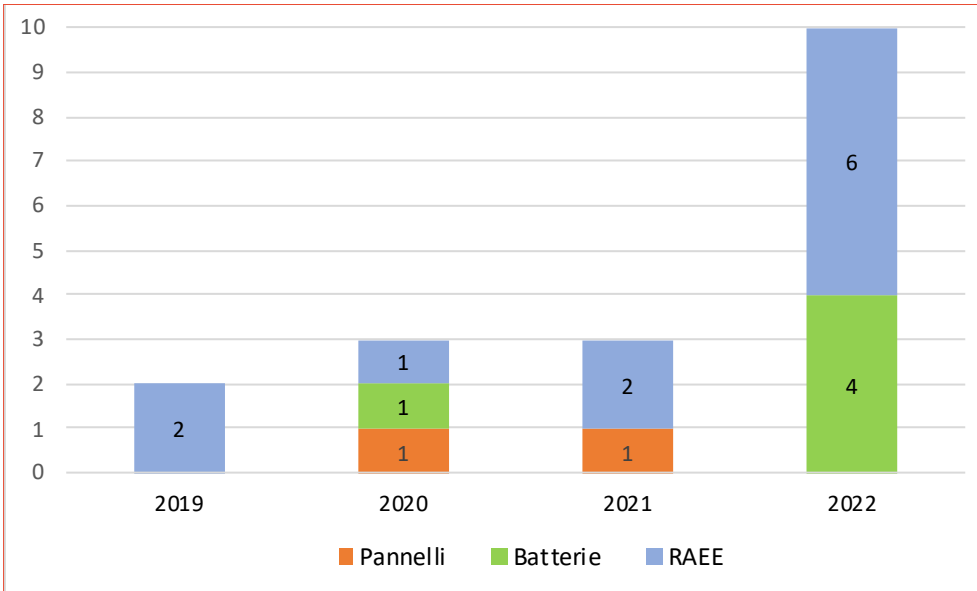


**Figura 3.** N. di articoli dalla fase di selezione dei dati inerenti alle tipologie di rifiuti (18 articoli analizzati).

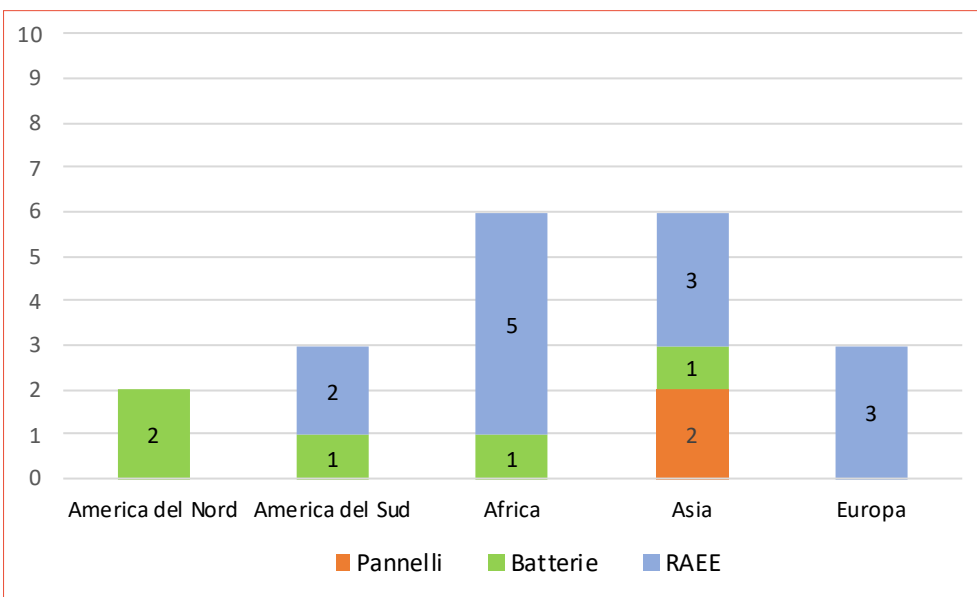


Tabella 2. Campione di articoli selezionati.

Anno	Autore	Titolo	Oggetto	DOI	Fonte
2020	Sheoran et al.	Photovoltaic waste assessment in India and its environmental impact	Pannelli	10.1088/1742-6596/1849/1/012003	Scopus
2020	Venkatachary et al.	Economics and impact of recycling solar waste materials on the environment and health care	Pannelli	10.1016/j.eti.2020.101130	Scopus
2022	Hernández-Franco et al.	Role of Ape1 in Impaired DNA Repair Capacity in Battery Recycling Plant Workers Exposed to Lead	Batterie	10.3390/ijerph19137961	Scopus
2020	Himani et al.	Blood Lead Levels in Occupationally Exposed Workers Involved in Battery Factories of Delhi-NCR Region: Effect on Vitamin D and Calcium Metabolism	Batterie	10.1007/s12291-018-0797-z	Web of Science
2022	Kay et al.	Robotic Disassembly of Electric Vehicles' Battery Modules for Recycling	Batterie	10.3390/en15134856	Scopus
2022	Lu et al.	A novel disassembly process of end-of-life lithium-ion batteries enhanced by online sensing and machine learning techniques	Batterie	10.1007/s10845-022-01936-x	Scopus
2022	Punt et al.	The Efficiency of Black Mass Preparation by Discharge and Alkaline Leaching for LIB Recycling	Batterie	10.3390/min12060753	Scopus
2022	Acquah et al.	Musculoskeletal disorder symptoms among workers at an informal electronic-waste recycling site in agboghoshie, Ghana	RAEE	10.3390/ijerph18042055	Scopus
2022	Dai et al.	Severe dioxin-like compound (DLC) contamination in e-waste recycling areas: An under-recognized threat to local health	RAEE	10.1016/j.envint.2020.105731	Web of Science
2022	Dutta et al.	Health risk assessment for exposure to heavy metals in soils in and around E-waste dumping site	RAEE	10.1016/j.jece.2022.107269	Scopus
2019	Gerding et al.	Metal exposure of workers during recycling of electronic waste: a cross-sectional study in sheltered workshops in Germany	RAEE	10.1007/s00420-021-01651-9	Web of Science
2022	Jensen et al.	Mercury Exposure among E-Waste Recycling Workers in Colombia: Perceptions of Safety, Risk, and Access to Health Information	RAEE	10.3390/ijerph18179295	Scopus
2019	Lasithiotakis et al.	Heavy metals inhalation exposure analysis from particulate matter emitted from dry and wet recycling processes of waste electrical and electronic equipment	RAEE	10.1002/ep.13265	Web of Science
2021	Mangmeechai et al.	The life-cycle assessment of greenhouse gas emissions and life-cycle costs of e-waste management in Thailand	RAEE	10.1186/s42834-022-00126-x	Scopus
2021	Montano et al.	Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Environment: Occupational and Exposure Events, Effects on Human Health and Fertility	RAEE	10.3390/toxics10070365	Scopus
2020	Okeme et al.	Electronic Waste Recycling: Occupational Exposures and Work-Related Health Effects	RAEE	10.1007/s40572-019-00255-3	Web of Science
2022	Okwu et al.	New Models to Reduce the Health Risks of Informal WEEE Recyclers in MTN Phone Village, Rumukurushi, Port Harcourt, Nigeria	RAEE	10.3390/toxics10020084	Scopus
2022	Wachinou et al.	Respiratory Disorders Related to e-Waste Exposure among Workers in the Informal Sector in a Sub-Saharan African City: An Exposed Nonexposed Study	RAEE	10.1155/2022/9968897	Scopus



**Figura 4.** Numero di articoli con valutazione di rischio SSL distinti per anno di pubblicazione.



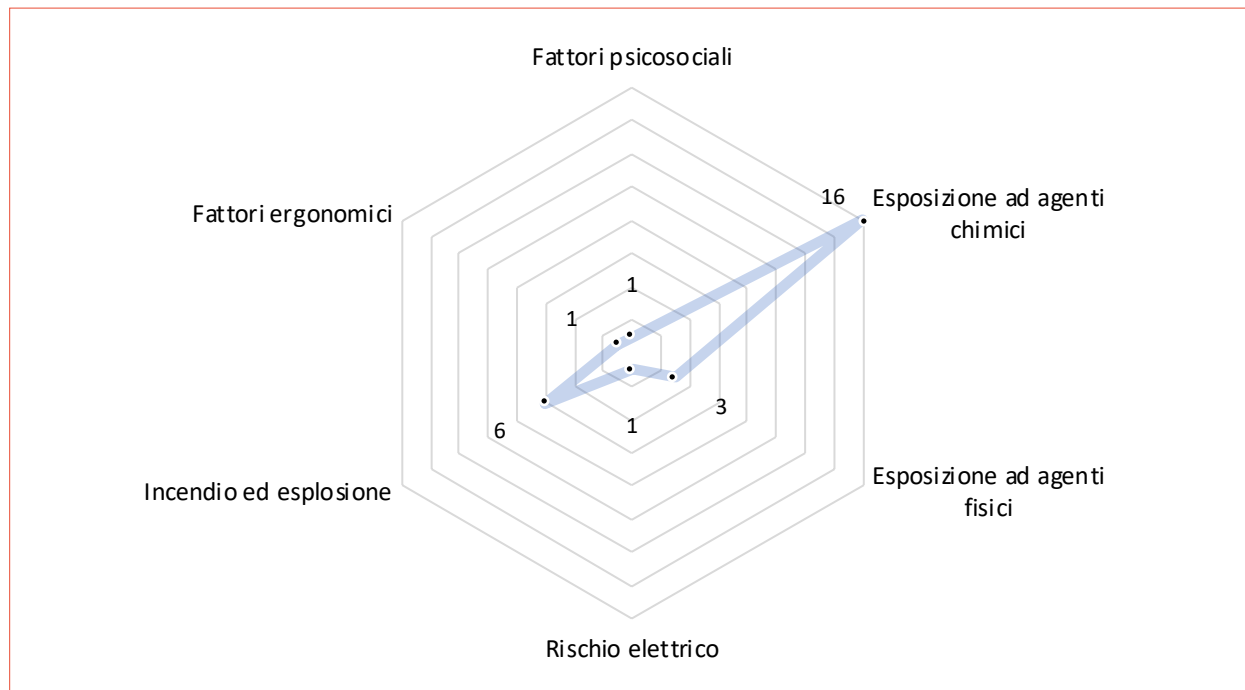
**Figura 5.** Numero di articoli con valutazione di rischio SSL distinti per continente.

Africa, anche in Asia c'è grande presenza di letteratura; si noti che in questo continente sono stati portati a termine gli unici due studi che riguardano i pannelli solari. Per quanto concerne l'analisi del rischio, è possibile tracciare una sintesi delle principali criticità associate ai processi di riciclo per SSL, le metodologie adottate sono prevalentemente sondaggi, raccolte di campioni ed analisi di tipo epidemiologico. I rischi ritenuti maggiormente rilevanti in impianti di riciclo e smaltimento di pannelli, batterie e RAEE sono l'esposizione ad agenti chimici, l'incendio e l'esplosione, il rischio elettrico, l'esposizione ad agenti fisici, i rischi psicosociali ed ergonomici. I risultati sono rappresentati nella Fig. 6 e si nota come quasi tutti gli articoli trattano il rischio di esposizione ad agenti chimici, correlato principalmente a materiali pericolosi come piombo, mercurio e altri metalli pesanti.

La tipologia di rischio individuata dipende dal tipo

di processo di riciclo studiato e dai confini del sistema imposti, dalla metodologia utilizzata nell'analisi del rischio, nonché dall'ubicazione del caso studio. Il ristretto campione di articoli selezionati non permette indagini statistiche di questo tipo; tuttavia, ulteriori approfondimenti sono riportati per una maggiore chiarezza dei risultati.

Gli articoli che trattano del riciclo dei pannelli solari sono Sheoran et al., 2020 e Venkatachary et al., 2020. Nel primo articolo, viene considerato il riciclo meccanico che comprende le fasi di triturazione, distacco, solubilizzazione, bagno chimico e cernita del materiale estratto dalle celle fotovoltaiche. Particolare attenzione è posta agli effetti sulla salute umana nella fase di lavorazione delle celle solari in silicio cristallino e amorfo, al cadmio e all'arseniuro di gallio. Nel secondo articolo, si indagano solo i processi di smontaggio e combustione. L'analisi del rischio viene con-



**Figura 6.** Numero di articoli inerenti alla valutazione di rischio SSL distinti per tipologia di rischio considerato.

dotta in entrambi i casi con il metodo LCA e i rischi rilevati sono quello chimico, di incendio, di esplosione e di ustione.

Con riferimento al riciclo delle batterie, sono stati individuati gli articoli di Hernández-Franco et al., 2022, Himani et al., 2020; Kay et al., 2022; Lu et al., 2022; Punt et al., 2022 che prendono in esame le batterie al piombo e al litio (LIB). Ciascun articolo ha considerato un diverso processo di riciclo che comprende, in ordine, il riciclo meccanico, robotizzato, automatico, mediante lisciviazione alcalina e un processo generico. L'analisi del rischio viene condotta con diverse modalità: attraverso la raccolta di dati epidemiologici, con lo studio del modello predittivo di "machine learning" e con studi sperimentali. I rischi rilevati hanno una forte dipendenza con il processo di riciclo e comprendono il rischio chimico, di esplosione, di folgorazione, di rumore e di incendio.

Infine, il processo di riciclo dei RAEE è trattato in un numero maggiore di articoli: Acquah et al., 2022; Dai et al., 2022; Dutta et al., 2022; Gerding et al., 2019; Jensen et al., 2022; Lasithiotakis et al., 2019; Mangmeechai et al., 2021; Montano et al., 2021; Oke-me et al., 2020; Okwu et al., 2022; Wachinou et al., 2022. La letteratura si riferisce alle fasi di riciclo che comprendono disassemblaggio, smistamento, riciclaggio manuale, meccanico e necessari processi termici. L'analisi del rischio è spesso condotta attraverso questionari standardizzati, studi statistici, raccolta di dati e campioni epidemiologici. Alcuni articoli si rifanno alla metodologia EPA statunitense e all'approccio di LCA e LCC. I rischi rilevati sono quello chi-

mico (esposizione a metalli pesanti, mercurio, PBC), fisico (rumore) ed ergonomico.

Complessivamente, tutti gli articoli considerano almeno il rischio chimico e un terzo del totale considera anche il rischio di esplosione e/o folgorazione. L'unico articolo che non esamina il rischio chimico si riferisce dichiaratamente ai soli aspetti che riguardano i fattori ergonomici perché indaga i disordini muscoloscheletrici dei lavoratori negli impianti di riciclo dei RAEE.

#### 4. Conclusioni

Il presente studio ha permesso di individuare gli articoli scientifici che indagano i rischi per la salute e sicurezza dei lavoratori impiegati negli impianti di riciclo e recupero di pannelli solari, batterie elettriche e, in generale, di RAEE. Nel rispondere alle domande di ricerca sono stati evidenziati i rischi per SSL presenti nei siti di smaltimento e le criticità associate ai processi di riciclo in termini di sostenibilità sociale. Dalle letture, è stata tracciata una mappa dei continenti dove sono state svolte le ricerche negli ultimi anni, mettendo in evidenza una maggiore attenzione verso questa tematica in Africa e Asia e una scarsa attenzione al tema da parte dell'Europa.

Gli ulteriori approfondimenti della ricerca hanno consentito di individuare alcune categorie di rischio più frequentemente osservate. L'esposizione ad agenti chimici e fisici, il rischio di esplosione e di incendio sono i fattori di rischio più frequentemente analizzati; trova poco spazio la valutazione del rischio elettrico, spesso sottovalutato nelle analisi. Si deve tenere in considerazione che questi risultati sono poco robusti da un punto



di vista statistico, a causa dell'esiguo numero di articoli che, in modo dettagliato, quantificano i rischi associati a questi processi. Inoltre, i pochi dettagli inerenti ai processi di riciclo considerati dagli studi non hanno permesso di approfondire i rischi associati alle diverse tipologie di impianti e processi di riciclo analizzati. Gli articoli di letteratura non hanno messo in evidenza raccomandazioni consistenti per i lettori. Nessuna informazione in merito alla minimizzazione degli impatti sociali legati alla gestione del fine vita delle tecnologie di energia rinnovabile sono state evidenziate nelle conclusioni.

Nonostante la tutela della salute e della sicurezza dei lavoratori trovi ampio spazio nelle politiche internazionali, i risultati dimostrano come gli studi che considerino questi aspetti per le tre categorie di prodotto al fine vita sono ancora molto esigui e poco approfonditi. La maggior parte dei Paesi che per primi si stanno affacciando al problema del fine vita sono i Paesi in via di sviluppo, non tanto per il fatto che qui stiano arrivando a fine vita le tecnologie installate negli anni precedenti, ma piuttosto per il fatto che questi Paesi sono chiamati a gestire il fine vita di tecnologie giunte a fine vita nei Paesi industrializzati, in particolare nei Paesi in Europa. Nei Paesi in via di sviluppo il riciclo si definisce "informale" perché, molte volte, è illegale: di fatto, viene realizzato in strutture inadatte, con impianti e processi "di fortuna", poco o per nulla realizzati nel rispetto dei requisiti di sicurezza previsti, e

senza l'utilizzo di idonei dispositivi di protezione collettiva e individuale. Gli operai coinvolti in queste attività sono spesso costretti ad accettare condizioni di lavoro per nulla sicure e salubri, a fronte di difficoltà economiche e degrado sociale profondi; in qualche caso, il lavoro è svolto da minori, senza rispettare le indicazioni delle organizzazioni internazionali.

In conclusione, si può affermare che ad oggi la tematica del fine vita e dei rischi legati all'uomo nei siti di riciclo di pannelli solari, batterie e RAEE si sta facendo strada all'interno della comunità scientifica. Tuttavia, l'aspetto sociale non è ancora argomento di primaria importanza come lo sono gli aspetti ambientali ed economici della sostenibilità per questi prodotti.

Sviluppi futuri, prevedono di migliorare ed estendere la ricerca al fine di verificare la validità dei risultati ottenuti, in particolare in riferimento ai rischi individuati. La ricerca sarà ampliata ad altre tipologie di valutazioni della dimensione sociale di sostenibilità, ad esempio considerando articoli che utilizzano altre tecniche di valutazione della sostenibilità sociale e anche ad altre tipologie di documenti, come ad esempio banche dati o linee guida di settore. Si prevede di indirizzare la ricerca anche verso le soluzioni brevettate per il riciclo di pannelli e batterie, per verificare se le nuove opzioni tecniche e tecnologiche pongono la dovuta attenzione agli aspetti di sostenibilità sociale. ■

## Riferimenti bibliografici

- Andeobu L., Widowo S., Grandhi S., et al., 2021. An assessment of e-waste generation and environmental management of selected countries in Africa, Europe and North America: A systematic review. *Science of the Total Environment*, vol. 792.
- Barros M.V., Salvador R., Francisco do Prado G., et al., 2021. Circular economy as a driver to sustainable businesses. *Cleaner Environmental Systems*, vol. 2.
- Burnham J.F., 2006. Scopus database: a review. *Biomedical Digital Libraries*, vol. 3.
- Burke M.J., Stephens J.C., 2018. Political power and renewable energy futures: A critical review. *Energy Research & Social Science*, vol. 35, 78-93.
- COM, 2019, 640 final. Il Green Deal europeo.
- COM, 2020a, 474 final. Resilienza delle materie prime critiche: tracciare un percorso verso una maggiore sicurezza e sostenibilità.
- COM, 2020b, 98 final. A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe.
- COM, 2021a, 557 final. Proposta che modifica la direttiva (UE) 2018/2001, il regolamento (UE) 2018/1999 e la direttiva n. 98/70/CE del Parlamento europeo e del Consiglio.
- COM, 2021b, 550 final. "Fit for 55": delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality".
- COM, 2022, 639 final. Relazione 2022 sul raggiungimento degli obiettivi in materia di energie rinnovabili per il 2020.
- COM, 2023, 160 final. Proposal for a regulation of the European Parliament and of the council establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) 168/2013, (EU) 2018/858, 2018/1724 and (EU) 2019/1020.
- Decreto Legislativo del 3 aprile 2006 n. 152. Norme in materia ambientale.

- IEA, 2021. Renewables 2021 – Analysis and forecasts 2026.
- EPRS, 2022. New EU regulatory framework for batteries - Setting sustainability requirements.
- Eurostat, 2022. Statistiche sull'energia – Una panoramica. Disponibile su: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy\\_statistics\\_-\\_an\\_overview&action=statexp-seat &lang=it](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview&action=statexp-seat &lang=it)
- Gerbinet S., Belboom S., Leonard A., 2014. Life Cycle Analysis (LCA) of photovoltaic panels: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 38, 747-753.
- Huertas-Valdivia I., Ferrari A.M., Settembre-Blundo D., et al., 2020. Social Life-Cycle Assessment: A Review by Bibliometric Analysis. *Sustainability*.
- Kristensen H.S., Mosgaard M.A., 2020. A review of micro level indicators for a circular economy e moving away from the three dimensions of sustainability?. *Journal of Cleaner Production*, vol. 243.
- IPCC, 2023. Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation.
- ISO 31010:2019. Risk management – Risk assessment techniques.
- Luederitz C., Schapke N., Wiek A., et al., 2017. Learning through evaluation e A tentative evaluative scheme for sustainability transition experiments. *Journal of Cleaner Production*, vol. 169, 61-76.
- Mazzi A., 2020. Introduction. Life cycle thinking. In Ren J., Toniolo S. (Eds) "Life Cycle Sustainability Assessment for Decision-Making: Methodologies and Case Studies". Elsevier, 1-19, ISBN: 9780128183557.
- Mazzi A., Toniolo S., Manzardo A., et al., 2016. Exploring the direction on the environmental and business performance relationship at the firm level. *Lessons from a literature review. Sustainability* 8, cod. 1200. ISSN 2071-1050.
- Middela M.S., Mahesh S., Kancharla S.R. et al., 2022. Complete LCA of battery electric and conventional fuel vehicles for freight trips. *Transportation Research Part D*, vol 110.
- Mies A., Gold S., 2021. Mapping the social dimension of the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, vol. 321.
- Padilla-Rivera A., Barros Telles do Carmo B., Arcese G., et al., 2021. Social circular economy indicators: Selection through fuzzy delphi method. *Sustainable Production and Consumption*, vol. 26, 101-110.
- Page M.J., McKenzie J.E., Bossuyt P.M., et al., 2021b. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *Research method and reporting*.
- Page M.J., Moher D., Bossuyt P.M., et al., 2021a. PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. *Research method and reporting*.
- Raugei M., Winfield P., 2019. Prospective LCA of the production and EoL recycling of a novel type of Li-ion battery for electric vehicles. *Journal of Cleaner Production*, vol. 213, 926-932.
- Ren M., Mitchell C.R.M., Mo W., 2020. Dynamic life cycle economic and environmental assessment of residential solar photovoltaic systems. *Science of the Total Environment*, vol. 722.
- Rivela B., Kuczynski B., Sucozhanay D., 2022. What Life Cycle Thinking means: A system approach to sustainability.
- Safarzynka K., Di Domenico L., Raberto M., 2023. The circular economy mitigates the material rebound due to investments in renewable energy. *Journal of Cleaner Production*, vol. 402.
- Toniolo S., Mazzi A., Mazzarotto G., et al., 2019. International Standards with a life cycle perspective: which dimension of sustainability is addressed?. *International Journal of Life Cycle Assessment* 24 (10), 1765-1777.
- Torkayesh A.E., Rajaefar M.A., Rostom M., et al., 2022. Integrating life cycle assessment and multi criteria decision making for sustainable waste management: Key issues and recommendations for future studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 168.
- UNEP, 2022. Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products.
- United Nation General Assembly, 2015. *Trasforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*.
- Velenturf A.P.M., Purnell P., 2021. Principles for a sustainable circular economy. *Sustainable Production and Consumption*, vol. 27, 1437-1457.
- Venkatachary S.K., Samikannu R., Murugesan S., et al., 2020. Economics and impact of recycling solar waste materials on the environment and health care. *Environmental Technology & Innovation*, vol. 20.
- Zastempowski M., 2023. Analysis and modeling of innovation factors to replace fossil fuels with renewable energy sources - Evidence from European Union enterprises. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 178.



# INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

per il 2023 è sostenuta da:

