

---

**UNIVERSITA' DI UNIGE  
SCUOLA DI SCIENZE SOCIALI  
DIPARTIMENTO DI ECONOMIA**



Tesi di laurea magistrale

in

Management

**Gestione 4.0 dei rifiuti: dalla teoria alla pratica.  
Il contributo di startup e PMI innovative  
italiane**

Relatore: Nicoletta Buratti

Candidato: Giovanni Concio

**Anno accademico 2024-2025**

---

## INDICE

<b>ABSTRACT .....</b>	<b>4</b>
<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>5</b>
<b>CAPITOLO I. WASTE MANAGEMENT E QUADRO NORMATIVO .....</b>	<b>7</b>
1.1 Una panoramica generale sui rifiuti .....	7
1.2 Waste management: definizione e caratteristiche.....	10
1.2.1 La raccolta dei rifiuti .....	10
1.2.2 Le modalità di trattamento dei rifiuti.....	12
1.2.3 Lo smaltimento dei rifiuti .....	15
1.3 L' economia circolare .....	18
1.4 Il quadro normativo di riferimento sui rifiuti .....	21
1.5 Transizione ad una gestione 4.0 dei rifiuti .....	24
<b>CAPITOLO II. GESTIONE 4.0 DEI RIFIUTI: UNA REVISIONE DELLA LETTERATURA .....</b>	<b>26</b>
2.1 Metodologia.....	26
2.2 Distribuzione delle tecnologie analizzate negli studi .....	28
2.3 Analisi delle tipologie di studi.....	29
2.4 Analisi delle keywords .....	30
2.5 Distribuzione temporale degli articoli .....	31
2.6 Analisi delle riviste accademiche .....	32
2.7 Le fasi del ciclo di gestione dei rifiuti.....	33
2.8 Distribuzione geografica degli studi.....	34
<b>CAPITOLO III. ANALISI DELLE TECNOLOGIE 4.0 NELLA GESTIONE DEI RIFIUTI.....</b>	<b>41</b>
3.1 Internet of Things .....	41

3.2 Intelligenza Artificiale .....	46
3.3 Blockchain.....	54
3.4 Digital Twin.....	59
3.5 Robotica Avanzata .....	61
3.6 Benefici delle tecnologie 4.0: evidenze e impatti misurabili .....	62
3.7 Criticità nell’adozione delle tecnologie 4.0 nella gestione dei rifiuti.....	68
<b>CAPITOLO IV. STARTUP E PMI INNOVATIVE NELLA GESTIONE DEI RIFIUTI: UN’ANALISI DELLE SOLUZIONI TECNOLOGICHE 4.0.....</b>	<b>76</b>
4.1 Metodologia dell’analisi.....	76
4.2 Profilo anagrafico, organizzativo e territoriale.....	78
4.2.1 Profilo giuridico ed anagrafico .....	78
4.2.2 Capitale umano e prevalenza giovanile .....	78
4.2.3 Localizzazione geografica della sede legale.....	79
4.3 Analisi dei requisiti di innovazione e della maturità tecnologica.....	81
4.4 Canali di vendita e aree geografiche di interesse .....	86
4.5 Analisi qualitativa delle soluzioni tecnologiche.....	88
4.5.1 La raccolta e la logistica dei rifiuti 4.0 .....	88
4.5.2 Automazione e intelligenza artificiale nei processi di trattamento .....	94
4.5.3 Soluzioni tecnologiche per la gestione dello spreco alimentare .....	96
4.5.4 Smart Landfill.....	97
4.6 Analisi economico-patrimoniale.....	99
4.7 L’ecosistema di supporto: mappatura di investitori, acceleratori e open innovation .....	102
<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>105</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>108</b>



## **ABSTRACT (Italiano)**

La presente tesi analizza l'integrazione del paradigma dell'Industria 4.0 nella gestione dei rifiuti, indagandone il potenziale trasformativo e le dinamiche industriali sottostanti. La ricerca nasce dall'esigenza di valutare se l'innesto di soluzioni data-driven possa costituire un fattore determinante per superare le inefficienze strutturali del comparto, ottimizzando i processi operativi e riducendo l'impatto ambientale. Il percorso di indagine muove dalla definizione del perimetro operativo e normativo della gestione dei rifiuti per poi illustrare la metodologia di revisione sistematica della letteratura internazionale adottata per mappare lo stato dell'arte. Su questa base, vengono discusse criticamente le evidenze emerse, mettendo in luce il divario tra potenziale teorico e maturità applicativa reale, con una specifica attenzione ai benefici attesi e alle barriere multidimensionali che ne condizionano il consolidamento. Il lavoro si conclude con l'esame del panorama imprenditoriale nazionale, approfondendo le caratteristiche delle startup e PMI innovative italiane e il ruolo dell'ecosistema di supporto nel favorire lo sviluppo di tali realtà e nel promuovere l'integrazione tecnologica lungo l'intera filiera.

## **ABSTRACT (English)**

This thesis analyzes the integration of the Industry 4.0 paradigm into waste management, investigating its transformative potential and underlying industrial dynamics. The research stems from the need to evaluate whether the integration of data-driven solutions can be a determining factor in overcoming the structural inefficiencies of the sector, optimizing operational processes and reducing environmental impact. The research path begins with the definition of the operational and regulatory scope of waste management and then illustrates the systematic review methodology of the international literature adopted to map the state of the art. On this basis, the emerging evidence is critically discussed, highlighting the gap between theoretical potential and real application maturity, with specific attention to the expected benefits and the multidimensional barriers that influence its consolidation. The work concludes with an examination of the national business landscape, delving into the characteristics of Italian innovative startups and SMEs and the role of the support ecosystem in fostering the development of these businesses and promoting technological integration throughout the entire supply chain.

## INTRODUZIONE

L'innovazione tecnologica non rappresenta un processo lineare né automatico, ma una dinamica complessa che coinvolge fattori economici, organizzativi, culturali e istituzionali. La letteratura sulla diffusione dell'innovazione ha evidenziato come l'introduzione di nuove tecnologie sia spesso accompagnata da resistenze e inerzie strutturali (Rogers, 1983). La disponibilità di una tecnologia non implica la sua immediata integrazione: l'adozione è un processo di riduzione dell'incertezza che dipende dalla percezione dei benefici, dal grado di compatibilità con i valori esistenti e dalla possibilità di re-inventare la soluzione per adattarla al contesto locale.

In questo quadro teorico si colloca il paradigma dell'Industria 4.0, espressione con cui si identifica la progressiva integrazione tra sistemi fisici e digitali, basata sull'utilizzo di tecnologie avanzate capaci di abilitare nuove modalità di monitoraggio, analisi e coordinamento dei processi produttivi (Lasi et al., 2014). Nato in ambito manifatturiero, tale paradigma ha progressivamente esteso il proprio raggio applicativo ad ambiti eterogenei, alimentando il dibattito sulla possibilità di una trasformazione digitale anche in settori tradizionalmente caratterizzati da infrastrutture fisiche consolidate e da logiche operative stabilizzate nel tempo.

Tra questi settori rientra la gestione dei rifiuti, ambito storicamente ancorato a modelli organizzativi rigidi, fortemente regolamentato e caratterizzato da una significativa presenza pubblica. L'innesto di soluzioni riconducibili al paradigma 4.0 in un contesto di questo tipo pone interrogativi rilevanti non soltanto sul piano tecnico, ma soprattutto sul piano gestionale e organizzativo. Non è infatti scontato che tecnologie sviluppate per contesti industriali ad alta automazione risultino immediatamente trasferibili in sistemi complessi come quelli del waste management, nei quali interagiscono attori pubblici, imprese private, cittadini e istituzioni regolatorie.

L'adozione di innovazioni digitali avanzate può essere interpretata, in termini teorici, come innovazione di prodotto o di processo di business, che include i cambiamenti ai modelli organizzativi, secondo la classificazione del Manuale di Oslo (OECD & Eurostat, 2018).

Tuttavia, la letteratura suggerisce che la transizione tecnologica in contesti a elevata complessità istituzionale sia spesso caratterizzata da dinamiche non lineari,

sperimentazioni circoscritte e difficoltà di scalabilità. In tale prospettiva, risulta pertinente interrogarsi non soltanto sulle potenzialità delle tecnologie digitali, ma anche sul loro effettivo grado di diffusione e sulla maturità applicativa nel settore della gestione dei rifiuti.

Alla luce di queste considerazioni, il presente lavoro si propone di indagare:

- in che misura le tecnologie riconducibili al paradigma 4.0 risultino applicate nel settore della gestione dei rifiuti;
- quali benefici potenziali vengano attribuiti a tali soluzioni nella letteratura scientifica;
- quali criticità economiche, organizzative e socioculturali possano ostacolare la diffusione;
- quale sia il grado di sviluppo dell'ecosistema imprenditoriale italiano nel Waste Management 4.0.

Il contributo della ricerca consiste nell'offrire una lettura integrata del fenomeno, combinando un'analisi sistematica della letteratura internazionale con un'esplorazione empirica del panorama nazionale, al fine di evidenziare eventuali disallineamenti tra produzione scientifica e realtà applicativa.

Il primo capitolo presenta il quadro generale della gestione dei rifiuti, illustrandone le principali caratteristiche, le fasi operative e il contesto normativo di riferimento. Il secondo capitolo descrive la metodologia adottata per la revisione sistematica della letteratura e ne analizza i risultati in termini di distribuzione delle tecnologie, tipologie di studi, analisi delle parole chiave, distribuzione temporale, riviste accademiche, fasi del ciclo di gestione dei rifiuti maggiormente coinvolte e provenienza geografica dei contributi scientifici. Il terzo capitolo approfondisce e discute in maniera critica le evidenze emerse, con particolare attenzione ai benefici attesi e alle barriere all'adozione. Il quarto capitolo esamina il panorama italiano delle startup e delle PMI innovative attive nel Waste Management 4.0, attraverso un'indagine esplorativa basata sui dati del Registro delle Imprese, un'analisi qualitativa delle soluzioni tecnologiche e la mappatura degli ecosistemi di supporto, includendo programmi di Corporate Venture Capital e Open Innovation.

## CAPITOLO I. WASTE MANAGEMENT E QUADRO NORMATIVO

### 1.1 Una panoramica generale sui rifiuti

La produzione di rifiuti, sia domestica che industriale, continua a crescere su scala globale, insieme alla crescita economica e al consumo, rappresentando una delle sfide ambientali e manageriali più critiche da affrontare. Per comprendere la portata del problema occorre innanzitutto definire il concetto di rifiuto.

Per rifiuto si intende un sottoprodotto generato dalle attività di produzione e consumo, che ha esaurito la propria utilità per chi lo possiede (UNEP, 2024) o “qualsiasi sostanza, materiale o oggetto di cui il detentore si disfi o abbia l'intenzione o l'obbligo di disfarsene” (European Parliament and the Council of the European Union, 2008). Nonostante la chiarezza e la quasi totale univocità di tal definizioni, non vi è una classificazione unica e universale. I rifiuti possono essere infatti categorizzati in base a materiale, prodotto, fonte di provenienza e livello di pericolosità, come spiegato dalla seguente tabella:

*Tabella 1.1: Criteri di classificazione dei rifiuti per materiale, tipologia, fonte e pericolosità*

<b>Criterio di classificazione</b>	<b>Descrizione</b>	<b>Esempi</b>
<b>Per materiale</b>	Classificazione in base alla composizione prevalente del rifiuto	Plastica; carta e cartone; metalli; vetro; rifiuti organici (food waste)
<b>Per tipologia di prodotto</b>	Basata sul prodotto a fine vita, indipendentemente dai materiali contenuti	E-waste (rifiuti elettrici ed elettronici); veicoli a fine vita (ELV); imballaggi; tessili
<b>Per fonte di generazione</b>	Identifica l'origine del rifiuto in funzione dell'attività che lo produce	MSW (Municipal Solid Waste: famiglie, piccole imprese, servizi pubblici); rifiuti industriali; rifiuti agricoli; rifiuti sanitari;

		rifiuti da costruzione e demolizione
<b>Per pericolosità</b>	Classificazione in base al rischio per salute e ambiente	Rifiuti pericolosi (chimici, sanitari infettivi, batterie esauste); rifiuti non pericolosi

*Fonte: Elaborazione personale su dati UNEP (2024), Global Waste Management Outlook*

Per quanto concerne la classificazione a livello normativo, e nello specifico sul territorio nazionale, vi è l'articolo 184 del Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n.152, del Testo Unico Ambientale (TUA), che stabilisce una doppia classificazione dei rifiuti: in base all'origine del rifiuto e alla sua pericolosità. La prima classificazione riguarda la distinzione tra rifiuti urbani e rifiuti speciali. Rientrano tra i rifiuti urbani quelli generati dalle famiglie, compresi quindi i rifiuti domestici anche ingombranti, quelli derivanti dallo spazzamento delle strade e dalla manutenzione delle aree verdi, quelli provenienti da esercizi commerciali, uffici o servizi. I rifiuti speciali fanno invece riferimento a tutti quei rifiuti derivanti da attività economiche e produttive disparate e contemplano quindi rifiuti agricoli, industriali, quelli derivanti dalle attività artigianali e commerciali, gli scarti derivanti dalle attività di costruzione e demolizione, di attività sanitarie e dai veicoli fuori uso. La seconda grande distinzione riguarda la pericolosità del rifiuto, distinguendo tra rifiuti pericoli e non pericolosi. La pericolosità, ai sensi del TUA e riprendendo l'elenco europeo dei rifiuti, si declina in base alla presenza o meno di sostanze pericolose per l'ambiente e caratteristiche particolari come l'infiammabilità, la tossicità acuta, la cancerogenicità e l'ecotossicità.

Se la classificazione normativa permette di inquadrare la complessità gestionale dei rifiuti, sono i dati sulla loro produzione a rivelarne l'urgenza ambientale e manageriale, soprattutto per i rifiuti prodotti a livello urbano. A livello globale, la produzione è destinata ad aumentare significativamente, passando dai 2,01 miliardi di tonnellate registrati nel 2016 a circa 3,4 miliardi di tonnellate entro il 2050 (World Bank, 2018). Questa tendenza risulta particolarmente accentuata nei Paesi a medio-basso reddito, dove si prevede che la produzione di rifiuti possa raddoppiare o addirittura triplicare entro il 2050, come nel caso dell'Asia meridionale, dove si stima che si possa passare da 334 milioni a 661 milioni di tonnellate.

Spostando l'attenzione sui rifiuti per materiale e per tipologia di prodotto si evincono ulteriori allarmanti criticità. Per quanto riguarda ad esempio i rifiuti plastici si potrebbe arrivare ad una produzione di circa 430 milioni di tonnellate all'anno, con un tasso di riciclo di solo il 10%, e la parte restante incenerita, smaltita in discarica o soprattutto dispersa nell'ambiente con impatti significativi sull'ecosistema terrestre e marino (Hariyani et al., 2025). Secondo recenti stime, ogni anno oltre 13 milioni di tonnellate di rifiuti vengono riversati sugli oceani causando aggravando l'inquinamento marino (Khajuria et al., 2022).

Un'analogia criticità si riscontra nei rifiuti elettrici ed elettronici, la cui produzione ha raggiunto 53,6 milioni di tonnellate nel 2019 e, secondo le proiezioni, è destinata ad aumentare fino a circa 74,7 milioni di tonnellate entro il 2030 (Forti et al., 2020). Se da un lato rappresentano una potenziale fonte di materiali di valore come oro, argento o rame, dall'altro possono risultare pericolosi per la presenza di sostanze come il piombo, il nichel, il cadmio che, se rilasciate nell'ambiente in caso di gestione impropria, contaminano suolo, acque sotterranee e risorse idriche superficiali (Fawole et al., 2023).

La loro gestione inadeguata ha inoltre un forte impatto a livello climatico, poiché genera emissioni significative di gas serra, specialmente di metano, con un potenziale di riscaldamento globale 28 volte superiore a quello della CO<sub>2</sub> (Fawole et al., 2023).

Una terza categoria molto critica è quella dei rifiuti organici, che a livello globale rappresentano il 44 % della produzione complessiva dei rifiuti solidi urbani (World Bank, 2018). Una quota importante di questa frazione deriva dallo spreco alimentare. Ogni anno viene perso o sprecato circa un terzo del cibo prodotto a livello mondiale, quantità sufficiente a sfamare 1,26 miliardi di persone all'anno. Questo spreco permea tutte le fasi della filiera: produzione agricola, manipolazione e stoccaggio post-raccolta, lavorazione, distribuzione e consumo con differenze a seconda dell'area geografica. Nei paesi in via di sviluppo le perdite avvengono principalmente nel post-raccolta e nella lavorazione, mentre nei paesi avanzati, come quelli europei e del Nord America, avvengono prevalentemente nelle fasi di distribuzione e consumo, con picchi di 280-300 kg di cibo sprecato (Song et al., 2015).

Le conseguenze ambientali dello spreco sono di vasta portata. Nel 2007 si stima che 1,4 miliardi di ettari di terra siano stati destinati alla produzione di alimenti mai

consumati, contribuendo a erosione, perdita di fertilità e uso eccessivo di input chimici. Sul fronte idrico, circa il 70% dell'acqua dolce globale utilizzata in agricoltura è stata sprecata attraverso coltivazioni destinate a cibo non consumato, con un'impronta idrica blu pari a 250 km<sup>3</sup>, circa 3,5 volte quella complessiva degli Stati Uniti nello stesso anno (Song et al., 2015).

## **1.2 Waste management: definizione e caratteristiche**

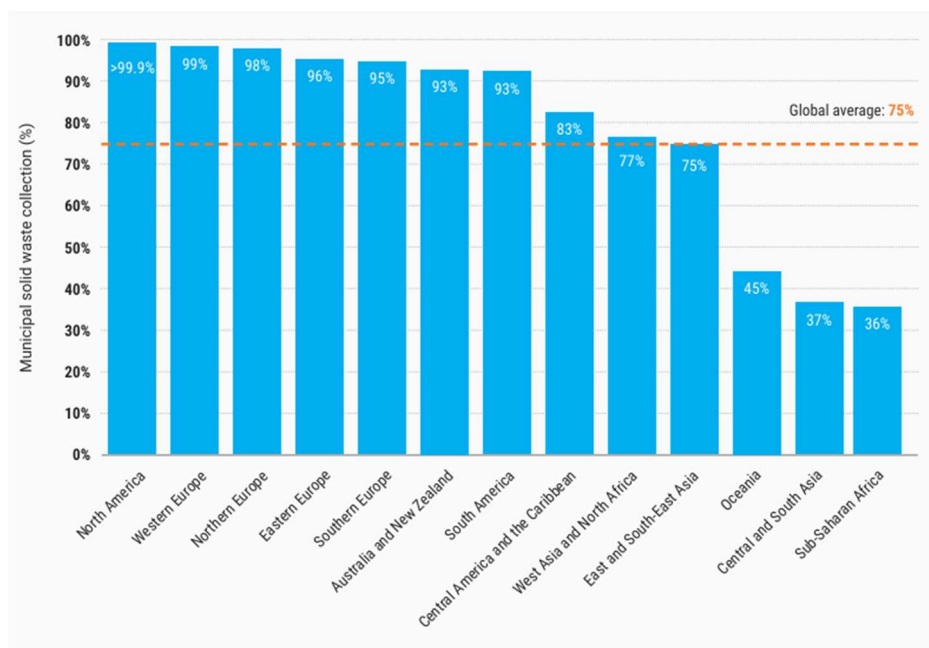
Dai dati emersi in precedenza si evince quanto sia necessaria un'adeguata gestione dei rifiuti. In senso generale, con il concetto di *waste management* si intende l'insieme dei processi che accompagnano i rifiuti dal loro conferimento fino alla destinazione finale, ossia dalla raccolta, passando per il trattamento e lo smaltimento dei materiali di scarto (Hariyani et al., 2025).

### **1.2.1 La raccolta dei rifiuti**

Il servizio di raccolta dei rifiuti rappresenta la fase iniziale del ciclo di gestione e prevede il prelievo organizzato dei materiali di scarto dai punti di generazione, che siano essi abitazioni, imprese o spazi pubblici, per avviarli alle successive fasi di trasporto e trattamento (Abdel Aziz, 2024). L'accesso a questo servizio non è però universale, in particolare se si considerano i rifiuti solidi urbani. A livello globale, si stima infatti che circa 2,7 miliardi di persone, presenti principalmente nelle aree rurali dell'Africa subsahariana e dell'Asia, non abbiano accesso a un sistema di raccolta formale. Nei Paesi a basso e medio reddito i tassi di raccolta scendono infatti al di sotto del 40%, come mostrato nella figura successiva, mentre in Europa e Nord America superano il 95%.

In termini quantitativi questo implica che oltre un quarto dei rifiuti solidi urbani prodotti nel mondo corrispondenti a circa 540 milioni di tonnellate, non venga raccolto correttamente, contribuendo negativamente all'inquinamento ambientale (UNEP, 2024).

**Grafico 1.1: Tassi di raccolta dei rifiuti solidi urbani per area geografica**



Fonte: UNEP (2024), *Global Waste Management Outlook*

Nei contesti in cui il servizio è presente, i modelli operativi sono riconducibili principalmente alla raccolta tramite cassonetti stradali, alla raccolta porta a porta e ai centri di raccolta, per la raccolta di rifiuti specifici, come quelli elettrici ed elettronici. Attraverso i cassonetti stradali, di colore diverso a seconda della tipologia di rifiuto e disponibili per l'utenza 24 ore su 24, gli operatori prelevano i rifiuti secondo un calendario e percorsi predefiniti. Se da un lato questo sistema rappresenta un vantaggio per il gestore in termini e costi logistici, dall'altro presenta significative criticità. L'assenza di controllo individuale sui conferimenti porta infatti a una scarsa qualità della raccolta differenziata, con un'elevata contaminazione tra le frazioni differenziate che compromette la riciclabilità dei materiali (Rossi et al., 2022). Con il sistema di raccolta porta a porta, che prevede il ritiro dei rifiuti differenziati direttamente presso le singole utenze in giorni prestabiliti, vi è invece una maggiore responsabilizzazione e consapevolezza del cittadino, che generalmente garantiscono una qualità dei materiali raccolti nettamente superiore e performance di riciclo più elevate (Laurieri et al., 2020).

Anche il sistema porta a porta però presenta delle criticità. Un sistema porta a porta richiede infatti un'organizzazione logistica molto più complessa rispetto al modello

stradale, con un incremento significativo di manodopera, mezzi e tempi di raccolta. Tutto ciò si traduce in costi molto elevati. Secondo un rapporto di Utilitalia realizzato con Bain & Company, il costo medio per tonnellata raccolta ammonta a circa 190 € per il porta a porta, contro i 74 € del sistema stradale, quindi oltre il doppio (Aterini, 2018).

Al di là delle differenze che caratterizzano i singoli modelli, il sistema tradizionale di raccolta presenta dei limiti strutturali comuni, legati soprattutto alla sua rigidità organizzativa. I camion e gli autisti seguono infatti percorsi e calendari prestabiliti indipendentemente dal reale riempimento dei contenitori. Dunque, mentre alcuni cassonetti possono essere svuotati quando sono ancora parzialmente vuoti, altri già colmi restano in attesa del turno successivo di raccolta, acuendo il livello di spreco delle risorse, oltre che un consumo elevato del carburante e un aumento dei costi operativi. Inoltre, l'assenza di sistemi di monitoraggio rende difficile rilevare tempestivamente situazioni anomale come incendi o spostamenti dei contenitori (Seker, 2025).

### **1.2.2 Le modalità di trattamento dei rifiuti**

Dopo la raccolta, i rifiuti vengono sottoposti a processi di trattamento, con l'obiettivo di ridurre il volume e la pericolosità dei materiali, migliorandone le caratteristiche e, se possibile, anche di recuperare componenti utili. Questi processi di trattamento si articolano in 3 categorie: meccanici, biologici e termici.

I trattamenti di tipo meccanico prevedono la manipolazione fisica, la cernita e la preparazione dei materiali di scarto per facilitare l'ulteriore lavorazione e il riciclo in impianti appositi per il recupero dei materiali attraverso operazioni come la compattazione e la triturazione dei rifiuti (Hariyani et al.,2025). La compattazione è finalizzata a ridurre drasticamente il volume dei rifiuti attraverso la compressione, ottimizzando lo spazio durante le fasi di trasporto e di stoccaggio. Attraverso la triturazione, i materiali vengono tagliati in pezzi più piccoli, riducendone ulteriormente il volume e facilitando le fasi successive di gestione, recupero o riciclo.

A queste operazioni si accompagna il riciclaggio meccanico in senso stretto, particolarmente diffuso per i rifiuti plastici, che prevede la frammentazione, il lavaggio e la successiva rigranulazione del materiale, così da ottenere nuove materie prime seconde da reinserire nei cicli produttivi. Questo tipo di trattamento richiede però un elevato consumo energetico, oltre che il rischio di contaminazione dei materiali trattati, che può

ridurne la qualità e la commerciabilità nelle fasi successive del ciclo (Hariyani et al., 2025). Inoltre, nel riciclaggio meccanico della plastica, soprattutto per via della triturazione, vi è il rischio che vengano rilasciate microplastiche nell'aria che possono essere inalate o ingerite dal personale, direttamente o indirettamente attraverso l'alimentazione di animali esposti (Nafiu et al., 2025).

I trattamenti di tipo biologico prevedono l'azione di microrganismi che in condizioni controllate, decompongono i rifiuti organici trasformandoli in acqua, anidride carbonica e semplici sostanze inorganiche, come aldeidi e acidi (European Environmental Agency, "GEMET-Environmental Thesaurus"). Le forme più diffuse di trattamento biologico sono rappresentate dal compostaggio e dalla digestione anaerobica.

Il compostaggio è un processo con cui i microrganismi trasformano i rifiuti organici in un prodotto stabile detto compost, utilizzabile come ammendante<sup>1</sup> agricolo o per il miglioramento del suolo. Attraverso il compostaggio è possibile deviare grandi quantità di rifiuti dalle discariche, limitando la produzione di metano, e allo stesso tempo restituisce carbonio e nutrienti al ciclo naturale, contribuendo sia alla fertilità dei terreni sia alla mitigazione dei cambiamenti climatici (Manea et al., 2024). La sua efficacia, però, dipende dal mantenimento di condizioni ambientali adeguate: in particolare, un controllo accurato della temperatura è essenziale, poiché valori non ottimali possono rallentare il processo e causare la formazione di odori indesiderati.

Un altro diffusissimo metodo di trattamento biologico è la digestione anaerobica, che si differenzia dal compostaggio in quanto avviene in assenza di ossigeno. Attraverso la digestione anaerobica si producono sia biogas, fonte energetica rinnovabile impiegabile per produrre elettricità e calore, e sia digestato, che può essere utilizzato come fertilizzante, rappresentando un'alternativa più sostenibile ai prodotti chimici. Questo sistema necessita di elevati costi iniziali di costruzione e manutenzione degli impianti e un monitoraggio costante per mantenere le condizioni ottimali di temperatura, pH e umidità, indispensabili per l'attività microbica (Kumar et al., 2024).

In Italia, nel 2023, la frazione organica trattata con questi metodi ha raggiunto circa 6,9 milioni di tonnellate, con un incremento del 3,8% rispetto all'anno precedente: il

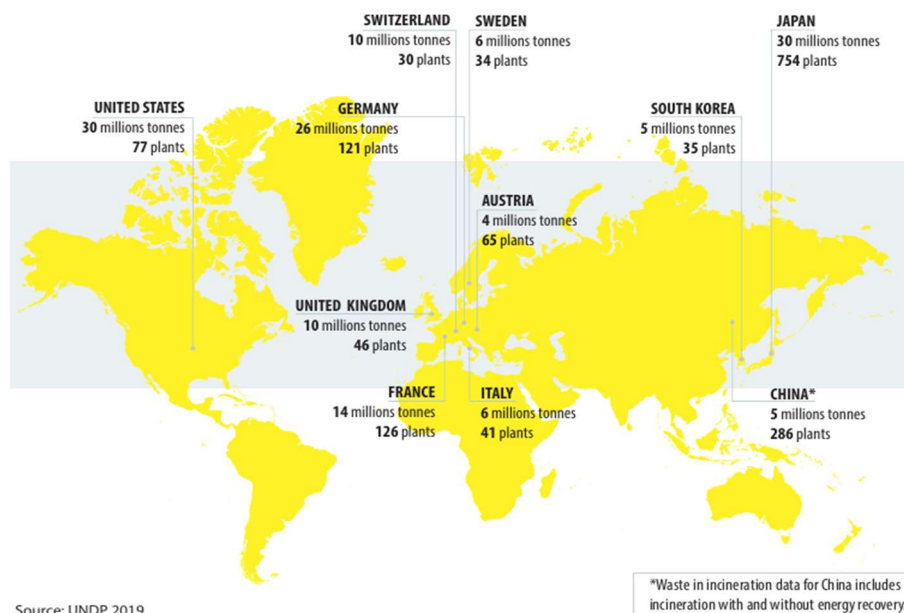
---

<sup>1</sup> Un ammendante è una sostanza naturale o artificiale aggiunta al terreno per migliorarne le caratteristiche fisiche, chimiche e biologiche.

56,8% è stato gestito in impianti integrati anaerobico-aerobici, il 36,9% tramite compostaggio e il 6,3% tramite digestione anaerobica (ISPRA, 2024) con una differenza molto ampia tra Nord e Sud, a favore della prima per la presenza di strutture più avanzate.

Vi sono infine tecniche di trattamento termico che sfruttano alte temperature per ridurre i volumi dei materiali e, in alcuni casi, recuperare energia. La misura più diffusa di trattamento termico è l'incenerimento, che attraverso la combustione controllata dei rifiuti produce ceneri, gas di combustione e calore (Hariyani et al., 2025). Negli ultimi decenni questa pratica è in netta crescita, in particolare in Europa, dove i rifiuti urbani avviati a tale pratica sono passati da 32 milioni di tonnellate nel 1995 a circa 70 milioni nel 2018 (Weghmann, 2023). Questa crescita è stimolata soprattutto dalla diffusione degli impianti denominati "Waste-to-Energy" (WtE), per cui l'energia liberata dalla combustione viene recuperata per produrre elettricità e calore, in particolare in paesi come Germania, Francia, Paesi Bassi, Svezia, Italia e Regno Unito<sup>2</sup>, che rappresentano i tre quarti della capacità di incenerimento dell'UE.

**Figura 1.1: I principali 11 Paesi per numero di impianti Waste-to-Energy (WtE) e quantità di rifiuti inceneriti con recupero energetico**



Fonte: Weghmann (2023)

<sup>2</sup> Il dato sul Regno Unito si riferisce al periodo antecedente alla Brexit

Gli impianti WtE garantiscono una riduzione della dipendenza dalle discariche, oltre a una grande capacità di distruggere sostanze pericolose o patogene e la possibilità di produrre energia da una fonte altrimenti inutilizzabile. Tali vantaggi sono però controbilanciati da diversi limiti di questi impianti, innanzitutto in termini di apporto energetico. Il contributo al fabbisogno primario di energia dell'UE, infatti, è molto basso: secondo i dati dell'Eurostat del 2018, la copertura è stata di appena il 2,4 %, l'equivalente di 40,4 milioni di tonnellate di petrolio, con valori leggermente superiori in Paesi come la Germania, dove si è registrato un contributo energetico del 4,3 % (Weghmann, 2023).

Oltre a questi limiti di natura energetica, vi sono comprovate criticità ambientali ed economico-sociali. Sul piano ambientale, gli impianti WtE contribuiscono significativamente all'aumento delle emissioni di CO<sub>2</sub>. Si stima che nel 2019 gli impianti europei di incenerimento abbiano emesso all'incirca 52 milioni di tonnellate di CO<sub>2</sub>, un valore decisamente elevato, superiore persino all'intero ammontare delle emissioni annuali di un Paese come il Portogallo. A questo si aggiunge poi la produzione di residui solidi tossici, come le ceneri volanti, che devono essere smaltiti in discariche speciali o trattati in modo specifico, con conseguente aumento dei costi e ulteriori rischi di contaminazione (Ferronato & Torretta, 2019).

Un ultimo aspetto critico da considerare è di natura economica. Gli impianti WtE prevedono infatti dei costi elevati di costruzione e gestione, sostenibili solo in presenza di forti economie di scala e di un costante afflusso di rifiuti da trattare. Secondo il World Energy Council, nel 2016 i costi di investimento variavano da 300 a 900 dollari americani per tonnellata di capacità annua, con valori più alti per gli impianti basati su tecnologie più avanzate come la gassificazione (WEC, 2016). Per quanto concerne i costi medi di capitale per la produzione di energia da rifiuti solidi urbani, sono stati registrati valori otto volte superiori rispetto a quelli di altre tipologie di impianti, come quelli a gas a ciclo combinato negli Stati Uniti (IJgosse, 2019). Queste problematiche e rigidità strutturali hanno sollevato numerose critiche da parte delle ONG e delle associazioni ambientaliste. In particolare, tali critiche si concentrano sul come l'incenerimento possa sottrarre materiali riciclabili di alto valore, come plastica, carta, tessili, riducendo così gli incentivi al riciclo e ostacolando il percorso verso una società a rifiuti zero (IJgosse, 2019).

### 1.2.3 Lo smaltimento dei rifiuti

Lo smaltimento rappresenta la fase finale del ciclo di gestione dei rifiuti, indica “qualsiasi operazione che non sia un recupero, anche se l'operazione ha come conseguenza secondaria il recupero di sostanze o di energia” (D.Lgs. 152/2006, art. 183).

Lo smaltimento avviene principalmente in discarica, con una distinzione netta tra forme controllate e non controllate (Vaverková, 2019).

Nei Paesi industrializzati, la pratica prevalente è la discarica controllata (*sanitary landfill*). Si tratta di un'opera di ingegneria progettata per lo smaltimento controllato dei rifiuti, che si differenzia nettamente dalle discariche incontrollate per la presenza di specifiche misure di protezione ambientale. Queste includono la selezione di un sito con caratteristiche geologiche adeguate, l'uso di barriere impermeabilizzanti sul fondo per prevenire la contaminazione del suolo, e sistemi per la gestione del percolato e del biogas (UNEP, 2024; Vaverková, 2019).

Nei Paesi a basso e medio reddito, invece, la mancanza di risorse e infrastrutture porta alla predominanza dello smaltimento non controllato. Le forme principali sono le discariche a cielo aperto, definite come luoghi in cui i rifiuti vengono accumulati senza alcun controllo, e la combustione a cielo aperto ovvero una forma di incenerimento dei rifiuti senza sistemi di controllo delle emissioni (UNEP, 2024). Queste pratiche informali costituiscono la principale modalità di smaltimento e sono all'origine di gravi problematiche ambientali e sanitarie a livello globale (Ferronato & Torretta, 2019).

Anche le discariche controllate, pur rappresentando la migliore pratica disponibile per lo smaltimento finale, presentano limiti strutturali e impatti ambientali e sanitari significativi. La letteratura scientifica evidenzia come queste strutture non eliminino i rischi, ma li gestiscano e li posticipino nel tempo. I due problemi principali sono la generazione di metano e la produzione di percolato (UNEP, 2024). Il metano (CH<sub>4</sub>), un gas serra prodotto dalla decomposizione anaerobica dei rifiuti organici, è uno dei principali responsabili del cambiamento climatico. Il suo potenziale climalterante è più di 80 volte superiore a quello della CO<sub>2</sub> in un orizzonte di 20 anni, e le emissioni dalle discariche sono responsabili di una parte significativa del riscaldamento globale attuale (UNEP, 2024). Il percolato, un liquido tossico che si forma dall'infiltrazione dell'acqua

attraverso i rifiuti, rappresenta una minaccia costante per la contaminazione del suolo e delle falde acquifere (Vaverková, 2019).

Inoltre, la sostenibilità a lungo termine delle discariche controllate è messa in discussione dalla durata limitata delle componenti ingegneristiche stesse. I sistemi di impermeabilizzazione e contenimento hanno infatti una vita utile limitata nel tempo e il loro inevitabile degrado futuro rischia di lasciare in eredità alle generazioni successive i costi e i rischi legati al rilascio di contaminanti. Questo trasforma ogni discarica in una potenziale passività ambientale ed economica a lungo termine (Vaverková, 2019).

Per quanto concerne gli impatti delle pratiche di smaltimento informale sono molto più gravi e immediati. Le discariche a cielo aperto provocano la contaminazione diretta delle acque superficiali e sotterranee, la proliferazione di vettori di malattie e il rilascio di plastiche e sostanze tossiche negli ecosistemi (Ferronato & Torretta, 2019). La combustione a cielo aperto, spesso praticata in questi siti per ridurre i volumi, rilascia in atmosfera inquinanti altamente nocivi come diossine, furani, black carbon e metalli pesanti. L'esposizione a queste sostanze è associata un aumento di patologie respiratorie, cardiovascolari e gastrointestinali nelle comunità locali, aggravando le condizioni di vulnerabilità sanitaria (UNEP, 2024),

Secondo i dati più recenti pubblicati dalla Banca Mondiale, circa il 37% dei rifiuti solidi urbani prodotti nel mondo viene ancora smaltito in discarica, mentre soltanto il 13,5% viene avviato al riciclo e il 5,5% al compostaggio, per un totale di appena il 19% gestito attraverso forme di recupero dei materiali. La quota restante è destinata principalmente all'incenerimento (11%) o al deposito incontrollato (circa 33%) (World Bank, 2018).

Da un punto di vista quantitativo, la percentuale di conferimento in discariche è del 37%. Nel 2022, la quota media di rifiuti urbani smaltiti in discarica nell'UE si è attestata al 24% con profonde differenze tra gli Stati membri. In Paesi come Germania e Paesi Bassi l'utilizzo di questa pratica è marginale a differenza di nazioni come Malta, Romania e Cipro dipendono ancora dalle discariche per oltre il 70% della loro gestione dei rifiuti (dati Eurostat riportati in ISPRA, 2024).

In Italia, nonostante la percentuale nazionale di smaltimento in discarica sia in continua diminuzione, attestandosi al 15,8% nel 2023 (circa 4,6 milioni di tonnellate), vi è un forte squilibrio territoriale. Gli smaltimenti in discarica, infatti, si concentrano per il 38,7% nel Sud e per il 32,9% al Centro, a fronte del 28,4% del Nord (ISPRA, 2024).

### 1.3 L' economia circolare

Negli ultimi anni, governi e istituzioni hanno gradualmente abbandonato il modello lineare dell'“estrai-produci-consuma-getta”, per adottare i principi dell'economia circolare. Quest'ultima si configura come modello economico che mira alla riduzione degli sprechi nonché al riutilizzo, riparazione e riciclo dei prodotti e dei materiali (Bourguignon, 2018).

*Figura 1.2: il modello di economia circolare*



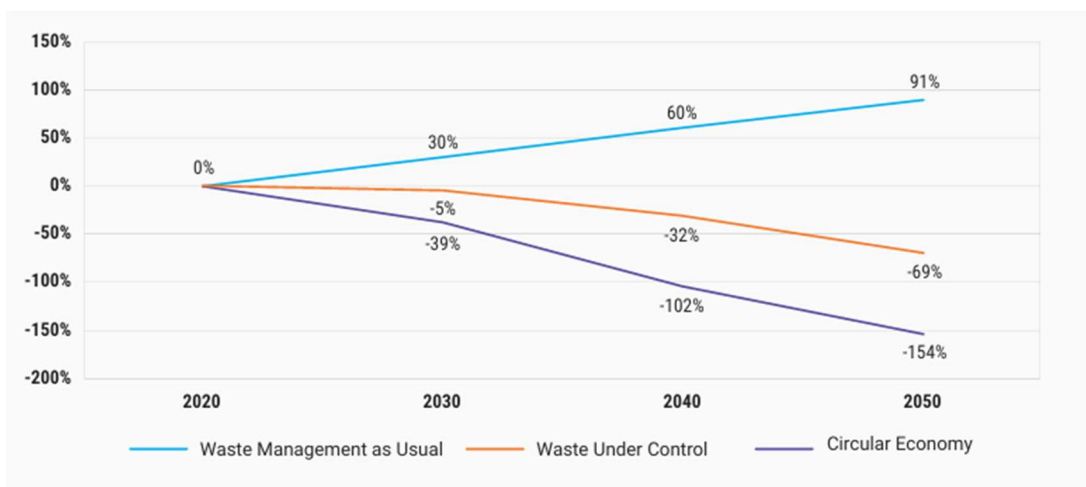
*Fonte: Parlamento Europeo (2023)*

L'attenzione verso l'economia circolare e la gestione sostenibile dei rifiuti si inserisce anche nel quadro internazionale delineato dall'Agenda 2030 delle Nazioni Unite<sup>3</sup>, che al Goal 12 promuove modelli di consumo e produzione responsabili, incoraggiando riduzione, riuso e riciclo (United Nations, 2015).

Il riutilizzo e il riciclaggio dei prodotti permetterebbero di diminuire la pressione sulle risorse naturali e limiterebbero la perdita di biodiversità, oltre a contribuire alla riduzione delle emissioni totali annue di gas serra (Parlamento Europeo, 2023).

Secondo il Global Waste Management Outlook (2024) , il passaggio ad una piena economia circolare potrebbe infatti garantire una riduzione delle emissioni globali del settore rifiuti fino al 69% , già entro il 2030 , arrivando a superare il 150% entro il 2050, (UNEP, 2024).

**Grafico 1.2: Stima dell'impatto delle emissioni di gas serra dai rifiuti rispetto al 2020, in tre scenari differenti**



Fonte: UNEP (2024), Global Waste Management Outlook

In ambito europeo, oltre ai benefici ambientali, vengono evidenziate ricadute positive anche strategiche ed economico-sociali. A livello strategico, la transizione all'economia circolare, in particolare attraverso il riciclaggio, permetterebbe una minore dipendenza dell'UE delle materie prime di cui importa circa la metà del fabbisogno,

<sup>3</sup> Adottata e approvata dall'Assemblea Generale delle Nazioni Unite il 25 settembre 2015, l'Agenda 2030 definisce un piano d'azione globale per le persone, il pianeta e la prosperità, articolato in 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile e 169 target da raggiungere entro il 2030 ( United Nations, 2015)

mitigando i rischi associati alla volatilità dei prezzi e alla scarsità delle risorse. Sul fronte economico-sociale, si stima una crescita del PIL dello 0,5 % e circa 700000 nuovi posti di lavoro nell'Unione entro il 2030 (Parlamento Europeo, 2023).

Il modello dell'economia circolare si traduce in applicazioni concrete in molti paesi, con modalità operative e strategie diverse.

Nelle Filippine è esemplare il caso della città di San Carlos, dove l'amministrazione locale, sulla base dei principi dell'economia circolare, ha promosso strategie basate sul coinvolgimento diretto della comunità attraverso sistemi di recupero a livello di quartiere e nelle scuole, affiancati da impianti centralizzati di recupero dei materiali (MRF), che differenziano i rifiuti biodegradabili e non biodegradabili. In questo modo la città è riuscita nell'intento di aumentare significativamente il tasso di deviazioni dei rifiuti dalle discariche nel giro di 7 anni, passando dal 6,4 % del 2003 al 70 % del 2010 (Atienza, 2012).

In Thailandia invece è stato adottato un approccio più sistemico, attraverso il modello "Bio-Circular-Green(BCG) economy model", basato sul concetto di economia di sufficienza, che coinvolge tutti i settori e tutte le dimensioni della società, promuovendo cambiamenti nei comportamenti di consumo, una nuova mentalità imprenditoriale e l'innovazione tecnologica per la protezione delle risorse naturali. Questo modello è stato reso operativo attraverso un Piano Strategico Quinquennale (2021-2026) che si delinea in 4 elementi chiave: la promozione della sostenibilità delle risorse biologiche, in equilibrio tra conservazione e utilizzo; il rafforzamento delle comunità e delle economie di base per creare valore aggiunto a livello locale; il potenziamento della competitività industriale attraverso l'innovazione e la produzione verde; la costruzione di una maggiore resilienza nazionale in risposta ai cambiamenti globali (Khajuria et al., 2022).

A livello europeo l'economia circolare è stata promossa anche come opportunità di business. In particolare, la città di Valladolid, in Spagna, si è distinta come una delle realtà europee più attive nella transizione circolare. L'impegno si è concretizzato attraverso un programma di sussidi che ha supportato circa cento progetti in diversi ambiti. A questo sono state affiancate altre iniziative come l'Aran Valley Innovation HUB, concepito per promuovere la creatività e i partenariati pubblico-privati, e i Circular Labs. Quest'ultima

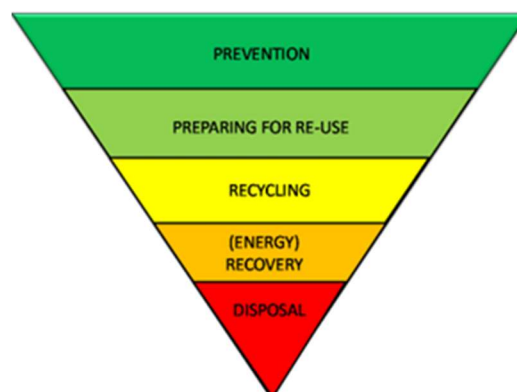
iniziativa, un progetto Interreg finanziato dall'UE, si focalizza sull'integrazione di nuovi modelli di business che mirano a ridurre gli sprechi e a massimizzare il ciclo di vita dei prodotti e delle risorse (Euro Cities, 2021).

La spinta dell'Unione Europea verso l'economia circolare si è tradotta in una strategia politica normativa, oggi rappresentata dal Circular Economy Action Plan (CEAP) del 2020. Questo pilastro del Green Deal Europeo definisce un piano d'azione con misure volte ad estendere il ciclo di vita dei prodotti, ridurre la produzione complessiva di rifiuti e mantenere le risorse nell'economia il più a lungo possibile (European Commission, 2020). Inoltre, si focalizza su settori che utilizzano la maggior parte delle risorse e in cui il potenziale di circolarità è elevato, come: elettronica e ICT; batterie e veicoli; imballaggi; plastica; tessili; edilizia ed edifici; cibo; acqua e nutrienti.

#### 1.4 Il quadro normativo di riferimento sui rifiuti

La visione strategica delineata nel Circular Economy Action Plan si innesta in un quadro giuridico consolidato per la politica comunitaria di gestione dei rifiuti, che ha come fondamento la Direttiva 2008/98/CE, nota come Direttiva Quadro sui Rifiuti. Questa direttiva ha stabilito il principio della gerarchia dei rifiuti, rappresentata da una piramide rovesciata, seguendo un ordine di priorità in cui si è prevista in primo luogo la prevenzione, seguita dalla preparazione per il riutilizzo, dal riciclo, dal recupero energetico e in ultima istanza dallo smaltimento.

*Figura 1.3: Gerarchia dei rifiuti*



*Fonte: Bourguignon (2018)*

La prevenzione si configura quindi come obiettivo primario della Direttiva Quadro volto ad intraprendere tutte le misure necessarie per evitare o ridurre la produzione dei rifiuti, mitigandone gli impatti negativi sull'ambiente salute umana (European Parliament & Council, 2008). Occorre constatare, che nonostante il ruolo primario assunto, la prevenzione viene spesso associata al concetto di riciclaggio, inteso come *“qualsiasi operazione di recupero attraverso la quale i materiali di scarto vengono ritrattati per ottenere prodotti, materiali o sostanze, sia per gli usi originali che per altri usi.”* (European Parliament & Council, 2008) e dunque quando il rifiuto è già prodotto. La prevenzione dovrebbe invece ottenersi riducendo gli imballaggi, la produzione e il consumo, e attraverso un cambio di cultura volto a evitare gli sprechi. Inoltre, per quanto concerne il recupero di energia, la diffusione degli impianti di termovalorizzazione rischia di generare fenomeni di lock-in, poiché i contratti di gestione talvolta impongono ai comuni la consegna di quantitativi minimi di rifiuti, disincentivando la riduzione a monte (Waste Management, 2023).

La direttiva quadro del 2008 ha introdotto altri due importanti principi, oltre a quello della gerarchia dei rifiuti, ossia il principio del “chi inquina paga” e il principio di “responsabilità estesa del produttore”. Il primo stabilisce che i costi di gestione dei rifiuti debbano gravare sul produttore iniziale o sul detentore, mentre il secondo attribuisce ai produttori degli obblighi finanziari e organizzativi nella fase post-consumo dei beni immessi sul mercato, promuovendo sistemi collettivi di gestione finalizzati a garantire la raccolta, il riutilizzo e il riciclo (European Parliament & Council, 2008).

La direttiva quadro del 2008 è stata modificata dalla direttiva (UE) 2018/851. Questo aggiornamento prevede l'introduzione di requisiti minimi per i regimi di responsabilità del produttore, che possono includere anche responsabilità organizzative, la responsabilità di contribuire alla prevenzione dei rifiuti e la possibilità di riutilizzare e riciclare i prodotti. Sono stati promossi l'eco-design e la disponibilità di prodotti durevoli, l'obiettivo di ridurre lo spreco alimentare del 50% entro il 2030 e nuovi target per il riciclaggio dei rifiuti urbani. Per questi ultimi si prevede un riciclaggio di almeno il 55% entro il 2025, del 60% entro il 2030 e del 65% entro il 2035 (European Parliament & Council, 2018).

In Italia, il quadro normativo sui rifiuti, come già accennato in precedenza, è rappresentato dal Testo Unico Ambientale (D.Lgs. 152/2006), che, nella sua Parte IV, ne disciplina l'intera gestione, definendo responsabilità, procedure e obblighi di tracciabilità in linea con le direttive comunitarie. Una delle innovazioni più rilevanti di questa norma è contenuta nell'art. 188-BIS, dedicato alla tracciabilità dei rifiuti, mediante l'istituzione del RENTRI, ossia il Registro Elettronico Nazionale per la Tracciabilità dei Rifiuti. Questo strumento prevede un modello digitale di gestione degli adempimenti della normativa di riferimento, come l'emissione di formulari di identificazione del trasporto e la tenuta dei registri cronologici di carico e di scarico, consentendo quindi un costante monitoraggio dei flussi dei rifiuti e di materia, basato sulla verifica di ogni codice EER e di ciascun punto di generazione del rifiuto. Oltre a semplificare gli oneri per le imprese, il RENTRI mette a disposizione della pubblica amministrazione un flusso costante di dati a supporto della pianificazione e consente alle autorità di controllo di rafforzare la prevenzione e il contrasto della gestione illecita (Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, n.d.).

Un ulteriore impulso normativo in materia di gestione dei rifiuti proviene dal PNRR, attraverso lo stanziamento di 1,5 miliardi di euro per la costruzione di nuovi impianti di trattamento e l'ammodernamento di quelli esistenti, con l'obiettivo di raggiungere il 65% di riciclo dei rifiuti plastici e il 100% di recupero nel settore tessile (Governo Italiano, 2021). Come stabilito dal DM 396/2021, il 60 % di questa cifra, pari a 900 milioni di euro, è destinata alle regioni del Centro e del Sud Italia, con interventi di miglioramento e meccanizzazione della raccolta differenziata dei rifiuti urbani, di realizzazione o revamping di impianti di trattamento/riciclo dei rifiuti urbani provenienti dalla raccolta differenziata e per la realizzazione di nuove infrastrutture e nuovi impianti di trattamento delle acque reflue, rifiuti tessili e di cuoio.

Il restante 40 %, come prevede il DM 397/2021, è destinato a sostenere dei progetti "faro" dell'economia circolare in filiere strategicamente importanti. Nello specifico, i fondi sono rivolto alla costruzione di nuovi impianti per il trattamento dei RAEE, dei rifiuti di carta e cartone, dei rifiuti di plastica e dei rifiuti tessili.

## 1.5 Transizione ad una gestione 4.0 dei rifiuti

La gestione dei rifiuti sta attraversando una profonda trasformazione, volta a superare i limiti del modello tradizionale e a favorire una maggiore coerenza con i principi dell'economia circolare e con gli indirizzi normativi più recenti. In questo scenario, l'innovazione tecnologica emerge come un fattore abilitante chiave, aprendo la strada a nuovi paradigmi operativi e organizzativi. In questo contesto entra in gioco il paradigma dell'Industria 4.0, modello di sviluppo industriale che ha origine in Germania nel 2011 (Industrie 4.0 Working Group, 2013).

L'Industria 4.0 non si riferisce ad una singola tecnologia, bensì si tratta di un nuovo paradigma di automazione e produzione basato sull'integrazione pervasiva di tecnologie digitali nei processi fisici e organizzativi, atti a dare vita ai cosiddetti "sistemi cyber-fisici" (CPS) (Lasi et al., 2014). Questo modello nasce in ambito manifatturiero diffondendosi progressivamente in molteplici settori, dimostrando la sua capacità di aumentare l'efficienza e la sostenibilità.

Esistono diverse tecnologie abilitanti l'industria 4.0. Tra quelle più rilevanti si annoverano principalmente:

- l'Internet of Things (IoT), che consente la connessione e il monitoraggio in tempo reale di oggetti, veicoli e impianti, favorendo processi decisionali più rapidi e una gestione dinamica delle risorse;
- l'Intelligenza Artificiale (AI) e big data che permettono l'elaborazione avanzata di grandi volumi di informazioni, consentendo di passare da una logica reattiva a una predittiva per ottimizzare i processi e anticipare le inefficienze (Kumar et al., 2024);
- la Blockchain che garantisce una migliore trasparenza e tracciabilità in grado di certificare i flussi informativi lungo l'intera catena del valore;
- la robotica avanzata e l'automazione che permettono una maggiore flessibilità operativa in grado di migliorare la produttività e di ridurre gli errori umani, specialmente nelle complesse fasi di selezione dei materiali (Hariyani et al., 2025).

L'adozione di queste tecnologie implica però un ripensamento complessivo dei processi organizzativi e gestionali. La gestione 4.0 non è un semplice aggiornamento tecnologico, ma un cambiamento paradigmatico che richiede un forte allineamento con la visione aziendale e un impegno a tutti i livelli dell'organizzazione (Weghmann, 2023).

Nei capitoli successivi verrà proposta una revisione sistematica della letteratura, finalizzata ad analizzare in maniera approfondita le applicazioni delle tecnologie dell'Industria 4.0 nella gestione dei rifiuti. L'obiettivo è individuare i principali filoni di ricerca, i benefici e le criticità emerse, nonché le prospettive di sviluppo per un settore che si sta configurando come sempre più strategico in chiave sostenibile e competitiva.

## **CAPITOLO II. GESTIONE 4.0 DEI RIFIUTI: UNA REVISIONE DELLA LETTERATURA**

### **2.1 Metodologia**

La revisione sistematica della letteratura è stata condotta adottando un approccio rigoroso e interdisciplinare del tema, includendo contributi riconducibili alle discipline manageriali, ambientali e ingegneristiche. L'obiettivo è stato quello di mappare le applicazioni delle tecnologie dell'Industria 4.0 nella gestione dei rifiuti, con particolare attenzione ai benefici e alle criticità che emergono da una prospettiva gestionale. L'analisi è stata guidata da tre interrogativi principali:

- RQ1: Quali tecnologie dell'Industria 4.0 sono state maggiormente applicate al waste management?

- RQ2: In quali aspetti e in quali fasi del ciclo di gestione dei rifiuti trovano applicazione queste tecnologie?

- RQ3: Quali benefici e le criticità emergono dall'adozione di tali tecnologie?

La ricerca è stata condotta su Scopus, selezionata come banca dati di riferimento per l'ampiezza della copertura e l'affidabilità dei contenuti. Sono stati individuati termini chiave da combinare in una stringa di ricerca. Dopo alcuni tentativi esplorativi, si è giunti alla seguente stringa di ricerca:

```
TITLE-ABS-KEY ( "Digital Technologies" OR "Industry 4.0" OR "Internet of Things" OR "IoT" OR "Artificial Intelligence" OR "Big Data" OR "Blockchain" ) AND ( "Waste Management" OR "Waste Collection" ) AND PUBYEAR > 2010 AND PUBYEAR < 2026 AND ( LIMIT-TO ( PUBSTAGE , "final" ) ) AND ( LIMIT-TO ( DOCTYPE , "ar" ) OR LIMIT-TO ( DOCTYPE , "re" ) ).
```

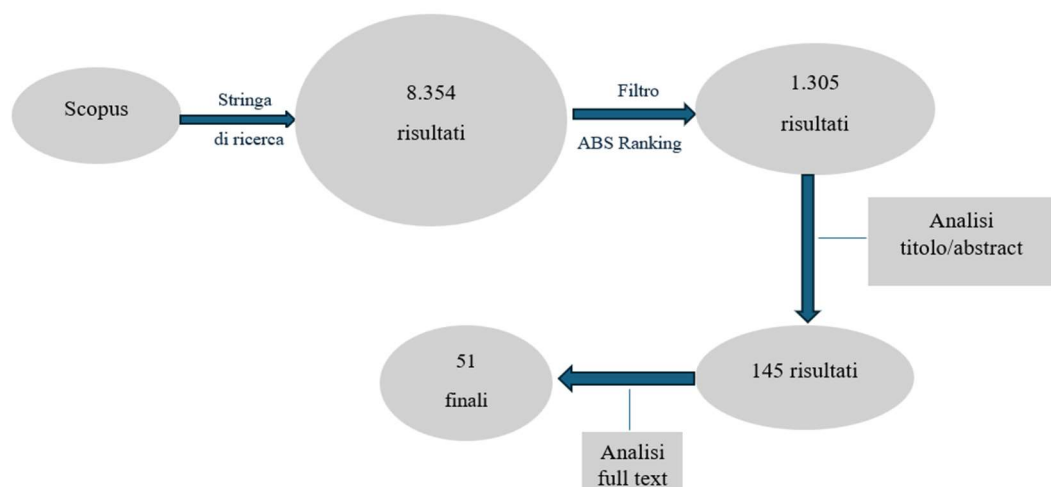
L'impostazione della ricerca riflette l'obiettivo di mappare in maniera sistematica la letteratura più recente, pubblicata dal 2011 al 2025, includendo esclusivamente articoli in versione definitiva ed evitando quelli ancora "in press". Sono stati considerati articoli di ricerca e articoli di revisione, oltre che contributi di carattere empirico e pratico come analisi di alcuni casi reali, simulazioni, studi sperimentali e prototipi (Proof of Concept)

che consentono di integrare la prospettiva teorica con evidenze operative e restituire una rappresentazione più completa dello stato dell'arte.

La query adottata su Scopus ha prodotto un totale di 8.354 risultati. Per ridurre l'ampiezza del campione, si è fatto riferimento all'ABS ranking quale criterio di qualità, ma senza applicarne in modo rigido la soglia prevista che include soltanto le riviste con valutazione pari o superiore a 3. Tale scelta metodologica è stata motivata dalla consapevolezza che l'ABS tende a sottorappresentare le aree di ingegneria ambientale e scienze applicate, che risultano invece centrali per la presente ricerca. In questo modo è stato possibile preservare la varietà disciplinare del campione e includere contributi rilevanti provenienti da ambiti scientifici spesso trascurati nelle classificazioni manageriali tradizionali. Questa impostazione ha condotto a una prima selezione di 1.305 articoli.

La fase successiva ha previsto l'analisi di titoli e abstract, procedura che ha consentito di individuare i contributi più vicini agli interrogativi di ricerca, per un totale di 145 risultati. Per ridurre l'incertezza e garantire una totale pertinenza degli articoli al tema della tesi e alle domande di ricerca, si è fatto ricorso anche alla lettura full text, ottenendo campione definitivo di 51 articoli, che costituiscono la base empirica della revisione sistematica.

*Figura 2.1: processo di reperimento della letteratura*



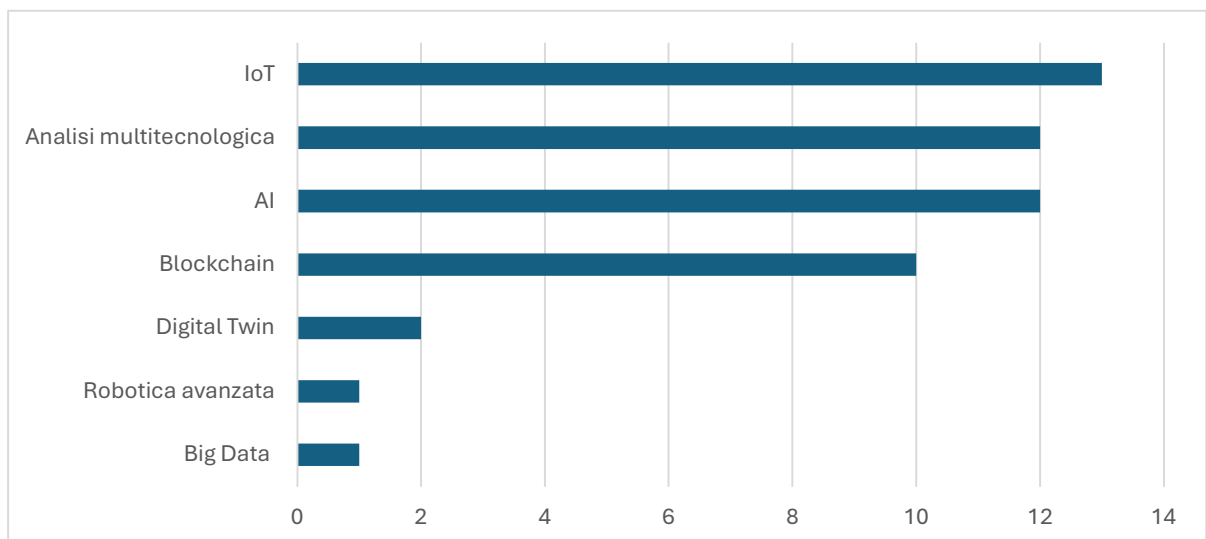
*Fonte: elaborazione personale*

## 2.2 Distribuzione delle tecnologie analizzate negli studi

Nonostante l'obiettivo della ricerca si collochi all'interno del più ampio ambito dell'Industria 4.0 applicata alla gestione dei rifiuti, la maggior parte degli studi selezionati riguarda l'analisi o lo sviluppo di una singola tecnologia digitale, piuttosto che l'adozione di un approccio integrato.

Come illustrato nella figura sottostante, tra i 51 articoli analizzati emerge una chiara prevalenza di studi dedicati all'IoT (13), all'Intelligenza Artificiale (12) e alla Blockchain (10), che insieme rappresentano quasi il 70% del campione complessivo. Risultano invece più limitati gli studi focalizzati su Digital Twin (2), Big Data (1) e Robotica Avanzata (1), sebbene tali tecnologie vengano spesso menzionate in modo complementare in altri articoli. Vi sono infine diversi studi, raggruppati sotto la categoria "Analisi multitecnologica" (13), che propongono l'utilizzo simultaneo e combinato di più tecnologie digitali nella gestione dei rifiuti o che evidenziano le potenzialità, soprattutto in un'ottica di economia circolare (Lei et al., 2022; Seyyedi et al., 2024; Ada et al., 2022).

**Grafico 2.1: Distribuzione delle tecnologie analizzate negli studi selezionati**



*Fonte: elaborazione personale da dati Scopus*

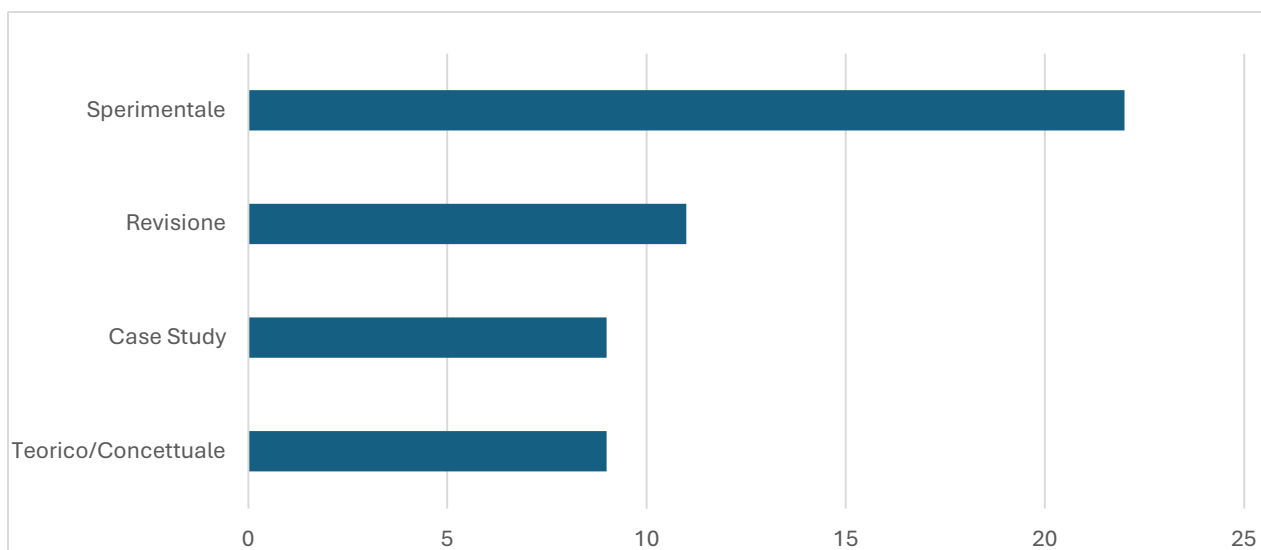
### 2.3 Analisi delle tipologie di studi

La classificazione degli articoli in base alla tipologia di studio, illustrata nella figura sottostante, consente di evidenziare la distribuzione del focus metodologico all'interno del campione.

Emerge una netta predominanza di contributi a carattere sperimentale (22), che da soli rappresentano oltre il 43% del totale. Questa categoria include lavori focalizzati sullo sviluppo e sulla validazione di modelli, sulla creazione di “Proof of Concept” o sulla conduzione di simulazioni. Seguono gli articoli di revisione della letteratura (11), che prevedono studi di sintesi e analisi critica dello stato dell’arte.

Chiudono la distribuzione, con un numero identico di articoli (9 ciascuno), i Case Study, che analizzano l'applicazione di tecnologie 4.0 in contesti reali e specifici, e gli studi di tipo Teorico/Concettuale, incentrati sulla proposta di nuovi framework o modelli teorici.

*Grafico 2.2: Tipologie di studi rappresentate nel campione*



*Fonte: elaborazione personale da dati Scopus*

## 2.4 Analisi delle keywords

*Tabella 2.1: Parole chiave con almeno due occorrenze negli articoli selezionati*

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Waste Management:12</li> <li>• Blockchain:10</li> <li>• IoT:10</li> <li>• Circular Economy: 9</li> <li>• Artificial Intelligence: 9</li> <li>• Sustainability: 6</li> <li>• Smart City: 6</li> <li>• Recycling: 5</li> <li>• Industry 4.0: 5</li> <li>• Digitalization: 5</li> <li>• Smart Waste Management: 4</li> <li>• Machine Learning: 4</li> <li>• Resource Recovery: 4</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Edge Computing: 3</li> <li>• Municipal Solid Waste: 3</li> <li>• SDGs: 3</li> <li>• Electronic Waste: 2</li> <li>• Waste Collection: 2</li> <li>• Smart Contracts: 2</li> <li>• Digital Twin: 2</li> <li>• Sustainable Development: 2</li> <li>• Life Cycle Assessment: 2</li> <li>• Forecasting: 2</li> <li>• Optimization: 2</li> <li>• Zero-waste: 2</li> <li>• Cleaner Production: 2</li> </ul>
---	--

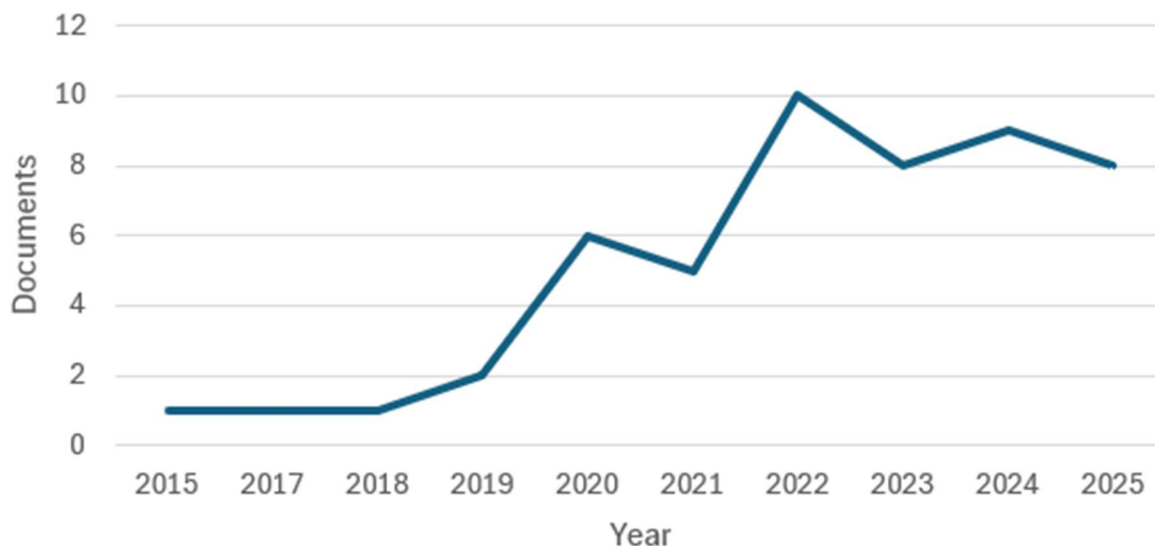
*Fonte: elaborazione personale da dati Scopus*

L'analisi delle parole chiave conferma la coerenza del campione con il focus della ricerca. La frequenza più elevata dell'espressione *Waste Management* riflette la centralità del tema all'interno della letteratura esaminata. Keywords come *IoT*, *Blockchain* e *Artificial Intelligence* risultano coerenti con quanto emerso dall'analisi delle tecnologie chiave degli studi, a conferma della loro presenza trasversale nel campione esaminato. A ulteriore conferma della focalizzazione del campione emergono con chiarezza anche keywords come *Industry 4.0*, *Digitalization* e *Smart Waste Management*, che si collegano direttamente al quadro tematico di riferimento della presente tesi.

Oltre a questa coerenza interna, l'analisi evidenzia un secondo elemento rilevante: la significativa presenza di termini legati alla dimensione ambientale, quali *Circular Economy*, *Sustainability*, *SDGs*, *Recycling* e *Resource Recovery*, indica che la prospettiva tecnologica, all'interno della letteratura esaminata, è costantemente inquadrata e motivata da obiettivi riconducibili ai paradigmi della sostenibilità e dell'economia circolare.

## 2.5 Distribuzione temporale degli articoli

*Grafico 2.3: Distribuzione temporale degli articoli*



*Fonte: elaborazione personale da dati Scopus*

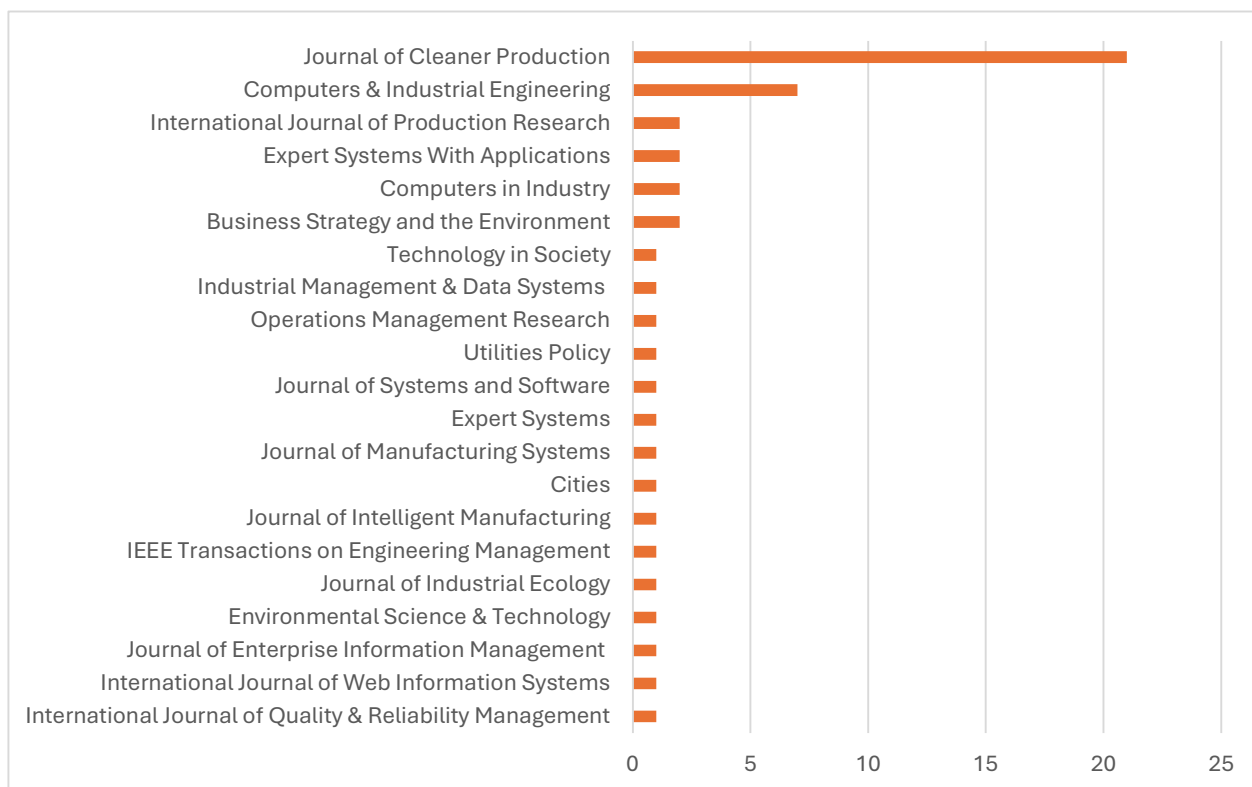
Il grafico mostra l'evoluzione del numero di studi pubblicati sul tema della gestione dei rifiuti in chiave 4.0. Nonostante nei filtri di ricerca sia stato esplicitamente dichiarato il periodo compreso tra il 2011 e il 2025, il primo articolo individuato risale al 2015.

Fino al 2018 la produzione scientifica si mantiene su livelli marginali, segno di un interesse ancora limitato verso la digitalizzazione dei processi di gestione dei rifiuti. A partire dal 2019 si osserva un incremento costante, con una crescita più marcata tra il 2020 e il 2022, anno in cui è stato raggiunto il picco di articoli pubblicati in materia. Il picco registrato in questo anno riflette verosimilmente la maturazione del dibattito accademico e l'aumento dei contributi empirici legati a progetti pilota e prototipi tecnologici. Negli anni successivi (2023–2025) si mantiene un livello di produzione di articoli elevato e relativamente stabile, segnale di un consolidamento del campo di ricerca e di un passaggio dalla fase esplorativa a quella di applicazione sistematica.

## 2.6 Analisi delle riviste accademiche

I risultati relativi alla distribuzione delle riviste evidenziano una netta predominanza del *Journal of Cleaner Production*, che da solo comprende 21 dei 51 articoli, seguito da *Computers & Industrial Engineering* con 7. Le restanti riviste presentano una presenza più marginale, con uno o due articoli ciascuno.

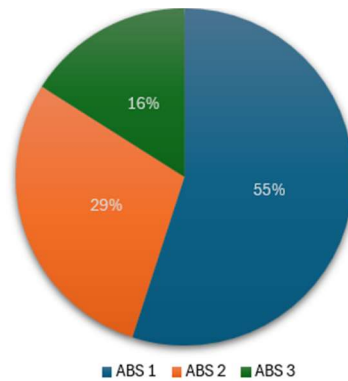
**Grafico 2.4: Parole chiave con almeno due occorrenze nella letteratura selezionata**



Fonte: elaborazione personale da dati Scopus

Il grafico a torta relativo alla distribuzione degli ABS ratings mostra come oltre l'80% delle riviste analizzate si collochi al di sotto della fascia 3, con una prevalenza del 55% in fascia 1, 31% in fascia 2 e solo del 14% in fascia 3. Proprio tale evidenza giustifica l'estensione metodologica del campione ad articoli di valutazione 1 e 2, scelta necessaria per rappresentare in modo realistico la produzione accademica sul tema e includere riviste centrali come *Journal of Cleaner Production* (ABS 1) e *Computers & Industrial Engineering* (ABS 2).

**Grafico 2.5: Distribuzione percentuale delle riviste per classe ABS ranking**

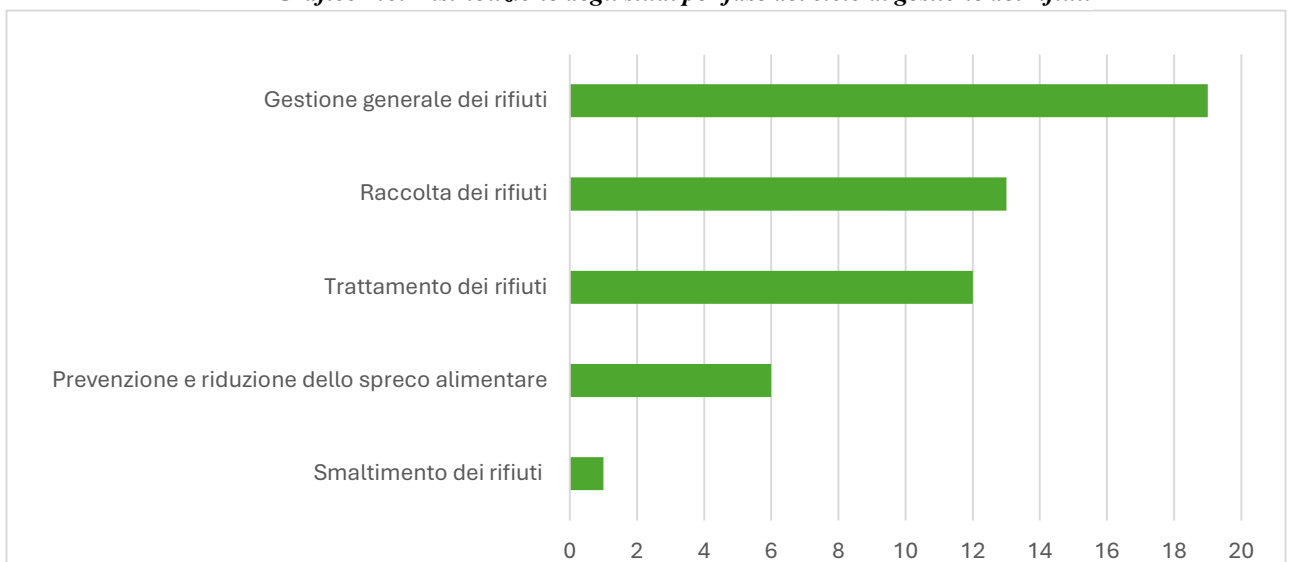


Fonte: elaborazione personale da dati Scopus

## 2.7 Le fasi del ciclo di gestione dei rifiuti

Dall'analisi della distribuzione delle fasi del ciclo di gestione dei rifiuti emerge che, al di là della categoria più ampia di "gestione generale dei rifiuti" (19), quindi priva di un focus specifico su una singola fase del ciclo di gestione, la maggior parte degli studi si concentra sulle fasi iniziali del processo, in particolare sulla raccolta (13).

**Grafico 2.6: Distribuzione degli studi per fase del ciclo di gestione dei rifiuti**



Fonte: elaborazione personale da dati Scopus

Seguono, con minore incidenza, i contributi dedicati alla prevenzione e riduzione dello spreco alimentare (6), che si collocano in una prospettiva più specifica ma coerente con gli obiettivi dell'economia circolare, e quelli relativi al trattamento e recupero dei

materiali (12). Lo smaltimento dei rifiuti risulta invece quasi del tutto assente nel campione analizzato, con un solo articolo che ne affronta il problema in maniera concreta.

## 2.8 Distribuzione geografica degli studi

*Tabella 2.2: Distribuzione geografica degli studi*

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cina: 7</li> <li>• India: 6</li> <li>• Italia: 4</li> <li>• Turchia: 4</li> <li>• Iran: 3</li> <li>• Grecia: 3</li> <li>• Indonesia: 3</li> <li>• Regno Unito: 3</li> <li>• Brasile: 2</li> <li>• Corea del Sud: 2</li> <li>• Pakistan: 2</li> <li>• USA: 2</li> <li>• Portogallo: 2</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Germania: 1</li> <li>• Russia: 1</li> <li>• Finlandia: 1</li> <li>• Tunisia: 1</li> <li>• Svezia: 1</li> <li>• Vietnam: 1</li> <li>• EAU: 1</li> <li>• Oman: 1</li> <li>• Sudafrica: 1</li> <li>• Nigeria: 1</li> <li>• Taiwan: 1</li> <li>• Filippine: 1</li> </ul>
--	---

*Fonte: elaborazione personale da dati Scopus*

L'analisi della provenienza geografica degli articoli evidenzia una distribuzione fortemente sbilanciata, con una marcata concentrazione della produzione scientifica in Asia e, in misura minore, in Europa. Oltre la metà del campione complessivo proviene infatti da Paesi asiatici, verosimilmente in ragione della crescente attenzione di quest'area verso l'innovazione tecnologica e digitale applicata alla gestione dei rifiuti. All'interno di questo gruppo, Cina e India rappresentano circa un quarto del totale degli studi analizzati, seguite da contributi provenienti da Indonesia, Iran, Corea del Sud e Pakistan. L'Europa costituisce la seconda area per volume di pubblicazioni, con una presenza significativa di studi provenienti da Italia e Turchia. La presenza americana risulta invece molto più contenuta, con quattro studi complessivi, di cui due condotti negli Stati Uniti e due in Brasile. Ancora più marginale appare il contributo del continente africano, rappresentato da sole tre nazioni: uno studio congiunto tra Sudafrica e Nigeria e un altro realizzato in Tunisia.





**Tabella 2.3: Elenco e classificazione dei 51 articoli selezionati nella revisione sistematica**

<b>Autori</b>	<b>Anno</b>	<b>Titolo</b>	<b>Rivista</b>	<b>Keywords</b>	<b>ABS RATING</b>	<b>Tipologia di studio</b>	<b>Tecnologia chiave dello studio</b>	<b>Fase della gestione rifiuti analizzata</b>	<b>Paese/i in cui è stato condotto lo studio</b>
Ada et al.	2022	Smart technologies for collection and classification of electronic waste	International Journal of Quality & Reliability Management	Electronic waste ; Collection and classification ; Smart technologies ; Fuzzy ANP ; Fuzzy VIKOR	2	Teorico/Concettuale	Analisi multitecnologica	Raccolta dei rifiuti	Turchia
Anagnostopoulos et al.	2015	Assessing dynamic models for high priority waste collection in smart cities	Journal of Systems and Software	IoT ; Smart City ; Dynamic routing models ; Waste collection	2	Sperimentale	IoT	Raccolta dei rifiuti	Grecia
Asif et al.	2024	Robotic disassembly of end-of-life products with a focus on task and motion planning	Journal of Manufacturing Systems	Electric vehicles ; Lithium-ionbatteries ; Robotic disassembly ; Recycling ; Circular Economy ; Task and motion planning	1	Revisione	Robotica avanzata	Trattamento dei rifiuti	Finlandia
Atofarati et al.	2025	Sustainable smart waste management solutions for rapidly urbanizing African cities: A systematic literature review	Utilities Policy	Smart waste management ; Sustainable urban development ; Emerging technologies in waste management ; Waste-to-energy solutions ; Climate change mitigation	1	Revisione	Analisi multitecnologica	Gestione generale dei rifiuti	Sudafrica; Nigeria
Aytaç et al.	2021	IoT based intelligence for proactive waste management in Quick Service Restaurants	Journal of Cleaner Production	IoT ; Waste management ; Edge Computing ; Quick service restaurants ; Anomaly detection	1	Sperimentale	IoT	Prevenzione e riduzione dello spreco alimentare	Turchia
Bagheri et al.	2017	Application of artificial intelligence for the management of landfill leachate penetration into groundwater, and assessment of its environmental impacts	Journal of Cleaner Production	Leachate penetration ; Groundwater ; Pollution control ; Fuzzy logic; Neural networks	1	Sperimentale	AI	Smaltimento dei rifiuti	Iran
Bamakan et al.	2022	Towards blockchain-based hospital waste management systems; applications and future trends	Journal of Cleaner Production	Blockchain ; Green healthcare ; Hospital waste ; Waste generation ; IoT	1	Revisione	Blockchain	Gestione generale dei rifiuti	Iran
Baralla et al.	2023	Waste management: A comprehensive state of the art about the rise of blockchain technology	Computers in Industry	Blockchain ; Smart contracts ; Waste management ; Circular Economy ; Urban waste ; Sustainability	3	Revisione	Blockchain	Gestione dei rifiuti	Italia
Cao et al.	2023	Digital twin-driven multi-period COVID-19 medical waste clearance scheme under the circular economy: Location-transport integrated optimization	Computers & Industrial Engineering	COVID-19 medical waste location-transport ; Digital Twin ; Infection probability ; Uncertainty ; Robust optimisation ; Bi-level mixed-integer programming model	2	Case Study	Digital Twin	Raccolta dei rifiuti	India
Castiglione et al.	2023	A framework for achieving a circular economy using blockchain technology in a sustainable waste management system	Computers & Industrial Engineering	Blockchain ; Waste management ; Circular Economy ; Smart City ; Digital supply chain ; Sustainability	2	Teorico/Concettuale	Blockchain	Gestione dei rifiuti	Italia
Chen et al.	2023	Towards a circular economy: Recapturing battery, metal, and plastic from soil-size and gravel-size municipal solid waste incineration bottom ash using convolutional neural networks	Journal of Cleaner Production	Waste management ; Incineration bottom ash ; Convolutional neural networks ; Municipal solid waste; Artificial Intelligence	1	Sperimentale	AI	Trattamento dei rifiuti	Taiwan
Cicullo et al.	2022	Exploring the potential of business models for sustainability and big data for food waste reduction	Journal of Cleaner Production	Food waste reduction ; Sustainable business model ; Big Data	1	Teorico/Concettuale	Big Data	Prevenzione e riduzione dello spreco alimentare	Italia
Fatimah et al.	2020	Industry 4.0 based sustainable circular economy approach for smart waste management system to achieve sustainable development goals: A case study of Indonesia	Journal of Cleaner Production	Sustainability; Sustainable circular economy ; Smart waste management ; Maturity model ; IoT ; SDGs ; Industry 4.0	1	Case Study	IoT	Gestione generale dei rifiuti	Indonesia
Feng et al.	2024	The influence of carbon emission reduction instruments on blockchain technology adoption in recycling batteries of the new energy vehicles	International Journal of Production Research	Electric vehicle battery recycling ; new energy vehicle ; Blockchain ; carbon emission reduction ;carbon emission policies ; game theory	3	Teorico/Concettuale	Blockchain	Trattamento dei rifiuti	Cina
Ferrari et al.	2020	An innovative IoT-oriented prototype platform for the management and valorisation of the organic fraction of municipal solid waste	Journal of Cleaner Production	Organic Fraction of Municipal Solid Waste ; Inertization and Valorisation ; IoT-oriented Prototype Platform	1	Sperimentale	IoT	Trattamento dei rifiuti	Italia
França et al.	2020	Proposing the use of blockchain to improve the solid waste management in small municipalities	Journal of Cleaner Production	Blockchain; Crypto-coin ; Cryptocurrency ; Solid waste ; Sustainability ; Social inclusion ; SDGs	1	Teorico/Concettuale	Blockchain	Gestione generale dei rifiuti	Brasile
Gao et al.	2025	Industrial solid waste recycling using digital servitisation for decarbonisation to promote Net zero in the circular economy	Computers & Industrial Engineering	Industrial solid waste ; Circular Economy ; Improved Fuzzy C-means clustering algorithm ; Modified Convolutional Neural Network ; Algorithm (MCNN) ; Artificial Intelligence ; Blockchain	2	Teorico/Concettuale	Analisi multitecnologica	Trattamento dei rifiuti	Cina
Gong et al.	2022	Blockchain?based recycling and its impact on recycling performance: A network theory perspective	Business Strategy and the Environment	Blockchain ; Circular economy ; network theory ; recycling chain ; Sustainability ; sustainable supply chain	3	Case study	Blockchain	Trattamento dei rifiuti	Regno Unito; Cina

Gue et al.	2022	Predicting waste management system performance from city and country attributes	Journal of Cleaner Production	Artificial Intelligence ; Urban metabolism ; Circular urban economies ; Sustainable development ; Interpretable model ; Decision support system	1	Sperimentale	AI	Gestione generale dei rifiuti	Filippine
Huang et al.	2025	Utilising Artificial Intelligence to Enhance Firm Circular Economy Maturity: A Thematic Review	Business Strategy and the Environment	Artificial Intelligence ; circular economy maturity ; Machine Learning ; thematic review	3	Revisione	AI	Gestione generale dei rifiuti	Regno Unito
Hübner et al.	2024	Machine-learning-based demand forecasting against food waste: Life cycle environmental impacts and benefits of a bakery case study	Journal of Industrial Ecology	Artificial Intelligence ; bakery returns ; demand forecasting; indirect effects ; industrial ecology ; life cycle assessment	2	Case Study	AI	Prevenzione e riduzione dello spreco alimentare	Germania
Iqbal	2024	Waste management of multiple food products through IoT enabled preservation and secondary supply chains	Computers & Industrial Engineering	Secondary supply chain management ; Food waste recycling ; IoT enabled preservation ; Nonlinear programming and optimization	2	Sperimentale	IoT	Prevenzione e riduzione dello spreco alimentare	Pakistan
Iqbal et al.	2024	A secondary supply chain model on food waste management incorporating IoT based technology	Journal of Cleaner Production	Food supply chain management ; Secondary supply chain management ; Food recycling ; Circular economy of food ; Waste control ; IoT controlled inspection and preservation	1	Sperimentale	IoT	Prevenzione e riduzione dello spreco alimentare	Pakistan; Corea Del Sud
Jammeli et al.	2021	Sequential Artificial Intelligence Models to Forecast Urban Solid Waste in the City of Sousse, Tunisia	IEEE Transactions on Engineering Management	ANN ; bidirectional long short-term memory (BLSTM) ; forecasting; long short-term memory (LSTM) ; support vector machine (SVM) ; urban solid waste (USW)	3	Sperimentale	AI	Raccolta dei rifiuti	Tunisia
Jiang et al.	2023	Blockchain technology applications in waste management: Overview, challenges and opportunities	Journal of Cleaner Production	Waste management ; Blockchain ; Digital transition ; Sustainable development ; Circular economy ; Life cycle assessment	1	Revisione	Blockchain	Gestione generale dei rifiuti	Cina
Joshi et al.	2022	Internet of things and machine learning-based approaches in the urban solid waste management: Trends, challenges, and future directions	Expert Systems	artificial neural network ; convolutional neural network; edge computing; IoT ; Machine Learning ; solid waste management	2	Revisione	Analisi multitecnologica	Gestione generale dei rifiuti	India
Kang et al.	2020	Electronic waste collection systems using Internet of Things (IoT), Household electronic waste management in Malaysia	Journal of Cleaner Production	Electronic waste ; Mobile apps ; Smart solid waste systems; Recycling in Malaysia ; Smart City ; SDGs	1	Sperimentale	IoT	Raccolta dei rifiuti	Malesia
Kazancoglu et al.	2021	A proposed sustainable and digital collection and classification center model to manage e-waste in emerging economies	Journal of Enterprise Information Management	Digitalization ; Data-driven technologies ; Sustainability ; Waste management ; Electronic waste ; Forecasting ; Grey method	2	Teorico/Concettuale	Analisi multitecnologica	Raccolta dei rifiuti	Turchia
Khan et al.	2025	Biochar-augmented anaerobic digestion system: Insights from an interpretable stacking ensemble deep learning model for methane yield optimization and stability prediction	Environmental Science & Technology	Artificial Intelligence; optimization ; memetic algorithm ; Resource recovery ; Waste management	3	Sperimentale	AI	Trattamento dei rifiuti	Stati Uniti
Kurniawan et al.	2023	Strengthening waste recycling industry in Malang (Indonesia) for promoting sustainable urban waste practices: a strategy to accelerate sustainability transition through digitalization-based circular economy	Journal of Cleaner Production	Circular Economy ; Digitalization ; Industry 4.0 ; Resource recovery ; Zero-waste	1	Case study	Analisi multitecnologica	Gestione generale dei rifiuti	Indonesia
Kurniawan et al.	2022	Unlocking digital technologies for waste recycling in Industry 4.0 era: A transformation towards a digitalization-based circular economy in Indonesia	Journal of Cleaner Production	Circular Economy ; Cleaner production ; Digitalization ; Resource recovery ; Zero-waste	1	Case study	Analisi multitecnologica	Gestione generale dei rifiuti	Indonesia
Lei et al.	2023	How do different Industry 4.0 technologies support certain circular economy practices?	Industrial Management & Data Systems	Industry 4.0 ; Technology adoption ; Circular economy practices ; Social network analysis	2	Revisione	Analisi multitecnologica	Gestione generale dei rifiuti	Cina; Regno Unito
Maiurova et al.	2022	Promoting digital transformation in waste collection service and waste recycling in a smart city: applying circular economy in Moscow (Russia) to mitigate climate change effects on the environment	Journal of Cleaner Production	Climate change ; Digitalization ; Resource recovery ; Smart city ; Zero emission	1	Case study	Analisi multitecnologica	Gestione generale dei rifiuti	Russia
Mastos et al.	2020	Industry 4.0 sustainable supply chains: An application of an IoT enabled scrap metal management solution	Journal of Cleaner Production	Sustainable supply chain management (SSCM) ; Industry 4.0 ; IoT ; Smart waste management	1	Case Study	IoT	Raccolta dei rifiuti	Grecia
Oliveira et al.	2019	Artificial neural network modelling of the amount of separately-collected household packaging waste	Journal of Cleaner Production	Municipal solid waste ; ANN ; Genetic algorithm ; Regression model ; Urban waste ; Recycling	1	Sperimentale	AI	Raccolta dei rifiuti	Portogallo
Oliveira Neto et al.	2025	Artificial intelligence-based optimization of the WEEE reverse chain in São Paulo ? Brazil to promote economic, environmental and social benefits	Journal of Cleaner Production	Reverse logistic ; WEEE ; Optimization ; Artificial Intelligence ; Environmental assessment ; Economic assessment ; Social benefits	1	Sperimentale	AI	Raccolta dei rifiuti	Brasile
Omar et al.	2024	Using blockchain technology to achieve sustainability in the hospitality industry by reducing food waste	Computers & Industrial Engineering	Food waste management ; Hospitality industry ; Food sustainability ; Blockchain ; Smart contracts	2	Sperimentale	Blockchain	Prevenzione e riduzione dello spreco alimentare	Emirati Arabi Uniti; Stati Uniti

Palagan et al.	2025	Predictive analysis-based sustainable waste management in smart cities using IoT edge computing and blockchain technology	Computers in Industry	Blockchain ; Edge computing ; IoT ; Machine Learning ; Random Forest (RF) Model ; Real-time waste monitoring ; Smart waste management	3	Sperimentale	Analisi multitecnologica	Raccolta rifiuti	dei	India; Oman
Roy et al.	2022	IoT-based smart bin allocation and vehicle routing in solid waste management: A case study in South Korea	Computers & Industrial Engineering	IoT-based smart bin ; Waste collection ; Variable neighborhood search with ant colony optimization (VNS-ACO) ; Vehicle routing	2	Case Study	IoT	Raccolta rifiuti	dei	Corea del Sud
Saad et al.	2025	Empowering citizen scientists: A web app for plastic litter classification	Expert Systems With Applications	Web application ; Plastic waste ; Machine Learning ; Waste characterization ; Roboflow ; YOLO	1	Sperimentale	AI	Raccolta rifiuti	dei	Malesia
Sahoo et al.	2021	A unified blockchain-based platform for global e-waste management	International Journal of Web Information Systems	Supply chain; Traceability; Blockchain; Smart contracts; E-waste management	1	Sperimentale	Blockchain	Gestione generale rifiuti	dei	India
Scott et al.	2023	Bringing trust and transparency to the opaque world of waste management with blockchain: A Polkadot parathread application	Computers & Industrial Engineering	Blockchain ; Polkadot ; Waste management ; Supply chain ; Gamification ; Recycling	2	Sperimentale	Blockchain	Trattamento rifiuti	dei	Portogallo
Seker	2022	IoT based sustainable smart waste management system evaluation using MCDM model under interval-valued q-rung orthopair fuzzy environment	Technology in Society	Waste management ; IoT ; Uncertainty ; MCDM	2	Sperimentale	IoT	Gestione generale rifiuti	dei	Turchia
Seyyedi et al.	2024	A comprehensive review integration of digitalization and circular economy in waste management by adopting artificial intelligence approaches: Towards a simulation model	Journal of Cleaner Production	Digitalization ; Circular Economy ; Waste management ; Artificial Intelligence ; Simulation methods ; IoT	1	Revisione	Analisi multitecnologica	Gestione generale rifiuti	dei	Iran
Sharma et al.	2020	Internet of Things (IoT) adoption barriers of smart cities' waste management: An Indian context	Journal of Cleaner Production	IoT barriers ; Waste management ; Smart City ; MCDM methods ; TISM ; Fuzzy MICMAC ; DEMATEL	1	Revisione	IoT	Gestione generale rifiuti	dei	India
Thürer et al.	2019	Internet of Things (IoT) driven kanban system for reverse logistics: Solid waste collection	Journal of Intelligent Manufacturing	Reverse logistics ; Solid waste collection ; Kanban ; IoT	1	Teorico/Concettuale	IoT	Raccolta rifiuti	dei	Cina
Tian et al.	2025	Furnace temperature control based on interval type-2 fuzzy broad learning system for municipal solid waste incineration process	Expert Systems With Applications	Municipal solid waste incineration ; Interval type-2 fuzzy control ; Event triggering mechanism ; Broad learning system ; Simulation platform ; Artificial intelligence application	1	Sperimentale	AI	Trattamento rifiuti	dei	Cina
Vimal et al.	2024	Digital technology adoption model for electric vehicle battery recycling supply chain - an influential relationship mapping	Operations Management Research	Digital technology ; Electric vehicle ; Electric vehicle battery supply chain ; Contextual relationship ; Recycling	1	Teorico/Concettuale	Analisi multitecnologica	Trattamento rifiuti	dei	India
Wang et al.	2018	Digital twin-based WEEE recycling, recovery and remanufacturing in the background of Industry 4.0	International Journal of Production Research	WEEE ; waste electronics ; remanufacturing ; Digital Twin ; Industry 4.0	3	Sperimentale	Digital Twin	Trattamento rifiuti	dei	Svezia
Yang et al.	2021	Prediction of gas yield generated by energy recovery from municipal solid waste using deep neural network and moth-flame optimization algorithm	Journal of Cleaner Production	Energy recovery ; Municipal solid waste ; Cleaner production ; Moth-flame optimization ; Deep neural network	1	Sperimentale	AI	Trattamento rifiuti	dei	Vietnam ; Cina
Zoumpoulis et al.	2024	Smart bins for enhanced resource recovery and sustainable urban waste practices in smart cities: A systematic literature review	Cities	Smart bin ; Sensing ; Waste management ; Recycling ; Waste separation ; Smart City	2	Revisione	IoT	Gestione generale rifiuti	dei	Grecia

Fonte: elaborazione personale da dati Scopus



## CAPITOLO III. ANALISI DELLE TECNOLOGIE 4.0 NELLA GESTIONE DEI RIFIUTI

### 3.1 Internet of Things

L'Internet of Things (IoT) può essere definito come un ecosistema di dispositivi digitalmente incorporati, in grado di comunicare e scambiare dati grazie al supporto delle reti internet. Questi dispositivi, definiti “smart objects”, possono essere integrati in veicoli o infrastrutture, oppure distribuiti nell'ambiente (Sharma et al., 2020).

L'architettura IoT si compone comunemente di tre livelli:

- uno strato personale, caratterizzato dalla presenza di dispositivi in grado di percepire, rilevare oggetti, raccogliere e scambiare informazioni;
- uno strato di rete, che gestisce il trasferimento dei dati dallo strato precedente allo strato applicativo, tenendo conto delle capacità computazionale dei dispositivi e dei limiti della rete;
- uno strato applicativo, dove le applicazioni intelligenti vengono implementate per formare ecosistemi smart (Sharma et al., 2020).

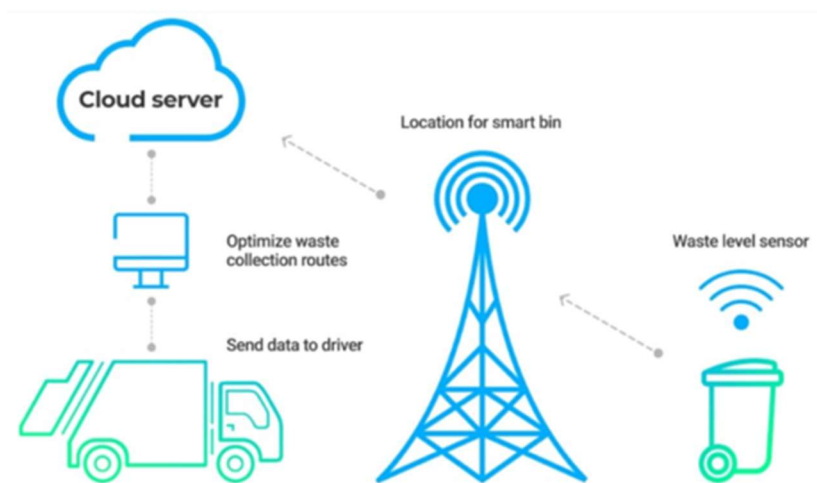
Nell'ambito della gestione dei rifiuti, questa configurazione si concretizza attraverso diverse componenti. La componente di base è tipicamente rappresentata dai sensori, dispositivi applicati sui cassonetti in grado di rilevare in tempo reale diversi parametri legati ai conferimenti. Tra le tipologie di sensori più diffusi si annoverano:

- sensori a ultrasuoni, utilizzati per misurare il volume di riempimento;
- celle di carico, che monitorano il peso complessivo;
- sensori che rilevano temperatura e umidità, anche a fini di prevenzione degli incendi;
- sensori di gas, che rilevano sostanze come metano o butano, contribuendo a mitigare i rischi per la salute
- sensori di composizione, per una prima identificazione dei materiali (Zoumpoulis et al., 2024).

I dati raccolti dai sensori sono poi gestiti da unità di controllo o microcontrollori, che elaborano le informazioni e le trasmettono tramite moduli di comunicazione wireless/Wi-Fi (Zoumpoulis et al., 2024). A tali tecnologie si affiancano sistemi di identificazione, come i tag a radiofrequenza (RFID), che permettono di associare i conferimenti a specifici utenti, documentando le operazioni in modo elettronico (Seker, 2022; Berg et al., 2020).

Le informazioni così acquisite vengono infine inviate a piattaforme basate su cloud, dove sono archiviate ed elaborate, costituendo la base informativa per le decisioni delle autorità competenti nella pianificazione e gestione delle operazioni di raccolta (Seker, 2022).

**Figura 3.1: Architettura IoT standard di un sistema di gestione dei rifiuti**

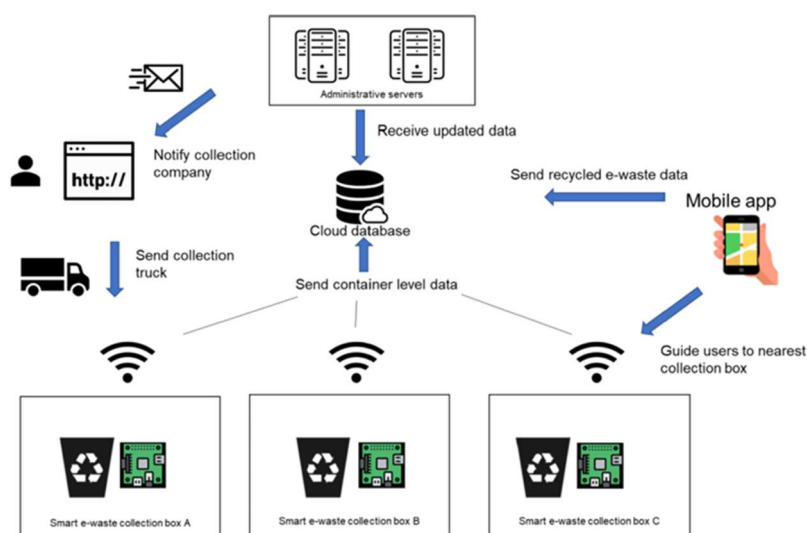


*Fonte: Seker (2022)*

Un esempio di modello IoT è descritto nello studio di Kang et al. (2020), condotto in Malesia e focalizzato sulla gestione di una particolare categoria di rifiuti, ossia i RAEE (rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche). Il modello proposto dagli autori si basa sostanzialmente su “smart e-waste collection boxes”, contenitori intelligenti di piccole dimensioni in cui confluiscono tali rifiuti, progettati con aperture controllate per evitare accessi non autorizzati. Questi contenitori sono dotati di sensori a ultrasuoni, di una scheda Arduino e di moduli di trasmissione wireless, in grado di misurare il livello di

riempimento e inviare i dati ad un server cloud centralizzato (Kang et al., 2020). Al raggiungimento di una soglia di riempimento predefinita, il sistema invia automaticamente una notifica alla società incaricata, che può così organizzare la raccolta. Il sistema opera in “sleep mode” per ridurre i consumi energetici, attivandosi solo al momento del conferimento attraverso la scansione di un QR code da parte dell’utente. L’intero processo è supportato da un’applicazione mobile che permette ai cittadini di localizzare i punti di raccolta più vicini, registrare i conferimenti e caricare le immagini degli oggetti smaltiti (Kang et al., 2020).

*Figura 3.2: Architettura IoT per la raccolta intelligente dei RAEE proposta dagli autori*



*Fonte: Kang et al. (2020)*

Un modello simile è stato proposto da Ferrari et al. (2020) in un articolo di ricerca incentrato sull'upscaling dei processi di stabilizzazione, inertizzazione e valorizzazione della frazione organica dei rifiuti solidi urbani (FORSU). La ricerca ha condotto alla realizzazione della piattaforma prototipale POIROT (Prototype of Innovative Recycling of Organic Waste Treatment), in cui l'IoT è funzionale alla trasformazione di tali rifiuti in pannelli o mattoni completamente inerti e sterilizzati, destinati in particolar modo all'ambito edilizio. La piattaforma integra componenti hardware e un'infrastruttura ICT innovativa per monitorare in tempo reale i parametri fisico-chimici del processo, tra cui temperatura, umidità e pH, mediante sensori basati su tecnologia Arduino. La tracciabilità dell'intera filiera, dal riconoscimento e registrazione del cittadino abilitato che conferisce

il rifiuto fino alla gestione post-produzione, è garantita dalla tecnologia RFID, mentre tutti i dati raccolti vengono archiviati e gestiti su un'apposita piattaforma cloud (Ferrari et al., 2020). Una diversa declinazione dell'architettura IoT nella gestione dei rifiuti si riscontra in ambito B2B. Nello specifico, Mastos et al. (2020) analizzano un caso di studio sviluppato in Grecia nell'ambito del progetto europeo COMPOSITION<sup>1</sup>, relativo alla gestione dei rottami metallici basato sull'Internet of Things. Lo studio ha coinvolto l'azienda produttrice di ascensori KLEEMANN Hellas S.A., generatrice di rottami metallici, ed ELDIA S.A., azienda leader nella gestione e nel riciclo dei rifiuti, con l'obiettivo di migliorare l'efficienza della catena di approvvigionamento e automatizzare il monitoraggio. Per raggiungere tale scopo sono stati equipaggiati dei sensori a infrarossi nei cassonetti interni più piccoli e sensori a ultrasuoni nei grandi cassoni esterni, in grado di rilevare il livello di riempimento e trasmettere i dati a una piattaforma cloud centralizzata. Il sistema di monitoraggio in tempo reale, accessibile via web, fornisce poi una rappresentazione visiva dei dati raccolti. Per facilitare la comprensione immediata da parte dell'utente, l'interfaccia utilizza una rappresentazione cromatica: il colore verde indica un bidone quasi vuoto (livello inferiore al 50%), l'arancione un riempimento intermedio (oltre il 50%), e il rosso segnala un contenitore quasi pieno (oltre l'80%). Il sistema consente inoltre di visualizzare lo stato della batteria dei sensori e l'orario dell'ultima misurazione, garantendo così un controllo costante e in tempo reale delle condizioni operative (Mastos et al., 2020).

Il modello IoT può fungere poi come supporto alla gestione dei mezzi di raccolta dei rifiuti nel loro percorso, sulla base delle condizioni effettive dei cassonetti monitorati (Joshi et al., 2021). In questo ambito, Anagnostopoulos et al. (2015) trattano un modello di routing dinamico fondato sui dati generati dai cassonetti. Nello specifico, tali cassonetti sono dotati di sensori di capacità che inviano alert in tempo reale al sistema centrale quando il livello di riempimento supera una soglia predefinita. L'aspetto dinamico risiede nella possibilità di riadattare i percorsi dei veicoli adibiti alla raccolta durante l'esecuzione del piano, in risposta a tali segnalazioni. I veicoli, dotati di sistemi GPS, possono essere riassegnati in funzione della loro posizione, così da garantire un intervento

---

<sup>1</sup> Il progetto europeo COMPOSITION mirava a sviluppare un Sistema Integrato di Gestione delle Informazioni (IIMS) per ottimizzare la supply chain manifatturiera. L'obiettivo era creare un ecosistema per connettere dati e servizi tra le aziende, affrontando le sfide legate all'integrazione di dati eterogenei e alla loro condivisione sicura. <https://www.composition-project.eu/>

tempestivo nelle aree sensibili ed alta priorità, come ospedali e scuole (Anagnostopoulos et al., 2015).

Un altro esempio è rappresentato dallo studio di Roy et al. (2022), in cui viene presentato un modello di raccolta basato su cassonetti dotati di sensori. Anche in questo caso, al raggiungimento di una soglia predefinita, come ad esempio l'80%, vengono inviate notifiche alle autorità di gestione dei rifiuti, con la particolarità che possono ricevere una sanzione qualora i cassonetti non vengano svuotati entro i tempi stabiliti. Questo sistema IoT e le informazioni ad esso associate costituiscono la base per la definizione dei percorsi, successivamente calcolati mediante una tecnica algoritmica ibrida denominata VNS-ACO. Tale tecnica determina gli itinerari tenendo conto anche dei cassonetti adiacenti situati entro un determinato raggio rispetto all'ultimo cassonetto pieno visitato. Se nel veicolo è disponibile dello spazio residuo, tali cassonetti possono essere svuotati nello stesso giro, così da rispettare il vincolo di carico e organizzare la raccolta in funzione dei dati disponibili (Roy et al., 2022).

Thürer et al. (2019) propongono invece un approccio basato su un sistema kanban guidato dall'IoT per la logistica inversa dei rifiuti solidi. L'idea di fondo dello studio è che il riempimento dei cassonetti intelligenti agisca come segnale elettronico (e-kanban) attivando in tempo reale la capacità di raccolta. I cassonetti inviano un alert al centro di docking quando il coperchio viene chiuso, trasmettendo informazioni relative alla posizione e al livello di riempimento. Tali dati vengono elaborati all'interno di un'architettura a tre strati tipica dei sistemi IoT; nell'ultimo strato, quello applicativo, il sistema verifica, non appena un camion diventa disponibile, se sia possibile definire un percorso efficiente basato sui punti di raccolta. Se non è possibile definire un percorso, il mezzo rimane presso il centro di cross-docking; se invece esistono più alternative, viene selezionata quella più appropriata in base alla distanza e ai vincoli temporali dei cassonetti (Thürer et al., 2019).

Come evidenziato dai casi precedenti, l'IoT trova applicazione principalmente nella fase di raccolta dei rifiuti. Tuttavia, alcuni studi ne evidenziano l'utilizzo anche nella fase di prevenzione, in particolare dello spreco alimentare. Il modello proposto da Iqbal & Kang (2024), ad esempio, prevede una configurazione a due livelli: il primo riguarda l'effettivo utilizzo dell'IoT nella conservazione per i prodotti deperibili a livello di punto

vendita; il secondo concerne la raccolta e il riciclo dei prodotti deteriorati. Per quanto riguarda il primo livello, è previsto l'utilizzo di un biosensore IoT che emette un avviso nel momento in cui viene raggiunto un livello critico di saturazione dei gas rilasciati dai prodotti deteriorati, i quali vengono poi rimossi dallo stock per evitare di infettare altri alimenti. Tale approccio è stato successivamente ampliato dallo stesso Iqbal (2024), che ha esteso il modello alla gestione simultanea di più tipologie di alimenti. In questa versione, ciascun prodotto viene considerato in base al proprio tasso di deperimento, durata di conservazione ed efficacia delle tecniche di stoccaggio. Il sistema IoT in questo caso viene impiegato per coordinare tali parametri e nel rendere più efficiente la gestione di sistemi multiprodotto complessi.

### 3.2 Intelligenza Artificiale

L'Intelligenza Artificiale (AI) è un campo dell'informatica che mira alla creazione di sistemi capaci di simulare l'intelligenza umana, replicandone facoltà cognitive quali il ragionamento, la risoluzione di problemi e l'interazione con l'ambiente circostante (Maiurova et al., 2022). All'interno di questo vasto campo, il Machine Learning (ML) costituisce un sottoinsieme fondamentale, focalizzandosi sullo sviluppo di algoritmi in grado di apprendere e generare modelli predittivi non attraverso una programmazione esplicita, bensì tramite l'identificazione di pattern ricorrenti all'interno dei dati<sup>2</sup> (Gue et al., 2022). Le reti neurali artificiali (ANN, Artificial Neural Network) rappresentano, a loro volta, un sottoinsieme del Machine Learning. Si definiscono “neurali” in quanto ispirate alla struttura e al funzionamento del cervello umano (Yang et al., 2021) e sono tipicamente organizzate in tre strati di nodi:

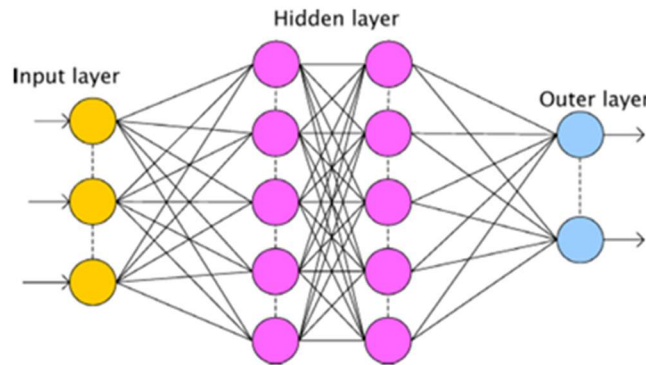
- lo strato di input, nel quale i neuroni fungono da ricevitori sensoriali e acquisiscono le informazioni esterne;
- gli strati nascosti, che elaborano i dati mediante funzioni di attivazione e algoritmi di addestramento, simulando il flusso di informazioni nella rete neurale biologica;

---

<sup>2</sup>La definizione canonica di Machine Learning è fornita dallo scienziato informatico americano e professore universitario Tom M. Mitchell, il quale afferma: "Si dice che un programma informatico apprende dall'esperienza E, rispetto a una certa classe di compiti T e con una misura di performance P, se la sua performance nei compiti T, misurata da P, migliora con l'esperienza E" (Mitchell, T. M., 1997).

- lo strato di output, che restituisce il risultato finale del processo decisionale (Oliveira et al., 2019).

**Figura 3.3: Struttura di una Rete Neurale Artificiale (ANN)**



*Fonte: Joshi et al. (2021)*

Un modello ANN caratterizzato da molteplici strati nascosti viene definito Rete Neurale Profonda (DNN, Deep Neural Network), in quanto l'addestramento e l'elaborazione dei dati avvengono attraverso diversi livelli. Le DNN vengono generalmente addestrate mediante tecniche di deep learning<sup>3</sup> e condividono con le ANN una struttura analoga e algoritmi di apprendimento simili. La loro architettura più profonda e gerarchica consente di individuare relazioni non lineari e complesse tra input e output, garantendo prestazioni e livelli di accuratezza superiori rispetto ai modelli neurali convenzionali (Yang et al., 2021).

Le capacità dell'intelligenza artificiale, e in particolar modo dei sottosistemi sopra descritti, risultano applicabili a diverse fasi della gestione dei rifiuti, a partire dalla raccolta. In tal senso, lo studio di Jammeli et al. (2023) si focalizza sulla gestione dei rifiuti solidi urbani in Tunisia, evidenziando come alcuni modelli di AI possano supportare la pianificazione della raccolta, in particolare nella determinazione del numero adeguato di bidoni necessari per ciascuna area. Nello specifico, è stato descritto come i modelli sequenziali Long Short-Term Memory (LSTM) e il Bidirectional LSTM

---

<sup>3</sup> Il deep learning rappresenta una specializzazione del machine learning. E' basata su reti neurali artificiali profonde, in riferimento alla maggiore profondità degli strati che compongono la rete. In generale, si parla di algoritmo di deep learning quando una rete neurale è costituita da più di tre strati, inclusi quelli di input e di output (IBM, 2023).

(BLSTM), rispetto ad altre tecniche AI non sequenziali, analizzando serie storiche mensili, siano in grado di cogliere complesse dipendenze temporali nei dati, come la stagionalità, i trend di crescita o eventi eccezionali, al fine di prevedere con maggiore precisione la quantità di rifiuti che verrà generata nelle diverse zone della città (Jammeli et al., 2023).

**Tabella 3.1: Confronto tra modelli di classificazione per la previsione del numero di contenitori di rifiuti nella città di Sousse**

<b>Classification Method</b>	<b>Accuracy</b>	<b>Precision</b>	<b>Recall</b>	<b>F1</b>
<b>Decision Tree</b>	<b>79.75</b>	<b>57</b>	<b>61</b>	<b>58</b>
<b>Random Forest</b>	<b>80.99</b>	<b>58</b>	<b>60</b>	<b>58</b>
<b>ANN</b>	<b>84.30</b>	<b>28</b>	<b>33</b>	<b>30</b>
<b>SVM</b>	<b>84.71</b>	<b>43</b>	<b>48</b>	<b>45</b>
<b>LSTM</b>	<b>86.78</b>	<b>66</b>	<b>62</b>	<b>64</b>
<b>BLSTM</b>	<b>87.19</b>	<b>69</b>	<b>63</b>	<b>66</b>

*Fonte : Jammeli et al.(2023)*

Questo approccio predittivo si estende anche a flussi di rifiuti più specifici e complessi. Nello studio di revisione di Huang et al. (2025) viene mostrato come, nel settore delle demolizioni nel Regno Unito, gli algoritmi di Machine Learning (ML) siano stati utilizzati per predire con un'accuratezza media del 97%, la quantità e la tipologia di scarti prodotti. Sempre nello stesso studio, vengono citate le reti neurali artificiali (ANN) per la stima, sulla base di dati storici, del numero di veicoli a fine vita a Shanghai, supportando così una pianificazione preventiva della logistica e degli impianti necessari (Huang et al., 2025). Un ulteriore contributo importante sulla capacità predittiva dell'AI in ambito rifiuti proviene dallo studio di Oliveira et al. (2019), nel quale è stato sviluppato un modello applicato a 42 comuni del Portogallo centrale, finalizzato a stimare la quantità annuale di rifiuti da imballaggio domestico raccolti separatamente. Il modello si basa sulla combinazione di reti neurali artificiali e di algoritmi genetici<sup>4</sup>. Gli algoritmi genetici sono

---

<sup>4</sup> L'algoritmo genetico (GA) è un modello di calcolo che trova soluzioni ottimali simulando processi naturali. Include tre operazioni principali: selezione (scelta degli individui migliori per la generazione successiva), crossover (ricombinazione dei geni dei genitori per generare nuova prole) e mutazione (introduzione di variazioni casuali nei geni). Questi processi vengono ripetuti iterativamente fino al raggiungimento della soluzione ottimale (Joshi et al., 2021)

stati impiegati per la selezione automatica del set ottimale di dieci variabili chiave, a partire da un insieme iniziale di quattordici variabili del dataset, in grado di influenzare l'ammontare dei rifiuti. Tali variabili includono fattori socioeconomici e demografici come il livello di istruzione della popolazione, il grado di urbanizzazione, l'indice di deprivazione e il potere d'acquisto, nonché parametri operativi del servizio di raccolta, come l'accessibilità ai punti di conferimento. La rete neurale artificiale si è rivelata funzionale alla previsione vera e propria dei rifiuti, con una capacità estremamente elevata, espressa attraverso un indice di correlazione ( $R^2$ ) di 0,98, rivelandosi più precisa rispetto a tecniche di regressione tradizionali (Oliveira et al., 2019).

L'AI assume poi un ruolo rilevante nel monitoraggio operativo in tempo reale e nella logistica dei rifiuti. In questo contesto, i dati raccolti dai sensori IoT installati nei cassonetti possono alimentare modelli di intelligenza artificiale che operano direttamente sul campo, come il Random Forest proposto da Palagan et al. (2025). Gli autori evidenziano come questo tipo di AI, rispetto ad altre tipologie, nel caso in cui sia applicata su un gateway locale (cioè vicino ai cassonetti), possa essere in grado di analizzare i dati pre-elaborati provenienti dai sensori e determinare istantaneamente lo stato di riempimento dei bidoni, con una latenza minima. Ciò è possibile in quanto le decisioni non devono transitare attraverso un server centrale, consentendo così l'attivazione immediata delle operazioni di raccolta.

**Tabella 3.2: Confronto delle performance di modelli AI per il rilevamento dello stato dei cassonetti. La tabella mostra come il modello proposto dagli autori basato sul Random Forest (Proposed RF) ottenga valori superiori in tutte e quattro le metriche di valutazione rispetto ad altri modelli di AI**

Comparative analysis of various classification models for waste bin detection.

Models	Accuracy (%)	Precision (%)	Recall (%)	F1 Score (%)
CNN (Ahmed et al., 2023)	87	87	87	86
MobileNetV2 (Gude et al., 2024)	93	93	92	93
GAN (Geetha et al., 2022)	90	90	88	89
YOLO V5 (Alqahtani et al., 2020)	93.65	91.23	66.71	93.65
Proposed RF	<b>99.25</b>	<b>98.72</b>	<b>99.25</b>	<b>98.99</b>

Fonte: Palagan et al. (2025)

L'impiego dell'AI in ottica di ottimizzazione della logistica dei rifiuti emerge anche nel caso analizzato da Oliveira et al. (2025). Lo studio si concentra sulla logistica inversa dei RAEE nella città di Sao Paulo (Brasile), attraverso la combinazione di algoritmi genetici (GA), greedy local search (GLS) e tabu search (TS). I primi due algoritmi sono stati utilizzati per la riorganizzazione delle infrastrutture necessarie alla gestione dei rifiuti, come i centri di raccolta, mentre il tabu search è stato impiegato per l'ottimizzazione dinamica delle rotte dei veicoli. Tale algoritmo si basa sull'utilizzo di una "tabu list", che consente di esplorare in modo estensivo lo spazio delle soluzioni, evitando così dei minimi locali (Oliveira Neto et al., 2025).

Le potenzialità dell'AI possono essere poi sfruttate per la classificazione dei materiali. Nello studio di Saad et al. (2025) viene descritto l'utilizzo della Machine Learning all'interno di uno strumento web denominato "Machine Learning for Mitigating Litter (ML2)", finalizzato alla classificazione dei rifiuti plastici, che tradizionalmente avviene sulla base della raccolta e annotazione manuale delle immagini. Tale strumento web permette agli utenti di caricare le immagini dei rifiuti sulla piattaforma, le quali vengono classificate poi in tempo reale da un modello ibrido che combina Roboflow AutoML (la versione 3.0) per l'addestramento e una piattaforma Dash per la visualizzazione dei dati. Il modello, addestrato su circa 8.000 immagini annotate localmente, è in grado di prevedere le classi di rifiuti con un tasso di confidenza superiore al 90%. Inoltre, in questo sistema vi è l'integrazione di un protocollo di "citizen science", attraverso il quale gli utenti, utilizzando lo strumento, contribuiscono ad arricchire progressivamente il dataset, consentendo un miglioramento continuo del modello (Saad et al., 2025). Un'applicazione maggiormente orientata al recupero industriale dei materiali riguarda l'analisi delle ceneri pesanti da incenerimento dei rifiuti solidi urbani (MIBA). Nello studio di Chen & Yu (2023) è stato applicato un modello sperimentale basato su Reti Neurali Convoluzionali (CNN)<sup>5</sup> per identificare automaticamente materiali

---

<sup>5</sup> Una Rete Neurale Convoluzionale (CNN) è un metodo di Intelligenza Artificiale che elabora le immagini come input, scansionandole attraverso una "sliding window" per estrarne le caratteristiche e classificare gli oggetti (Joshi et al., 2021)

non idonei, come batterie, metalli e plastiche, la cui presenza comprometterebbe il riutilizzo del MIBA come sostituto degli aggregati naturali nei materiali da costruzione.

Il modello è stato addestrato su oltre 10.000 immagini reali di campioni di MIBA acquisite sia in condizioni di illuminazioni visibili all'occhio umano sia illuminazioni a infrarossi, e relative a campioni caratterizzati da diverse granulometrie: frazioni fini di dimensioni inferiori a <2 mm e frazioni grosse di valori compresi tra 4 e 19 mm. Le CNN, nonostante la complessità dei materiali, hanno dimostrato un'elevata efficacia nel riconoscimento dei residui indesiderati, raggiungendo livelli di accuratezza compresi tra l'83,1% e il 97,33% (Chen & Yu, 2023).

L'intelligenza artificiale rappresenta inoltre uno strumento utile per il monitoraggio delle discariche, in particolare per il controllo del percolato, che, come già citato nel primo capitolo, costituisce un elemento altamente pericoloso e inquinante (Joshi et al., 2021). Lo studio di Bagheri et al. (2017), in particolare, condotto presso una discarica della città di Sanandaj, nell'Iran occidentale, utilizza un modello che combina logica fuzzy e reti neurali artificiali per analizzare come il percolato si distribuisca nelle acque sotterranee nel tempo e nello spazio. I modelli si sono basati su dati raccolti nell'arco di dieci anni, includendo vari parametri chimici del percolato a differenti profondità, dimostrando una precisione molto elevata, espressa da coefficienti di determinazione ( $R^2$ ) prossimi a 0.9999 (Bagheri et al., 2017).

L'intelligenza artificiale trova anche impiego nei processi di trattamento dei rifiuti, sia di natura termochimica, come la gassificazione e l'incenerimento, sia biologica, come il compostaggio e la digestione anaerobica, per massimizzare il recupero di energia e materiali.

Nella gassificazione, nello specifico dei rifiuti solidi urbani (RSU), lo studio di Yang et al. (2021) si basa su modelli ibridi che combinano le capacità delle reti neurali profonde (DNN) con un algoritmo di ottimizzazione definito "Moth-Flame Optimization", ispirato al comportamento delle falene. La DNN modella le relazioni non lineari complesse tra gli input del processo di gassificazione, come la composizione elementare dei rifiuti e la temperatura, e l'output rappresentato dalla resa di gas (Yang et al., 2021). L'integrazione dell'algoritmo MFO consente di ottimizzare il modello, permettendo all'AI di predire la resa di gas con elevata accuratezza, espressa dal

coefficiente di determinazione ( $R^2$ ) pari 0,981. In questo modo è possibile fornire ai gestori degli impianti uno strumento efficace per la regolazione razionale della produzione e della distribuzione energetica. Per quanto concerne l'incenerimento dei rifiuti solidi urbani, l'intelligenza artificiale può essere impiegata per ottimizzare il controllo operativo degli impianti. Lo studio di Tian et al. (2025), basato su dati provenienti da un impianto di incenerimento a Pechino, si è concentrato sul monitoraggio e la regolazione della temperatura dei forni. In particolare, è stata applicata la combinazione di un sistema di apprendimento denominato "fuzzy di tipo 2 a intervallo" (IT2FNN), volto a compensare efficacemente le incertezze derivanti dai disturbi esterni e dalla variabilità della composizione dei rifiuti, e di un meccanismo di "event triggering dinamico-statico" (DSSETM), che sostanzialmente determina in modo adattivo quando aggiornare la variabile manipolata, ossia il volume dell'aria secondaria. Analizzando i dati operativi in tempo reale, il DSSETM garantisce che la variabile manipolata venga aggiornata esclusivamente in risposta a eventi significativi, riducendo drasticamente la frequenza di aggiornamento degli attuatori (ossia valvole e ventilatori), aspetto fondamentale per prolungare la vita utile delle attrezzature e mitigare i costi di manutenzione (Tian et al., 2025).

Nel campo dei processi biologici di trattamento dei rifiuti, l'impiego dell'intelligenza artificiale può contribuire a migliorare l'efficienza e la previsione delle performance dei sistemi di compostaggio e di digestione anaerobica. Lo studio di revisione di Joshi et al. (2021) evidenzia come l'integrazione tra reti neurali artificiali (ANN) e regressione lineare multipla consenta di stimare con grande precisione il recupero dei nutrienti nel compostaggio ( $R^2 = 0,998$ ), oltre a modellare accuratamente il potenziale di biometano ottenibile dalla digestione anaerobica ( $R^2 = 0,99$ ). Il processo di digestione anaerobica è stato trattato anche nello studio di Khan et al. (2025). Tale studio prevede l'applicazione combinata di reti neurali convoluzionali e modelli LSTM, per prevedere la resa specifica di metano e valutare la stabilità del processo, analizzando simultaneamente diversi parametri come pH, acidi grassi volatili e alcalinità, per comprendere le interdipendenze del sistema. Grazie a questa architettura combinata, il modello ha raggiunto un'elevata accuratezza predittiva ( $R^2$  medio = 0,94) e una riduzione del 38% dell'errore di previsione rispetto ai modelli singoli. Il sistema incorpora poi un framework di ottimizzazione globale. Tale framework è stato implementato per definire

condizioni operative ottimali in scenari reali, in modo da garantire la massima resa specifica di metano e mantenere la stabilità del processo (Khan et al., 2025).

Un'ultima fase operativa in cui l'intelligenza artificiale trova impiego riguarda la gestione preventiva degli sprechi alimentari. Lo studio di Hübner et al. (2024) si concentra sull'utilizzo di un modello di Machine Learning per l'ottimizzazione delle previsioni di vendita nelle panetterie. Questa tipologia di prodotti è particolarmente rilevante, in quanto rappresenta la frazione di spreco più consistente nel commercio al dettaglio europeo. Nello specifico, viene analizzato il servizio Software-as-a-Service (SaaS) basato su ML, denominato "Foodforecast", implementato all'interno delle panetterie. Il sistema utilizza una rete neurale ricorrente (RNN) pre-addestrata per calcolare previsioni di vendita accurate per ogni singolo prodotto e punto vendita, integrando dati storici con fattori esterni complessi, come festività e condizioni meteorologiche. Foodforecast automatizza il processo di ordinazione giornaliero agendo alla fonte per prevenire la sovrapproduzione e la conseguente generazione di scarti alimentari (Hübner et al., 2024). Un altro esempio di applicazione concreta dell'AI nella gestione degli sprechi alimentari lo si denota dallo studio di Aytaç et al. (2020), condotto in Turchia. In questo studio viene realizzato e successivamente implementato un sistema di gestione degli sprechi nei "Quick Service Restaurants", in cui dati provenienti dai sensori IoT vengono analizzati a livello locale sul gateway Edge, dove poi opera l'intelligenza artificiale, attraverso algoritmi di Machine Learning, in ottica di sistema completamente automatizzato e auto-apprendente. Nello specifico l'intelligenza artificiale opera in due modi: tramite tecniche cosiddette di "clustering leggero" per identificare delle anomalie negli scarti presenti nei contenitori e tramite algoritmi di classificazione, come gli alberi decisionali, con livelli di accuratezza del 99,9%, al fine di stimare i livelli di produzione ottimali e mitigare quindi la sovrapproduzione (Aytaç et al., 2020).

Oltre alle singole fasi operative sin qui descritte, l'AI può essere utilizzata, in senso più ampio, per la valutazione predittiva della performance complessiva di un sistema di gestione dei rifiuti, come evidenziato nello studio di Gue et al. (2022). In tale studio viene sfruttato un modello di machine learning interpretabile, basato sulla teoria degli insiemi semplici (Rough set-based machine learning, RSML), per analizzare come una combinazione di attributi a livello di città (come, ad esempio, il livello di occupazione o di ricerca tecnologica universitaria) e di paese (ad esempio il contesto politico) possa

influenzare l'efficacia del sistema di gestione. I modelli sviluppati, che generano regole leggibili di tipo 'if-then', hanno dimostrato una notevole capacità predittiva, raggiungendo accuratezze di classificazione binarie comprese tra l'89% e il 91% (Gue et al., 2022).

### **3.3 Blockchain**

La Blockchain è una tecnologia ICT (Information and Communication Technology) strutturata come un insieme di blocchi interconnessi, dove ogni blocco memorizza le informazioni in modo sequenziale e cronologico (Jiang et al., 2023). Ogni blocco è collegato al precedente attraverso algoritmi crittografici, formando una catena che non può essere modificata retroattivamente senza alterare l'intera struttura (Baralla et al., 2023). Dal punto di vista funzionale, la blockchain si può configurare come una “Distributed Ledger Technology (DLT)” ossia come un registro aperto e distribuito che consente la regolazione delle transazioni tra due o più parti in modo verificabile e permanente.

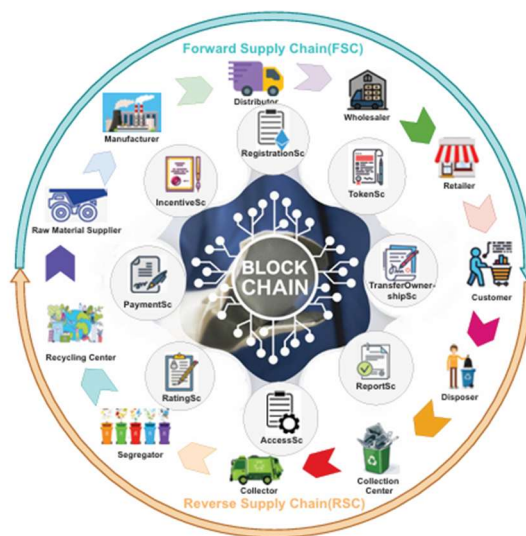
I principi base di questa tecnologia sono essenzialmente due: la decentralizzazione e l'immutabilità dei dati. Attraverso la decentralizzazione, la catena delle informazioni è conservata e replicata in tutti i server (nodi) del sistema, rendendo estremamente complicata la manomissione dei dati, perché sarebbe necessario il consenso della maggioranza dei server. Questi ultimi, inoltre, non presentano relazioni gerarchiche e operano in modo indipendente, eliminando così il rischio che un singolo server possa controllare l'intera rete (Jiang et al., 2023). L'evoluzione della tecnologia, nota come Blockchain 2.0, prevede la possibilità di utilizzare le transazioni per registrare dati strutturati ed eseguire programmi informatici noti come “smart contracts” (Baralla et al., 2023). Tali “contratti intelligenti” sono programmi memorizzati all'interno della blockchain che si attivano automaticamente al verificarsi di determinate condizioni prestabilite. La loro funzione principale è quella di automatizzare l'esecuzione di protocolli in modalità peer-to-peer, consentendo alle parti coinvolte di verificare immediatamente l'esito delle transazioni senza la necessità di intermediari (Jiang et al., 2023).

La blockchain è stata originariamente concepita come sistema di supporto alle transazioni delle criptovalute come i bitcoin ma le caratteristiche sopracitate, in particolare l'immutabilità, la tracciabilità e l'automazione attraverso gli smart contracts, ne favoriscono l'applicazione in altri ambiti, oltre a quello finanziario, tra cui la gestione dei rifiuti.

L'applicazione principale della blockchain in questo settore, come evidenziano diversi studi, è la creazione di piattaforme unificate per la tracciabilità dell'intero ciclo di vita del rifiuto. In questo senso, la capacità della tecnologia di generare un registro immutabile e condiviso consente di seguire il percorso del rifiuto in ogni sua fase, dalla produzione al consumo, fino alla raccolta, al trattamento e al riciclo finale (Baralla et al., 2023). Con questo sistema, ogni movimentazione dei materiali viene registrata come una transazione sulla catena, creando un "passaporto digitale" del rifiuto verificabile da tutti gli attori autorizzati.

Un esempio concreto di tale approccio è fornito dallo studio di Sahoo et al. (2021), che si concentra sulla gestione di rifiuti pericolosi, come i RAEE, attraverso un modello "proof-of-concept" basato sulla blockchain. Il sistema proposto mira a mappare l'intero ciclo di vita del prodotto elettronico in tutte le sue fasi: dalla sua produzione, passando per l'utilizzo, la raccolta dei rifiuti tramite sensori IoT e il suo riciclo finale in materie prime. Il modello, sviluppato sulla piattaforma Ethereum mediante il linguaggio Solidity, utilizza smart contracts per gestire le interazioni tra tutti gli attori della filiera (produttori, consumatori, raccoglitori, riciclatori) con l'obiettivo di creare un sistema trasparente e affidabile. In questo contesto, il coinvolgimento degli stakeholders si articola lungo entrambe le fasi della catena di fornitura: la Forward Supply Chain, che comprende fornitori di materie prime, produttori, grossisti, rivenditori e consumatori, e la Reverse Supply Chain, che riguarda gli operatori incaricati di raccogliere, segregare e riciclare i RAEE (Sahoo et al., 2021).

*Figura 3.4: Schema del processo di gestione degli e-waste basata sulla Blockchain*



*Fonte: Sahoo et al. (2021)*

Il concetto di tracciabilità dei rifiuti lo si può traslare anche ad altre categorie di rifiuti, come le batterie per veicoli elettrici, dove la blockchain viene impiegata per tracciarne l'intero ciclo di vita, verificarne lo stato di salute e il grado di degradazione (Vimal et al., 2024; Feng et al., 2024). Lo studio di Vimal et al. (2024) analizza i fattori che influenzano l'adozione di tecnologie digitali, tra cui proprio la blockchain, per il riciclo delle batterie. Gli autori sostengono che la blockchain possa supportare la creazione di una catena di fornitura inversa agendo su tracciabilità e trasparenza. La tracciabilità consente di seguire le batterie dall'origine fino al riciclo finale, assicurando la registrazione accurata delle informazioni lungo l'intero processo e supportando programmi di Responsabilità Estesa del Produttore (EPR). La tecnologia consente inoltre la condivisione di dati relativi alla composizione e allo stato delle batterie, facilitando il monitoraggio della loro gestione e del recupero dei materiali. Lo studio di Feng et al. (2024) analizza l'applicazione della blockchain nel contesto dei veicoli a nuova energia (NEV), in relazione a strumenti di riduzione delle emissioni di carbonio come la carbon tax e i sistemi ETS. In particolare, lo studio evidenzia il supporto della blockchain nella risoluzione dei problemi di asimmetria informativa e di limitazioni tecnologiche nella tracciabilità del consumo energetico, nella valutazione del tasso di degradazione e nella verifica strutturata e documentata della riciclabilità delle batterie.

Dalla letteratura emerge poi l'utilizzo della tecnologia anche per la gestione di flussi di rifiuti derivanti dalle strutture ospedaliere, considerati una minaccia grave per la salute della comunità e del personale a causa della loro natura tossica e infettiva intrinseca. Bamakan et al. (2022) nella loro revisione sistematica, trattano l'impiego della blockchain, per la registrazione e il monitoraggio, in modo sicuro e immutabile, il percorso di tali rifiuti infetti, dalla loro generazione nei reparti fino allo smaltimento finale. Le applicazioni individuate dallo studio includono la crittografia dei pacchi di scarti ospedalieri per assicurarne l'integrità, il tracciamento dei flussi di trasporto interni ed esterni alle strutture sanitarie, la registrazione delle diverse fasi di trattamento e il miglioramento della classificazione dei rifiuti. Inoltre, la revisione menziona l'uso della tecnologia a supporto della gestione del sistema fognario e il monitoraggio ambientale, contribuendo complessivamente a potenziare la sicurezza e la conformità normativa del sistema di gestione dei rifiuti (Bamakan et al., 2022).

Analogamente a quanto osservato per l'IoT e l'AI, la blockchain può essere applicata anche alla prevenzione degli sprechi alimentari. Lo studio di Omar et al. (2024) analizza l'impiego di questa tecnologia nel settore dell'ospitalità, dove viene utilizzata per registrare e monitorare in tempo reale l'origine, la movimentazione e lo smaltimento dei prodotti alimentari. Il modello proposto si basa su una rete Ethereum permissioned, che collega i punti vendita del settore food and beverage con i diversi enti coinvolti nella gestione delle risorse alimentari, quali organizzazioni per la donazione di cibo e aziende di riciclo. I sistemi basati su smart contracts registrano il consumo degli ingredienti e le transazioni dei clienti, stimano la quantità di scarti generati, sia consumabili che no, e, se previsto, applicano automaticamente penali al superamento di soglie predefinite. Gli scarti consumabili, come il cibo invenduto ma ancora commestibile, vengono destinati alle organizzazioni di donazione, mentre quelli non consumabili (prodotti scaduti o avanzati) vengono inviati alle stazioni di riciclo per essere trasformati in fertilizzanti o biocarburanti (Omar et al., 2024).

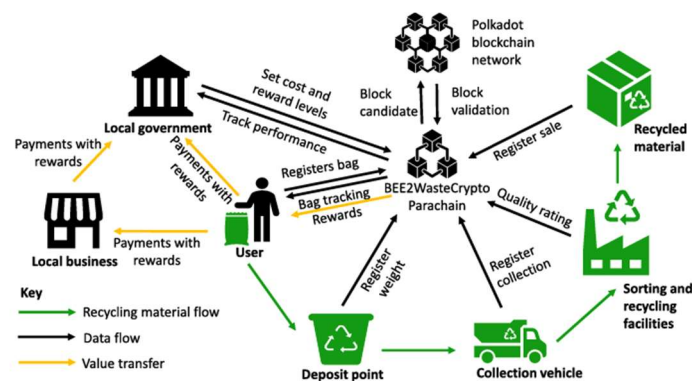
Un'altra funzionalità della blockchain oltre al tracciamento dei flussi fisici, riguarda la possibilità di incentivare i cittadini ad un comportamento più consapevole nella gestione dei rifiuti, attraverso ricompense digitali, tipicamente sotto forma di token. In questo tipo di sistema incentivante, i rifiuti vengono conferiti dagli utenti presso vari punti di raccolta tramite sensori o codici QR, e in cambio, ricevono dei "gettoni digitali" sotto

forma di token che possono poi essere scambiati con beni fisici nei supermercati o con servizi pubblici, come crediti fiscali o assicurazioni (Gong et al., 2020). Un esempio di implementazione della blockchain in ottica di incentivazione è rappresentato dal sistema “BEE2WasteCrypto” proposto da Scott et al. (2023), basato su un’architettura ibrida definita “ Polkadot Parachain”. Questo sistema integra tre funzionalità principali:

- tracciamento del percorso dei rifiuti, mediante un registro che garantisce trasparenza e affidabilità sul percorso dei rifiuti e del materiale riciclabile dopo che questi lasciano l’abitazione del consumatore;
- incentivazione ad un corretto smaltimento, attraverso ricompense basate su token digitali “Eco-Credits”;
- gamification, con una piattaforma volta ad innescare meccaniche di gioco basate sulle prestazioni di riciclo tracciate, creando competizioni, achievement e premi tra quartieri o strade.

I token, nello specifico, vengono assegnati agli utenti in base alle prestazioni di riciclo registrate dalla blockchain e possono essere utilizzati per pagare servizi municipali, bollette o accedere a servizi locali. Il sistema di ricompense è gestito tramite due moduli (pallets): il pallet eco-reward-system, che determina le ricompense e trasferisce gli Eco-Credits agli utenti in base al comportamento osservato nel tracciamento della supply chain, e il balances pallet, che implementa un semplice sistema di pagamento per il trasferimento dei token (Scott et al., 2023).

**Figura 3.5: Schema concettuale del sistema BEE2WasteCrypto, che integra tracciabilità dei rifiuti, flussi informativi e meccanismi di incentivazione economica attraverso tecnologia blockchain. Il diagramma evidenzia l’interazione tra i flussi materiali, i flussi di dati e il sistema di tokenizzazione**



Fonte: Scott et al. (2023)

Un altro esempio del meccanismo di incentivazione dettato dalla blockchain è contenuto nello studio di Franca et al. (2020), condotto in alcuni comuni brasiliani, in ottica di futura applicazione. Gli autori propongono, nel concreto, la sostituzione dell'attuale meccanismo cartaceo dei "Green Coins", con l'introduzione di cripto-monete sociali registrate sulla blockchain. Il sistema di ricompensa prevede che il cittadino volontario conferisca i rifiuti a un agente comunale e riceva nel proprio portafoglio virtuale un numero di cripto-monete equivalente al valore di mercato dei materiali conferiti. I token possono poi essere utilizzati per acquistare beni presso commercianti convenzionati, i quali periodicamente scambiano le monete presso l'ufficio finanziario comunale per l'equivalente in valuta locale. Tutte le transazioni vengono registrate sulla blockchain per la convalida dei blocchi, garantendo che siano immutabili, tracciabili e che sia assicurata l'integrità del sistema, senza possibilità di frodi. Inoltre, le identità personali rimangono protette in quanto le transazioni sono registrate solo con le rispettive chiavi pubbliche (França et al., 2020).

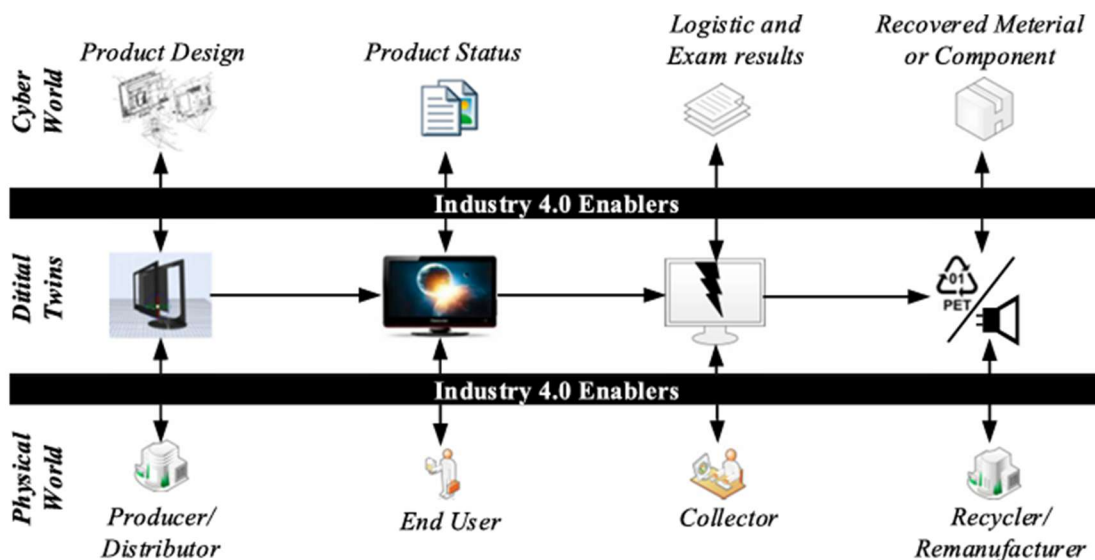
### **3.4 Digital Twin**

Il Digital Twin, originariamente proposto nell'ambito della modellazione e simulazione, è un tipo di tecnologia 4.0 che consiste nella creazione di una replica virtuale ultra-realistica di un veicolo o di sistema fisico, aggiornata tramite sensori e dati storici. Questa rappresentazione digitale, definita cyber-avatar, funge da ponte tra il mondo fisico e quello cibernetico (cloud), per tracciare, gestire e analizzare un determinato prodotto lungo tutto il suo ciclo di vita, dal design fino al recupero (Wang & Wang, 2018).

Nel contesto della gestione dei rifiuti, in particolare dei RAEE, il Digital Twin è stato studiato per superare i problemi legati alla frammentazione delle informazioni e alla mancanza di conoscenza del prodotto nelle fasi di post-vendita. Wang & Wang(2018) hanno proposto un modello di digital twin per il ciclo di vita di ogni singolo prodotto EEE (Electrical and Electronic Equipment). Questo cyber-avatar viene inizializzato nella fase di progettazione, integrando informazioni relative a geometria, componenti, materiali e sostanze pericolose, tutte necessarie per definire l'adempimento della Responsabilità Estesa del Produttore (EPR). Quando il prodotto viene venduto, l'utente finale può aggiornarne lo stato del prodotto per quanto concerne la localizzazione, la proprietà ed

eventuali riparazioni, tramite app mobili e smart tag. Al termine della vita utile del prodotto, il gemello digitale contiene tutte le informazioni necessarie per pianificare in modo adeguato tutte le operazioni di recupero, riciclo o rigenerazione, eliminando la necessità di test o valutazioni aggiuntive. Tutte le informazioni relative al recupero vengono infine registrate, creando un flusso di dati continuo e sostenibile in cui la conoscenza completa del prodotto, dei componenti e dei materiali viene mantenuta all'interno del gemello digitale, a supporto delle future analisi e dei processi decisionali (Wang & Wang, 2018).

*Figura 3.6: Rappresentazione del Digital Twin per il recupero dei RAEE*



*Fonte: Wang & Wang (2018)*

Un'ulteriore applicazione del Digital Twin nella gestione dei rifiuti è proposta da Cao et al. (2023), che ne estendono l'utilizzo dal livello del singolo prodotto, come nel caso di Wang & Wang (2018), a quello dell'intero sistema di gestione dei rifiuti. Questo studio si è focalizzato in particolare sulla gestione dei rifiuti sanitari nel contesto emergenziale della pandemia di COVID-19, attraverso un modello di Digital Twin per ottimizzare la localizzazione dei centri di smaltimento temporanei e il trasporto dei rifiuti (Cao et al., 2023). In questo modello, il Digital Twin agisce come un sistema integrato che mappa e simula l'intero ecosistema fisico contraddistinto da ospedali, punti di quarantena, centri di smaltimento, infrastrutture di trasporto, in un ambiente virtuale. Il

gemello digitale viene alimentato con dati in tempo reale e storici per stimare i parametri incerti, come la probabilità di infezione. La piattaforma permette quindi di simulare diversi scenari e di formulare strategie ottimali per la localizzazione dei siti e la pianificazione dei percorsi di raccolta e trasporto, prima di applicarle al sistema fisico (Cao et al., 2023).

### **3.5 Robotica Avanzata**

Nonostante la letteratura scientifica sul tema sia ancora limitata, la robotica avanzata rappresenta una tecnologia molto promettente per migliorare l'efficienza e la sicurezza nella gestione dei rifiuti. Il suo impiego si riscontra nelle fasi di disassemblaggio, classificazione e smistamento dei materiali, guidato dall'utilizzo di sensori e algoritmi di intelligenza artificiale (Asif et al., 2024; Maiurova et al., 2022; Kurniawan et al., 2023).

L'applicazione più significativa è rappresentata dal disassemblaggio dei prodotti a fine vita, di cui lo studio di Asif et al. (2024) ne descrive il processo decisionale. Questo processo, definito Task and Motion Planning (TAMP), prevede due livelli di pianificazione: un livello superiore, astratto, di pianificazione dei compiti, che stabilisce la sequenza logica delle operazioni da eseguire (come ad esempio "svita il componente A", poi "rimuovi il componente B"), e un livello inferiore di pianificazione del movimento, che calcola le traiettorie fisiche dettagliate che il robot deve seguire per eseguire tali compiti in modo sicuro e senza collisioni.

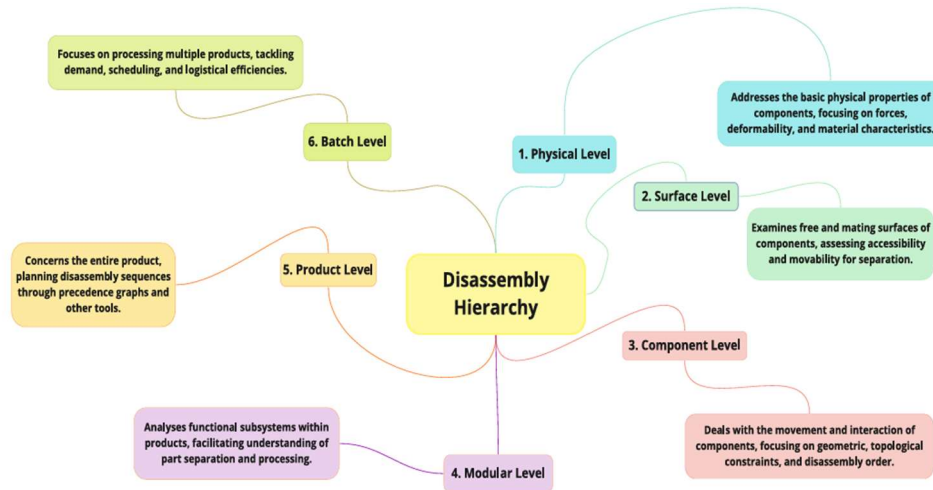
Il processo di disassemblaggio può essere classificato in due categorie principali: distruttivo e non-distruttivo. Il primo è focalizzato principalmente sul recupero dei materiali, dove l'integrità dei singoli componenti non è una priorità. Il secondo, invece, mira a preservare i componenti per un loro successivo riutilizzo o ricondizionamento; i sistemi robotici eccellono in questa seconda categoria, offrendo un controllo preciso che minimizza il rischio di danneggiamento di parti di valore.

Il disassemblaggio può essere:

- completo, se il robot smonta interamente un prodotto;
- selettivo, se si concentra sulla rimozione solo di alcuni componenti;

- single-target o multi-target, qualora l'obiettivo sia il recupero di uno o più materiali specifici (Asif et al., 2024).

**Figura 3.7: Rappresentazione del disassemblaggio dei prodotti a fine vita**



Fonte: Asif et al. (2024)

### 3.6 Benefici delle tecnologie 4.0: evidenze e impatti misurabili

L'analisi della letteratura scientifica mette in luce come l'integrazione delle tecnologie 4.0 nei processi di gestione dei rifiuti possa impattare positivamente su molteplici aspetti, di natura economica, ambientale, organizzativa o sociale. Sono presenti evidenze quantitative a sostegno della validità di tali studi, nonostante molti di essi si configurino ancora come sperimentazioni, simulazioni o progetti pilota, contribuendo al tempo stesso al raggiungimento di diversi Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDGs) promossi dalle Nazioni Unite.

Nella fase di raccolta dei rifiuti, l'impiego di tecnologie basate su IoT e intelligenza artificiale può consentire l'ottimizzazione dei percorsi dei veicoli, con conseguente riduzione delle distanze percorse, dei costi di trasporto e di raccolta, nonché del consumo di carburante e delle spese operative superflue (Kazancoglu et al., 2021; Seker et al., 2022; Anagnostopoulos et al., 2015).

Questo si può evincere in particolar modo dagli studi effettuati da Oliveira Neto et al. (2025) e Mastos et al. (2020), descritti nei paragrafi precedenti.

Nello studio sperimentale di Oliveira Neto et al. (2025), relativo all'ottimizzazione della catena logistica inversa dei RAEE nella città di São Paulo, è stato dimostrato come, attraverso la combinazione di algoritmi genetici, greedy local search e tabu search, si possa ottenere una riduzione approssimativa del 30% nelle distanze di viaggio, passando da 184.320 km a 128.148 km, e del 20% nei tempi di raccolta. Tale accresciuta efficienza logistica, secondo gli autori, si potrebbe tradurre in concreti benefici economici, constatabili in un bilancio positivo stimato di circa R\$ 49.140,00 di risparmio operativo, anche considerando i costi di ricollocazione dei centri e il costo per chilometro del trasporto. Il risparmio operativo comporta inoltre una significativa diminuzione del consumo di carburante, con conseguente riduzione delle emissioni di gas serra e altri inquinanti atmosferici. Lo studio ha quantificato tali impatti, riportando, tra gli altri, una riduzione annuale di oltre 1,7 milioni di kg di CO<sub>2</sub>, circa 4.493 kg di NO<sub>x</sub> e 55 kg di particolato atmosferico. Oltre alle emissioni, si osserva anche una notevole riduzione del consumo di risorse, con un risparmio stimato di oltre 621.000 tonnellate/anno di risorse abiotiche e quasi 3,9 milioni di tonnellate/anno di acqua.

**Tabella 3.3: Riduzione delle emissioni di gas**

Gases	Average Emission (g/kWh)	Current Scenario kg/year (one truck)	Current Scenario kg/year (one truck)	Optimized Scenario kg/year (one truck)	Optimized Scenario kg/year (fleet of 57 trucks)	Emission Reduction kg/year (one truck)	Emission Reduction kg/year (fleet of 57 trucks)
CO	0.055	12.02	685.14	9.53	543.21	2.48	141.36
HC	0.023	5.03	286.71	3.99	227.43	1.04	59.28
N <sub>ox</sub>	1746	381.47	21743.79	302.64	17250.48	78.83	4493.31
CO <sub>2</sub>	666,886	145702.42	8305037.94	115591.93	6588740.01	30110.49	1716297.93
Particulate material	0.018	4.10	233.7	3.12	177.84	0.98	55.86
<b>Total Emissions</b>		<b>146105.03</b>	<b>8327986.71</b>	<b>115911.21</b>	<b>6606938.97</b>	<b>30193.82</b>	<b>1721047.74</b>

*Fonte: Oliveira Neto et al. (2025)*

Nello studio di Mastos et al. (2020), condotto in Grecia, i risultati riscontrati sono ancor più impattanti, trattandosi di un'implementazione reale. Nello specifico, l'utilizzo del sistema IoT descritto in precedenza, supportato da un algoritmo genetico per la pianificazione della logistica, ha portato ad una riduzione del consumo di carburante e delle emissioni di CO<sub>2</sub> in percentuali comprese tra l'8% e il 15% sia per l'azienda produttrice sia per quella incaricata alla raccolta e al riciclo. Si registrano anche significativi risparmi economici, con un miglioramento dei costi logistici del 15% e risparmi complessivi derivanti dal monitoraggio dei processi pari al 40%.

Sistemi di gestione intelligente e sostenibile dei rifiuti, come quelli appena descritti, possono contribuire, in senso più ampio a:

- migliorare la qualità dell'ambiente urbano e la salute pubblica (SDG 3);
- ridurre il volume dei rifiuti destinati alle discariche, limitando la potenziale contaminazione del suolo e delle acque (SDG 6) e tutelando di conseguenza gli ecosistemi terrestri e marini(SDG 14,15);
- supportare la lotta al cambiamento climatico (SDG 13), riducendo le emissioni di CO<sub>2</sub> (Fatimah et al., 2020; Oliveira Neto et al., 2025).

Come illustrato nel paragrafo dedicato, la blockchain consente di introdurre sistemi di tracciabilità volti ad aumentare la sicurezza negli scambi tra le parti, ma soprattutto meccanismi di tokenizzazione e premiali volti ad accrescere la consapevolezza nella gestione dei rifiuti. Anche in questo caso sono disponibili evidenze quantitative, come riportato nello studio di Gong et al. (2022), che analizza i casi di diverse aziende pionieristiche quali Plastic Bank, Empower, CryptoCycle e Kabadiwalla Connect (KC).

Plastic Bank è un'impresa sociale canadese che si distingue per avere un sistema blockchain pienamente operativo, in particolare in paesi via di sviluppo come Indonesia, Brasile ed Egitto. In collaborazione con IBM, Plastic Bank ha sviluppato una piattaforma proprietaria che garantisce la tracciabilità e la piena trasparenza della catena di riciclo, dal momento della raccolta fino al trattamento finale. Il sistema si basa su un'applicazione mobile dotata di portafoglio elettronico (E-wallet), attraverso cui i raccoglitori ricevono bonus digitali per ogni chilogrammo di plastica consegnato. Questi token possono poi essere scambiati con valuta locale, beni o servizi essenziali, come assistenza sanitaria e spesa alimentare. L'impatto del modello è misurabile e significativo: la rete di Plastic Bank è cresciuta fino a includere più di 17.000 raccoglitori individuali in cinque paesi, contribuendo a un totale di 28,8 milioni di chilogrammi di plastica riciclata entro il 2021 ed evitando che un miliardo di bottiglie di plastica finisse negli oceani (Gong et al., 2022).

Accanto a questo modello consolidato, altri casi evidenziano l'alta efficienza del recupero abilitato dalla BCT. Empower utilizza la sua piattaforma per incentivare la raccolta su larga scala. La soluzione si basa su un'applicazione mobile che permette a chiunque di depositare rifiuti di plastica presso un punto di raccolta, ricevere una ricompensa finanziaria immediata sotto forma di token digitali (con un'equivalenza

potenziale di 1 token = 1 USD) e convertirli in valuta locale. Attraverso questo sistema è stato raggiunto un tasso di riciclo del 97% delle bottiglie di plastica (Gong et al., 2022; Myrer, 2020).

Nel Regno Unito, CryptoCycle dimostra l'applicabilità della BCT nel potenziare i sistemi di riciclo esistenti in contesti sviluppati. Attraverso il progetto pilota Reward4Waste (R4W), CryptoCycle ha creato una versione digitale dello schema di rimborso del deposito tradizionale<sup>6</sup>. L'innovazione consiste nell'assegnare a ogni bottiglia di plastica un codice crittografato univoco, gestito tramite una app per smartphone, che garantisce tracciabilità completa e previene le frodi. In questo modo il sistema ha dimostrato di poter raggiungere un tasso di riciclo del 90% senza la necessità di costosi distributori automatici inversi (Gong et al., 2022).

Un ultimo modello operativo emerge dal lavoro di Kabadiwalla Connect (KC), impresa sociale con sede a Chennai, in India. Operando in un contesto dove la gestione dei rifiuti è dominata da un'infrastruttura informale, KC utilizza la tecnologia blockchain non per creare un sistema da zero, ma per integrare e potenziare i raccoglitori di rifiuti esistenti nel sistema formale. L'obiettivo è sfruttare la BCT per creare soluzioni decentralizzate che riconoscano e valorizzino il ruolo di questi attori, con una previsione di riduzione del volume delle discariche locali del 70%. A livello sociale, il modello è intrinsecamente inclusivo, poiché i settori informali rappresentano oltre l'80% della raccolta dei rifiuti in quell'area. Sfruttando la trasparenza della BCT, KC mira a stabilizzare e aumentare i guadagni dei raccoglitori, con stime di profitti mensili che possono variare da 270 a 1.500 dollari, dimostrando come la tecnologia possa essere uno strumento di formalizzazione economica e giustizia sociale (Gong et al., 2022). Questi casi, insieme agli studi citati nei paragrafi precedenti, dimostrano quindi come la blockchain possa essere un potente strumento di innovazione sociale ed economica, in grado di generare impatti concreti e misurabili in coerenza con gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile. Essa può contribuire alla lotta contro la povertà (SDG 1), formalizzando e valorizzando il lavoro dei raccoglitori informali attraverso sistemi di pagamento digitali sicuri e verificabili, che trasformano attività precarie in fonti di reddito stabili.

---

<sup>6</sup> Il sistema di rimborso del deposito prevede che, all'acquisto di bevande in contenitori come bottiglie di plastica, il consumatore versi un piccolo deposito, che gli viene successivamente restituito quando riconsegna i contenitori per il riciclo (Gong et al., 2022)

Parallelamente, favorisce una maggiore inclusione finanziaria e riduzione delle disuguaglianze (SDG 10), offrendo accesso a strumenti digitali come portafogli elettronici e token convertibili in valuta anche a individui privi di conti bancari o collocati ai margini dell'economia formale.

Dal punto di vista economico e occupazionale, i modelli promuovono lavoro dignitoso e crescita economica sostenibile (SDG 8), generando microeconomie locali legate alla filiera del riciclo e incentivando comportamenti virtuosi tramite sistemi di ricompensa basati su token. La natura collaborativa dei modelli analizzati che coinvolgono imprese sociali, autorità locali, partner tecnologici e comunità di raccoglitori concretizza il principio di partnership per gli obiettivi (SDG 17), mostrando come la blockchain possa fungere da infrastruttura di fiducia e cooperazione tra stakeholder eterogenei (Franca et al., 2020).

Evidenze numeriche emergono anche in alcuni studi riguardanti la gestione dello spreco alimentare, citati nei paragrafi sull'IoT e l'intelligenza artificiale. Negli studi sperimentali di Iqbal & Kang (2024), è stato mostrato come, grazie al monitoraggio continuo dei sensori IoT delle condizioni di conservazione, sia possibile ottenere una riduzione del tasso medio di deterioramento (RoD) dei prodotti primari fino al 69%. Ciò permetterebbe di estendere la durata di vita dei prodotti fino a 2,4 volte in più e anche di allungare i cicli di rifornimento dell'inventario da 0,63 a 1,07 mesi, con un miglioramento nella pianificazione logistica. Il modello di filiera secondaria è in grado poi di rimuovere il 100% dei rifiuti alimentari raccolti dal sistema, trasformandoli in prodotti di valore come biocarburanti o fertilizzanti. Nel sistema presentato da Aytaç et al. (2020), l'integrazione dell'architettura IoT con l'elevata accuratezza dei modelli di clustering leggero e degli alberi decisionali ha prodotto riscontri positivi nei due ristoranti pilota in cui è stata implementata, con una riduzione osservata di circa il 10% degli sprechi alimentari. Nello studio di Hübner et al. (2024), l'implementazione del servizio cloud basato su ML "Foodforecast" ha dimostrato di poter ridurre in media del 30% i resi di prodotti da forno, principalmente pane e panini, portando a una riduzione aggregata di circa 2000 tonnellate di prodotti evitati in 175 panetterie (Hübner et al., 2024). I dati sopra citati dimostrano quindi un legame diretto con il raggiungimento dell'SDG 12, in particolare del 12.3 relativo alla riduzione dello spreco alimentare.

Negli studi sperimentali sull' utilizzo dell' intelligenza artificiale nella gestione dei rifiuti, oltre agli elevati livelli delle metriche di performance (spesso superiori al 90 %) sono stati riscontrati degli impatti veri e propri in relazione all' obiettivo dichiarato. Per esempio, nello studio di Khan et al. (2025) sul processo di digestione anaerobica, il modello DL ottimizzato può portare ad un aumento della resa di metano del 15/20 %. Nel modello proposto da Tian et al. (2025) , sul controllo degli impianti di incenerimento, le sperimentazioni sull' utilizzo combinato delle tecniche IT2FNN e DSSETM hanno riportato una riduzione degli interventi sugli attuatori di circa il 52,3%, evidenziando quindi un potenziale miglioramento dal punto di vista operativo.

Riscontri quantitativi si evidenziano anche nei sistemi di robotica avanzata. Nel report EIONET (2020) viene descritto come il robot “Daisy”, sviluppato da Apple, possa arrivare a smontare fino a 1,2 milioni di iPhone all' anno, consentendo il recupero selettivo di materiali ad alto valore quali stagno, alluminio e cobalto (Berg et al., 2020).

*Figura 3.7: Il robot Daisy di Apple per il disassemblaggio automatizzato degli iPhone*



*Fonte: Apple (2018)*

Nello stesso report vengono riportati anche i casi di Remeo e Zen Robotics, che impiegano tecnologie basate su riconoscimento delle immagini e scansione a infrarossi per l'identificazione e la separazione automatica dei materiali. Un singolo braccio robotico, in tali sistemi, può effettuare oltre 2.000 prese all'ora con una precisione superiore al 90%, grazie a processi di apprendimento continuo.

Risultato analogo emerge dallo studio di Kurniawan et al. (2023), che documenta come dei bracci robotici possano arrivare a completare 2.000 operazioni di prelievo all'ora con un'accuratezza del 99% nella classificazione dei rifiuti. L'automazione assistita dalla robotica può quindi contribuire ridurre i costi di manodopera, migliorando al contempo la velocità e la precisione nella separazione di tonnellate di spazzatura al giorno. Un altro ambito applicativo è rappresentato dalla gestione dei rifiuti da costruzione e demolizione. Come evidenziato nello studio di Maiurova et al. (2022), bracci robotici dotati di algoritmi di deep learning e computer vision possono riconoscere e separare materiali come legno, metallo e plastica da flussi misti, con livelli di purezza del 99% e portando ad una stima di possibile riduzione dei rifiuti non riciclati del 20 %. Oltre a migliorare l'efficienza dei processi, l'impiego di sistemi di robotica avanzata contribuisce anche al miglioramento delle condizioni lavorative. Riducendo la necessità di intervento manuale nella segregazione dei materiali, tali tecnologie limitano l'esposizione degli operatori a compiti complessi e, soprattutto, a sostanze pericolose e tossiche (in particolare nel trattamento dei RAEE), diminuendo il rischio di infortuni e malattie professionali (Kazancoglu et al., 2021). In questa prospettiva, le soluzioni analizzate supportano il raggiungimento degli SDG 3 e 8.

### **3.7 Criticità nell'adozione delle tecnologie 4.0 nella gestione dei rifiuti**

L'adozione delle tecnologie 4.0 nel settore della gestione dei rifiuti su larga scala, pur presentando un elevato potenziale trasformativo, è soggetta a ostacoli significativi, di diversa natura: infrastrutturale, tecnica, economica, cognitiva, sociale, normativa.

Sharma et al. (2020), nel loro studio che esamina le problematiche relative all'implementazione dell'IoT, evidenziano due grandi carenze digitali di base: l'assenza un'infrastruttura IT robusta e l'instabilità della connessione internet. In particolare, la prima si riferisce alla mancanza di server dedicati, centri di elaborazione dati e reti locali

in grado di gestire l'enorme volume di informazioni generato dai sensori IoT. Una connessione internet inadeguata, lenta o intermittente compromette invece la comunicazione in tempo reale tra i dispositivi e le piattaforme centrali, riducendo drasticamente i potenziali vantaggi derivanti dall'ottimizzazione dinamica dei percorsi di raccolta e dalla gestione intelligente dei flussi di rifiuti (Sharma et al., 2020). Tali criticità risultano ancora più marcate nei Paesi in via di sviluppo, dove si aggiunge spesso il problema di un'alimentazione elettrica instabile. Si tratta di un aspetto particolarmente rilevante in quanto le reti IoT, generando un flusso costante di dati provenienti da migliaia di sensori, richiedono un'alimentazione continua e infrastrutture di comunicazione affidabili per garantire la trasmissione e l'elaborazione delle informazioni (Atofarati et al., 2025; Ali et al., 2025).

Queste limitazioni non sono isolate, ma si inseriscono in una più ampia carenza di coordinamento infrastrutturale che la European Environment Agency ha definito come un vero e proprio "ecosistema digitale mancante" (Berg et al., 2020). Tale espressione evidenzia come le singole soluzioni tecnologiche, per quanto avanzate, non riescano a operare efficacemente in assenza di un ambiente integrato che includa reti mobili affidabili, banda larga diffusa, standard comuni e interfacce compatibili tra software e hardware di produttori diversi. La mancanza anche di uno solo di questi elementi può compromettere l'intero sistema, rendendo inefficace o frammentaria l'implementazione delle tecnologie 4.0.

La visione proposta dall'European Environment Agency riguarda principalmente le fondamenta dell'ecosistema digitale ossia di infrastrutture, reti e piattaforme, la cui incompletezza compromette la piena operatività dei sistemi. Ali et al. (2025) affrontano invece il problema a un livello più profondo, analizzando le criticità connesse all'integrazione combinata delle tecnologie abilitanti stesse. Gli autori, con particolare riferimento a IoT, AI, robotica e blockchain, sottolineano come l'assenza di protocolli comuni e la frammentazione dei formati di dati limitino l'efficienza complessiva dei sistemi. Ne deriva la difficoltà di far dialogare dispositivi, algoritmi e reti di diversa provenienza, riducendo l'efficacia complessiva dell'ecosistema digitale.

A queste problematiche sistemiche si aggiungono limiti legati al funzionamento interno e alle prestazioni delle singole soluzioni digitali impiegate nella gestione dei rifiuti.

Una prima problematica riguarda la scalabilità delle tecnologie, in particolare della blockchain. Le versioni pubbliche di tali sistemi continuano, infatti, a presentare limiti sostanziali di efficienza, quali la bassa velocità di transazione e l'elevata latenza di rete, che ne compromettono le prestazioni e ne rendono difficile l'applicazione in contesti che richiedono invece risposte in tempo reale, come la tracciabilità dei rifiuti o i sistemi di incentivi basati su token digitali.

La mancanza di "fault tolerance"<sup>7</sup> in ambienti urbani dinamici può portare a guasti nei sensori IoT, con conseguente perdita di dati o interruzioni di servizio. Inoltre, l'affidabilità dei sensori è influenzata da interferenze ambientali, problemi di calibrazione e degrado hardware, fattori che generano dati rumorosi e imprecisi (Ali et al., 2025).

Nonostante l'avanzamento della robotica e dell'intelligenza artificiale, ben delineati in paragrafi precedenti in termini di accuratezza, permangono vincoli strutturali legati alla capacità e alla precisione dei sistemi. Kurniawan et al. (2023) evidenziano la necessità di potenziare la capacità di carico dei bracci robotici, così da consentire la gestione di apparecchiature di grandi dimensioni come frigoriferi o congelatori, nonché di migliorare la precisione e la sensibilità dei sistemi di visione artificiale per identificare correttamente i materiali nei flussi di rifiuti.

Per quanto riguarda i modelli di intelligenza artificiale, un problema molto rilevante è rappresentato dalla dipendenza dai dati. Le performance dei modelli di intelligenza artificiale dipendono fortemente dalla quantità, varietà e accuratezza dei dati disponibili, che risultano invece spesso incompleti, distorti o non sufficientemente diversificati. In tali condizioni, in particolare quando si lavora con dataset di grandi dimensioni, gli algoritmi di intelligenza artificiale tendono a incorrere in fenomeni di overfitting, memorizzando i dati senza apprenderne i pattern, con conseguente perdita di capacità predittiva (Joshi et al., 2021).

---

<sup>7</sup> Con il termine *fault tolerance* si intende la capacità di un sistema di mantenere il proprio funzionamento anche in presenza di guasti o malfunzionamenti di uno o più componenti.

Come già evidenziato per i sistemi IoT, la disponibilità di energia elettrica stabile e continua rappresenta un prerequisito fondamentale per il funzionamento dei sistemi digitali avanzati. Tuttavia, la questione energetica non riguarda solo l'alimentazione delle infrastrutture, ma anche e soprattutto l'elevato fabbisogno associato al funzionamento delle tecnologie 4.0. L'uso di soluzioni avanzate come IoT, intelligenza artificiale, robotica e la blockchain, comporta infatti un notevole incremento dei requisiti computazionali e, di conseguenza, dei consumi di energia elettrica, specialmente in caso di utilizzo combinato. Tale aumento deriva ad esempio dagli algoritmi complessi di deep learning, che necessitano di hardware ad alte prestazioni per l'analisi predittiva e il controllo robotico, ai quali si sommano i flussi di dati generati dai sensori IoT e i meccanismi di consenso blockchain ad alta intensità, come il Proof-of-Work, che richiedono potenza di elaborazione sostanziale. La necessità di garantire interoperabilità e scalabilità tra sistemi eterogenei amplifica ulteriormente questi carichi, creando una domanda intensiva di risorse che rischia di compromettere gli stessi obiettivi di sostenibilità ambientale dei sistemi smart (Ali et al., 2025).

La complessità tecnica e infrastrutturale delle tecnologie 4.0 si riflette inevitabilmente sui costi di implementazione. La costruzione di reti digitali affidabili, l'impiego di hardware ad alte prestazioni e il mantenimento di sistemi interoperabili comportano spese elevate, soprattutto nelle fasi iniziali. Anche se nel lungo periodo queste soluzioni possono migliorare l'efficienza e ridurre i costi operativi, l'avvio richiede infatti investimenti consistenti in dispositivi, infrastrutture e formazione del personale (Seker et al., 2022). Il problema degli elevati costi iniziali è visto come un potente inibitore di qualsiasi forma di digitalizzazione avanzata, in particolare nel settore pubblico, dove si opera spesso con budget fissi e vincolati (Berg et al., 2020).

Quando l'adozione delle tecnologie 4.0 avviene in maniera integrata e simultanea, le complessità di ognuna di esse, legate all'integrazione dei vari componenti hardware e software specifici e spesso non pienamente compatibili, generano ulteriori esborsi per adattamento e interoperabilità. Inoltre, il rapido ritmo del cambiamento tecnologico crea il rischio di obsolescenza precoce, con la conseguente necessità di aggiornamenti continui e di elevati reinvestimenti per restare al passo (Ali et al., 2025).

Altri ostacoli importanti nell'adozione di queste tecnologie nella gestione dei rifiuti attengono alla sfera cognitiva, organizzativa e sociale, coinvolgendo diverse tipologie di attori.

La prima forma di resistenza riguarda i vertici decisionali. I manager potrebbero essere infatti riluttanti all'idea di adottare tecnologie complesse se vi è impossibilità di stabilire con certezza il ritorno economico degli investimenti effettuati, sia nella misura sia nella tempistica. Altro elemento ostativo è rappresentato dalla scarsa trasparenza dei meccanismi decisionali di alcune tecnologie emergenti. In particolare, questa problematica emerge nei modelli di intelligenza artificiale basate su reti neurali profonde, che operano spesso con un meccanismo noto come "scatola nera" (black box), fornendo previsioni e soluzioni senza esplicitarne le motivazioni sottostanti. Questa opacità, e la conseguente impossibilità per l'essere umano di accedere alla logica che ha condotto a un determinato risultato, potrebbe diminuire la fiducia del management nelle decisioni automatizzate, frenandone l'adozione e favorendo strategie di controllo più tradizionali (Joshi et al., 2021). Un esempio emblematico di tale dinamica è fornito dallo studio di Tian et al. (2025) sul controllo della temperatura degli impianti di incenerimento, descritto precedentemente. In un contesto ad alto rischio come quello dell'incenerimento, dove un errore dell'algoritmo può generare instabilità di sistema o un aumento delle emissioni nocive, manager e operatori potrebbero essere restii ad affidarsi completamente a sistemi che, pur performanti, non permettono di comprendere la logica alla base delle correzioni automatiche. In questo scenario, i modelli di Explainable AI potrebbero potenzialmente offrire una risposta alla sfida della trasparenza, permettendo di interpretare e spiegare le scelte dei sistemi di intelligenza artificiale. Tuttavia, la loro applicazione nel settore della gestione dei rifiuti e dell'economia circolare risulta ancora estremamente limitata (Huang et al., 2025).

Esistono poi delle barriere di natura cognitiva, organizzativa e sociale che incidono direttamente sulla capacità di istituzioni e di imprese di adattarsi ai nuovi paradigmi digitali. Tra le principali barriere emerge la carenza di competenze digitali, che coinvolge tanto la forza lavoro operativa quanto i livelli decisionali e amministrativi (Sharma et al., 2020). Molti pianificatori, tecnici e amministratori non dispongono delle conoscenze necessarie per gestire le nuove tecnologie, con effetti negativi sulla loro implementazione, manutenzione e integrazione nei processi organizzativi. La natura di queste tecnologie

presuppone che vi sia lo sviluppo di capacità multidisciplinari, che includano, ad esempio, competenze nella manutenzione dei robot, nell'installazione dei dispositivi IoT e nella gestione dei nodi blockchain (Ali et al., 2025).

Un ulteriore elemento critico è la mancanza di coordinamento interorganizzativo, accompagnata da resistenze legate a fattori cognitivi, culturali e motivazionali che permeano tutti i livelli, da quello decisionale a quello degli operatori sul campo. In alcuni casi, come nei progetti di tracciamento dei rifiuti elettronici basati su IoT, i lavoratori manifestano timori legati alla possibile interruzione dei processi tradizionali o alla perdita di autonomia operativa, evidenziando un fattore umano di rilievo nell'integrazione delle tecnologie 4.0 (Almelhem et al., 2025).

Inoltre, sussistono una serie di timori che condizionano negativamente la percezione di questi strumenti. Essi riguardano:

- la sorveglianza, poiché ogni fase di lavoro in un ambiente digitalizzato produce dati che possono essere utilizzati per monitorare, analizzare e confrontare le prestazioni individuali. Conseguentemente, domande come “Chi guida i veicoli di raccolta in modo inefficiente?” o “Quali squadre lavorano con maggiore produttività?” diventano emblematiche di una cultura della valutazione continua, che può minare la fiducia dei dipendenti e alimentare resistenze implicite;
- la formazione, in quanto la rapida evoluzione delle tecnologie richiede un costante aggiornamento delle competenze, spesso percepito come un onere aggiuntivo piuttosto che come un'opportunità;
- la sostituzione, poiché una parte della forza lavoro percepisce la l'automazione come una minaccia ai posti di lavoro esistenti, alimentando resistenze sindacali e timori di disoccupazione tecnologica, aggravando ulteriormente il divario tra innovazione e accettazione sociale. Numerosi studi segnalano infatti come l'automazione, guidata da AI e robotica, possa ridurre significativamente la domanda di manodopera non qualificata, fino a coinvolgere circa il 98% delle posizioni più ripetitive e manuali (Berg et al., 2020; Ali et al., 2025).

Ulteriori aspetti da considerare sono la partecipazione pubblica e la consapevolezza ambientale, condizioni indispensabili per il successo dei progetti di smart waste management. Molto spesso, però, la diffusione delle tecnologie digitali incontra barriere culturali legate alla scarsa alfabetizzazione tecnologica e alla mancanza di fiducia nei sistemi automatizzati. La percezione di una possibile invasione della privacy e della scarsa sicurezza dei dati è uno dei fattori più determinanti. Molti cittadini potrebbero, infatti, essere contrari all'utilizzo di applicazioni per la raccolta differenziata o alla condivisione di dati sulla produzione dei propri rifiuti, per timore di violazioni o usi impropri.

Le criticità normative e di governance costituiscono l'ultimo e più complesso livello delle barriere che ostacolano l'adozione delle tecnologie 4.0 nella gestione dei rifiuti. A differenza delle sfide economiche o tecniche, esse non riguardano singoli progetti o soluzioni, ma l'intero contesto istituzionale entro cui le innovazioni vengono sviluppate e implementate. L'assenza di un quadro regolatorio chiaro e coerente rappresenta una delle cause principali della lentezza con cui i sistemi digitali avanzati vengono adottati su larga scala. L'introduzione delle tecnologie digitali richiede infatti una base normativa che definisca diritti, responsabilità e standard di sicurezza comuni. Tuttavia, in molti Paesi, la legislazione ambientale e quella digitale procedono ancora su binari paralleli. Secondo Almelhem et al. (2025), la mancanza di direttive specifiche e di schemi di responsabilità condivisi crea un clima di incertezza giuridica che scoraggia gli investimenti e riduce l'interesse degli operatori privati. Inoltre, le piattaforme IoT e blockchain sollevano questioni cruciali di conformità al GDPR e di responsabilità nel trattamento delle informazioni sensibili. La proprietà dei dati raccolti dai sensori, ad esempio, non è sempre chiaramente definita: spesso rimane incerta la distinzione tra dati generati da enti pubblici e quelli prodotti da operatori privati, creando zone grigie che rendono difficile stabilire chi sia il reale titolare o responsabile in caso di violazioni. A ciò si aggiungono le problematiche legate alla proprietà intellettuale, particolarmente rilevanti nei modelli di digital twin. I produttori possono essere riluttanti a condividere dettagli progettuali o informazioni tecniche per proteggere i propri diritti di IP, ostacolando la collaborazione necessaria per il riciclo e la rigenerazione dei prodotti. Definire confini chiari nella condivisione dei dati diventa quindi essenziale per favorire

processi di economia circolare senza compromettere la tutela dei diritti industriali (Wang & Wang, 2018).

Esistono infine criticità di natura etica e giuridica, legate in particolare alla crescente necessità di definire un quadro di responsabilità chiaro per l'utilizzo di robot e sistemi autonomi. Rimane infatti irrisolto il tema di chi debba essere ritenuto responsabile in caso di incidenti o errori operativi causati da robot di selezione o da sistemi di intelligenza artificiale che gestiscono autonomamente i flussi di rifiuti. Allo stesso modo, la diffusione di smart contracts basati su blockchain solleva interrogativi circa la loro validità giuridica e il riconoscimento legale delle transazioni automatizzate (Ali et al., 2025).

## **CAPITOLO IV. STARTUP E PMI INNOVATIVE NELLA GESTIONE DEI RIFIUTI: UN'ANALISI DELLE SOLUZIONI TECNOLOGICHE 4.0**

### **4.1 Metodologia dell'analisi**

L'analisi presentata in questo capitolo si basa su una ricerca esplorativa condotta a partire dal registro delle startup e delle PMI innovative, sezione speciale del Registro Imprese, costantemente aggiornata, che raccoglie oltre dodicimila imprese innovative attive sul territorio nazionale. La scelta di tale fonte risponde all'esigenza di analizzare un insieme strutturato e ufficiale di imprese caratterizzate, per definizione, da un elevato contenuto di innovazione tecnologica e organizzativa.

Per individuare le imprese operanti nell'ambito del Waste Management, il settore è stato definito in senso ampio e funzionale, includendo non solo le aziende direttamente impegnate nella gestione operativa dei rifiuti, ma anche quelle che sviluppano prodotti, servizi e soluzioni tecnologiche a supporto delle varie fasi del ciclo di gestione dei rifiuti.

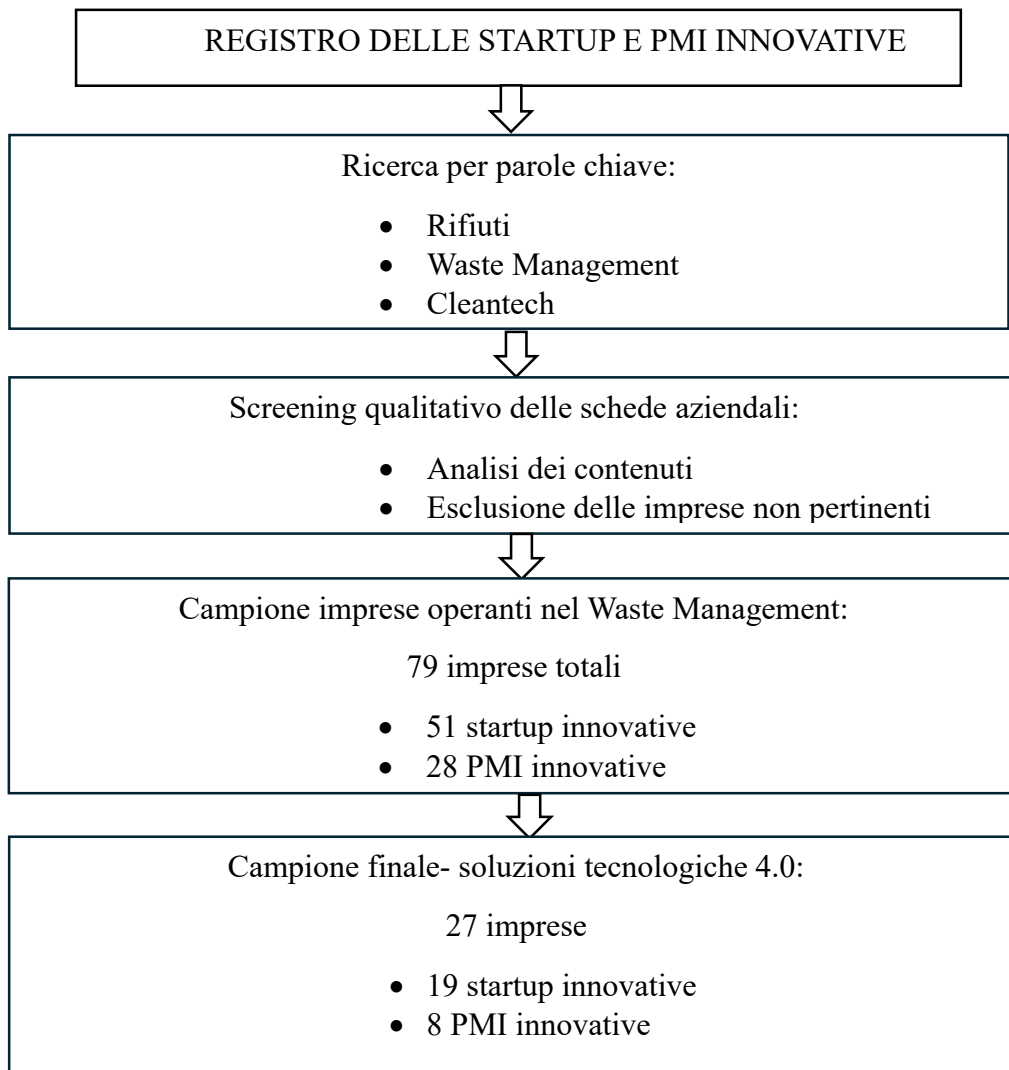
La ricerca è stata effettuata mediante l'utilizzo di tre parole chiave principali: "Rifiuti", "Waste Management" e "Cleantech". L'impiego di più parole chiave risponde a un criterio di cautela metodologica, finalizzato a ridurre il rischio di tralasciare imprese potenzialmente rilevanti e a garantire la massima completezza possibile del campione analizzato. Per ciascuna parola chiave, il registro ha restituito un numero complessivo di risultati, successivamente sottoposti a un processo di analisi qualitativa mediante un attento esame delle informazioni relative a ogni impresa. A questo si è aggiunta una lettura completa delle schede, finalizzata a escludere le imprese non pertinenti rispetto all'ambito della gestione dei rifiuti.

La ricerca tramite la parola chiave "Rifiuti" ha prodotto 967 risultati complessivi, dai quali sono state selezionate 44 startup innovative e 27 PMI innovative coerenti con l'oggetto della ricerca. L'utilizzo della parola chiave "Waste Management" ha restituito 3.950 risultati totali, da cui sono emerse 14 startup innovative e 7 PMI innovative rilevanti. Infine, la parola chiave "Cleantech" ha generato 561 risultati complessivi, consentendo di selezionare 22 startup innovative e 9 PMI innovative.

Il campione di imprese individuato attraverso il registro comprende complessivamente 79 realtà, di cui 51 startup innovative e 28 PMI innovative, operanti nell'ambito della gestione dei rifiuti e delle tecnologie a essa collegate.

Le imprese così individuate sono state successivamente sottoposte a un ulteriore livello di analisi, finalizzato all'individuazione delle realtà che propongono soluzioni riconducibili alle tecnologie 4.0. Questo ultimo step di selezione ha portato all'identificazione di 19 startup e 8 PMI innovative caratterizzate da un elevato contenuto tecnologico, che costituiscono il campione finale oggetto dell'analisi sviluppata nei paragrafi successivi.

*Figura 4.2: Processo di selezione del campione*



*Fonte: Elaborazione personale*

## 4.2 Profilo anagrafico, organizzativo e territoriale

### 4.2.1 Profilo giuridico ed anagrafico

Un primo elemento descrittivo riguarda la forma giuridica delle imprese analizzate. Dall'esame del campione emerge una netta prevalenza della Società a Responsabilità Limitata (S.R.L.), adottata dalla quasi totalità delle startup e delle PMI innovative 4.0 considerate. Solo in due casi, entrambi riferiti a startup innovative, è stata riscontrata la forma S.R.L.S. (*Redigits S.R.L.S.* ed *Eco Waste Management S.R.L.S.*) a conferma del fatto che la S.r.l. ordinaria costituisce il modello giuridico di riferimento per imprese che, pur operando in una fase iniziale o di crescita, necessitano di una struttura sufficientemente flessibile e compatibile con l'ingresso di investitori esterni.

Questa struttura societaria risulta perfettamente coerente con l'età delle imprese, che nate quasi tutte negli ultimi anni. Per quanto riguarda le startup innovative, esse rientrano nei limiti temporali previsti dalla normativa vigente<sup>1</sup>, essendo state costituite in un arco temporale compreso tra il 2020 e il 2025, con due aziende nate nel corso dell'ultimo anno: *Wai S.R.L.* e *A Smart Cup S.R.L. SB.* Anche le PMI innovative presentano un'età relativamente giovane, con una media pari a circa 7–8 anni, con però delle eccezioni rilevanti.

Si registra infatti la presenza della *Moltosenso S.R.L.*, la cui costituzione risale al 2009, che tuttavia continua a mantenere i requisiti di innovatività e a proporre soluzioni riconducibili alle tecnologie 4.0. Al contempo, si osservano imprese che hanno raggiunto lo status di PMI innovativa in tempi rapidissimi, essendo state costituite nel 2020, come nel caso di *MKM Cube S.R.L.* e *9-Tech S.R.L.*, a dimostrazione di come sia possibile strutturarsi velocemente in questo settore.

### 4.2.2 Capitale umano e prevalenza giovanile

Coerentemente con quanto emerso dal profilo giuridico, caratterizzato dalla totalità di S.R.L., anche l'analisi della forza lavoro conferma la dimensione contenuta delle imprese del campione.

---

<sup>1</sup> Ai sensi dell'art. 25, comma 2, lett. b) del D.L. 179/2012, uno dei requisiti oggettivi per la qualifica di startup innovativa è che la società sia costituita da non più di sessanta mesi.

La maggior parte delle startup (8 su 19) e delle PMI innovative (4 su 8) rientra nella fascia 0–4 addetti, mentre alcuni casi in fase di crescita si collocano nella classe 5–9 addetti (2 startup e 1 PMI). Solo la PMI innovativa *Hiro Robotics S.R.L. SB* presenta una struttura più articolata seppur sempre ristretta, collocandosi nella fascia 10–19 addetti. Nei restanti casi non sono state dichiarate informazioni a riguardo e risultano pertanto classificate come N.D.

Questa configurazione è coerente con la fase di sviluppo delle imprese analizzate e con la natura delle tecnologie adottate, che consentono di operare con team ristretti e altamente specializzati.

All'interno di questa struttura organizzativa snella assume rilievo l'analisi della componente demografica della governance. Un'ulteriore dimensione di analisi riguarda infatti la prevalenza giovanile all'interno delle imprese. Tale informazione è disponibile principalmente per le startup innovative, mentre risulta più limitata per le PMI innovative. Nel campione considerato, la presenza di una prevalenza giovanile è riscontrabile in 7 startup su 19, mentre solo 2 PMI innovative su 8 presentano questa caratteristica.

In alcuni casi la componente giovanile è dichiarata come maggioritaria o fortemente prevalente, mentre in un solo caso è indicata l'esclusiva presenza di giovani soci<sup>2</sup>, ossia nella *A Smart Cup S.r.l. SB*. Pur trattandosi di un dato parziale, esso suggerisce come una quota non trascurabile delle startup innovative nel settore della gestione dei rifiuti sia guidata da imprenditori giovani, probabilmente favoriti dalla natura digitale e tecnologica delle soluzioni sviluppate.

#### **4.2.3 Localizzazione geografica della sede legale**

L'analisi della localizzazione geografica, basata sulla sede legale delle imprese, evidenzia una differenziazione tra startup e PMI innovative. Con riferimento alle startup innovative la distribuzione geografica risulta eterogenea e diffusa sull'intero territorio nazionale. Le regioni maggiormente rappresentate sono Campania e Lazio, entrambe con 4 startup innovative ciascuna, seguite da Veneto ed Emilia-Romagna con 2 unità. Le

---

<sup>2</sup> La prevalenza giovanile (così come quella femminile o straniera) è definita secondo i criteri adottati dal Registro delle Imprese, che tengono conto congiuntamente della quota di capitale sociale e della composizione dell'organo amministrativo. In particolare, la prevalenza è considerata maggioritaria quando il valore medio supera il 50%, forte oltre il 66% ed esclusiva se pari al 100%.

restanti imprese risultano localizzate in Piemonte, Lombardia, Calabria, Sicilia, Basilicata, Sardegna e Abruzzo, ciascuna con una sola startup. A livello urbano, le sedi legali si collocano sia in grandi centri metropolitani, come Roma, Milano, Napoli, Torino e Bologna, sia in città di dimensioni medio-piccole, tra cui Benevento, Avellino, Matera, Lanciano, Catanzaro, Biancavilla, Bientina, Olevano sul Tusciano, Mogliano Veneto e Cagliari.

Per quanto riguarda le PMI innovative (8 unità), la distribuzione geografica appare invece più concentrata. In particolare, Toscana e Lombardia risultano le regioni con il maggior numero di imprese (2 ciascuna), mentre Umbria, Liguria, Piemonte e Veneto presentano una sola PMI innovativa. A livello comunale, le sedi risultano localizzate prevalentemente nei capoluoghi di regione del Centro-Nord, quali Milano, Firenze, Torino e Genova, oltre che in comuni come Poggibonsi, Eraclea e Corciano. La localizzazione prevalente nel Nord Italia può essere presumibilmente ricondotta alla maggiore presenza di distretti industriali strutturati, infrastrutture produttive consolidate e competenze tecniche specialistiche, coerenti con lo sviluppo di soluzioni impiantistiche, ingegneristiche e tecnologicamente più mature. Fa eccezione la *Recuperiamo S.R.L. SB*, localizzata in Centro Italia, precisamente nel comune di Corciano (PG).

**Tabella 4.2: Distribuzione Geografica delle startup e PMI innovative**

<b>Regione</b>	<b>Startup innovative</b>	<b>PMI innovative</b>	<b>Totale imprese</b>
Campania	4	–	4
Lazio	4	–	4
Veneto	2	1	3
Emilia-Romagna	2	–	2
Toscana	–	2	2

<b>Regione</b>	<b>Startup innovative</b>	<b>PMI innovative</b>	<b>Totale imprese</b>
Lombardia	1	2	3
Piemonte	1	1	2
Liguria	–	1	1
Umbria	–	1	1
Calabria	1	–	1
Sicilia	1	–	1
Basilicata	1	–	1
Sardegna	1	–	1
Abruzzo	1	–	1
<b>Totale</b>	<b>19</b>	<b>8</b>	<b>27</b>

*Fonte: elaborazione personale sulla base dei dati del Registro delle Imprese*

### **4.3 Analisi dei requisiti di innovazione e della maturità tecnologica**

Una dimensione di analisi importante che emerge nel registro riguarda i requisiti di innovazione tecnologica dichiarati dalle startup e PMI innovative. Per quanto riguarda le startup innovative, la normativa prevede che venga soddisfatto almeno uno dei seguenti criteri:

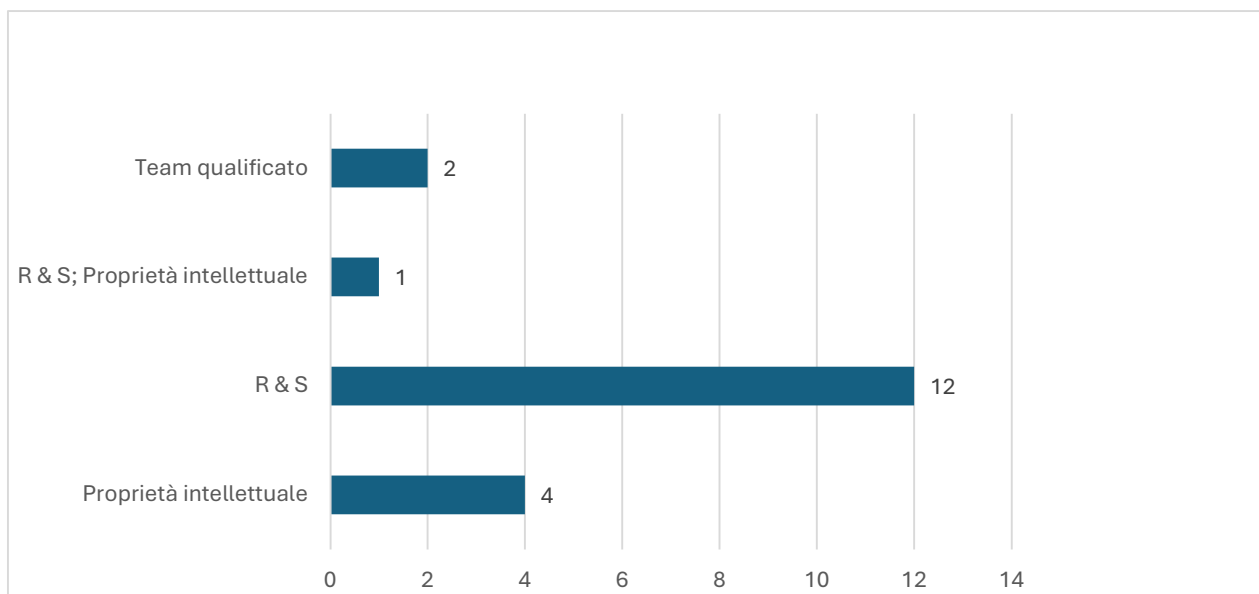
- un'elevata incidenza delle spese in ricerca e sviluppo, ossia almeno il 15 % del maggiore tra costi e valore totale della produzione
- un personale altamente qualificato, con un team composto per almeno 2/3 da soggetti in possesso di laurea magistrale oppure per 1/3 da dottorandi,

dottori di ricerca o laureati con 3 anni di esperienza in attività di ricerca certificata;

- la titolarità di brevetti o software registrati (Ministero delle Imprese e del Made in Italy, n.d.).

Dall'analisi del campione emerge una netta prevalenza del requisito legato alle attività di ricerca e sviluppo (12), che risulta il più frequentemente dichiarato dalle startup considerate. In misura minore, alcune imprese dichiarano la titolarità di diritti di proprietà intellettuale (4), mentre il requisito relativo alla presenza di un team altamente qualificato (2) risulta il meno diffuso. Si registra un solo caso, quello di *Pixies Urban Lab S.R.L. SB*, che soddisfa simultaneamente più di un requisito, combinando attività di ricerca e sviluppo e proprietà intellettuale.

**Grafico 4.1: Distribuzione delle startup innovative per requisito di innovazione tecnologica soddisfatto.**



Fonte: Elaborazione propria sulla base dei dati del Registro delle Imprese

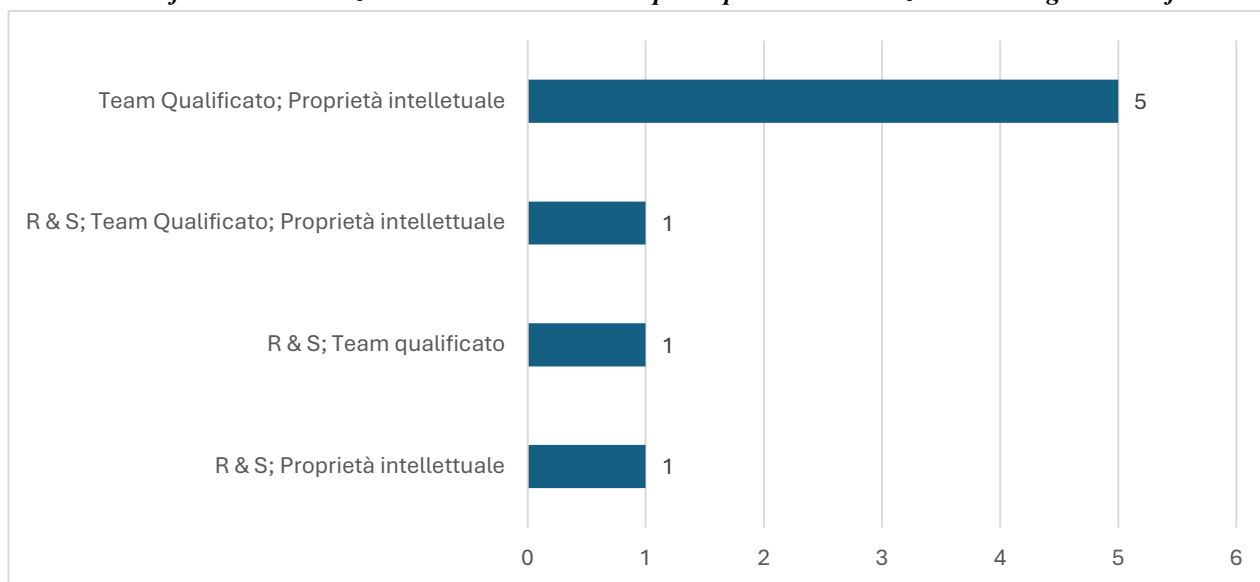
Per quanto riguarda le PMI innovative, il quadro appare differente, poiché la normativa richiede il soddisfacimento di almeno 2 dei 3 requisiti sopracitati.

In particolare, è richiesto che:

- almeno il 3% del maggiore tra costi e valore totale della produzione sia destinato ad attività di ricerca e sviluppo;
- il team sia composto per 1/3 da personale in possesso di laurea magistrale oppure per 1/5 da dottorandi, dottori di ricerca o laureati con 3 anni di esperienza in attività di ricerca certificata;
- l'impresa sia depositaria o licenziataria di privativa industriale, oppure titolare di software registrato (Ministero delle Imprese e del Made in Italy, n.d.)

Con riferimento al campione selezionato, per le PMI innovative 4.0 la combinazione “Team qualificato + Proprietà intellettuale” (5) risulta la più ricorrente, mentre le altre combinazioni appaiono più marginali. Si rileva inoltre un caso di impresa che soddisfa contemporaneamente tutti e tre i requisiti, ossia *9-Tech S.R.L.*

**Grafico 4.2: distribuzione delle PMI innovative per requisito di innovazione tecnologica soddisfatto**



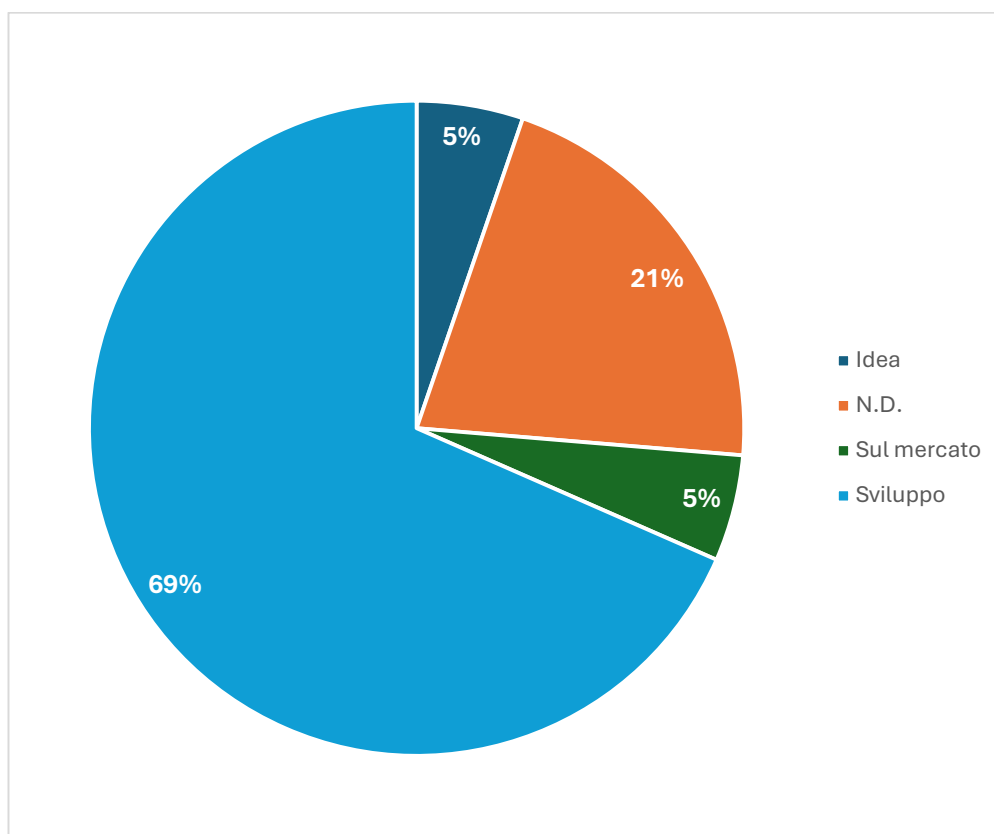
Fonte: Elaborazione personale sulla base dei dati del Registro delle Imprese

Limitando l'analisi sulle sole startup innovative, è possibile approfondire due ulteriori dimensioni informative: lo stadio di sviluppo e lo stato di avanzamento del prodotto/servizio offerto.

Per quanto riguarda il primo aspetto, la distribuzione evidenzia come la maggior parte delle imprese si collochi nella fase di sviluppo (69 %). Solo una quota ridotta delle imprese dichiara di essere già sul mercato (5%), mentre una percentuale analoga risulta ancora nella fase di ideazione.

Una parte considerevole di questa distribuzione (21 %) è classificata come N.D., a causa della mancanza di informazioni aggiornate all'interno delle schede pubbliche.

**Grafico 4.3: Distribuzione delle startup innovative per stadio di sviluppo**

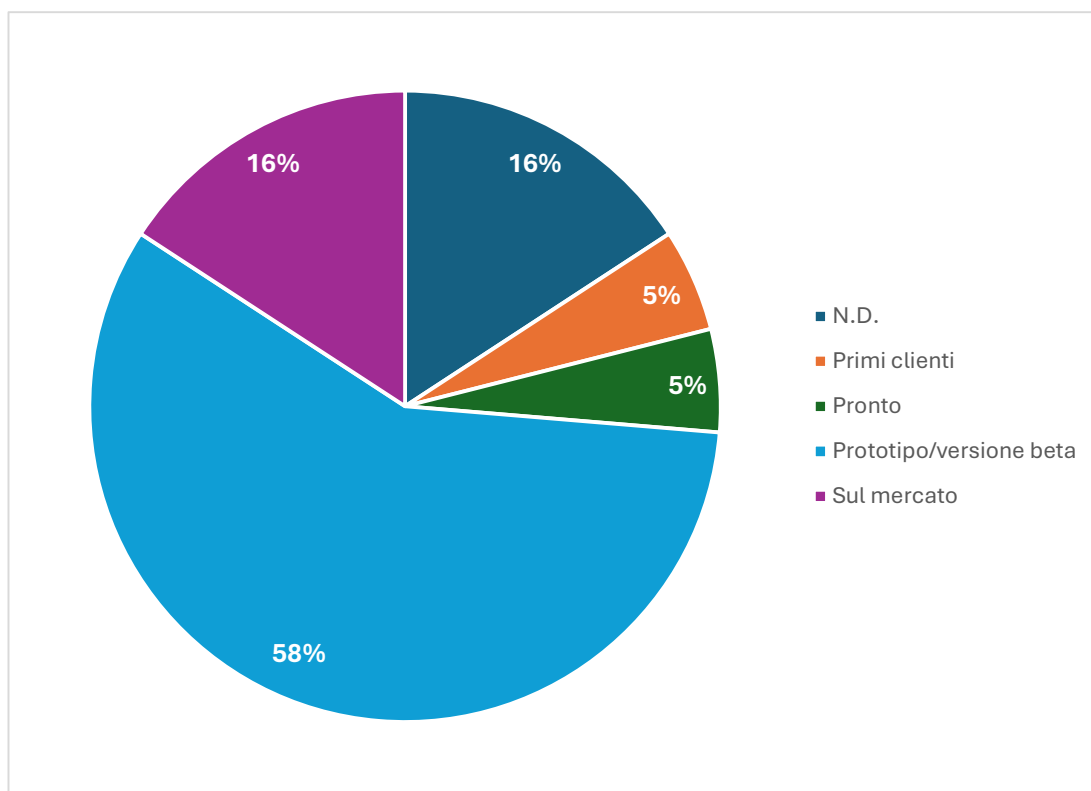


*Fonte: Elaborazione personale sulla base dei dati del Registro delle Imprese*

Per quanto riguarda l'analisi dello stato di avanzamento del prodotto o servizio, emerge come la modalità più frequente sia rappresentata dalla fase di prototipo o versione beta, che caratterizza circa il 60 % delle imprese del campione preso in esame.

Accanto a queste, si osserva la presenza di startup che dichiarano soluzioni pronte, sul mercato o nella fase dei primi clienti, indicando che una parte delle imprese ha avviato un percorso di validazione commerciale. Anche per questa voce emerge una percentuale non irrilevante di imprese che non hanno specificato l'informazione (16 %) e che, pertanto, sono stati classificati come N.D.

**Grafico 4.4: Distribuzione delle startup innovative per stato di avanzamento del prodotto/servizio**



*Fonte: Elaborazione personale sulla base dei dati del Registro delle Imprese*

#### 4.4 Canali di vendita e aree geografiche di interesse

Per quanto riguarda i canali di vendita, l'informazione disponibile risulta complessivamente più completa per le PMI innovative rispetto alle startup, per le quali si riscontra una frequente assenza di dati dichiarati. In entrambi i segmenti, emerge tuttavia una netta prevalenza del canale diretto, spesso affiancato dall'utilizzo di agenti commerciali.

Nel caso delle startup innovative vi sono diversi casi di informazioni non dichiarate (N.D.), aspetto coerente con una fase ancora iniziale di strutturazione del modello di business o con strategie commerciali in via di definizione (*Waste Engineering S.R.L.*, *GreenX S.R.L.*, *Wasteex S.R.L.*, *Rifiutoo S.R.L.*, *Etrash S.R.L.*). Tra le imprese che dichiarano esplicitamente il canale di vendita, il ricorso alla vendita diretta risulta predominante, come nei casi di *Startengy S.R.L.*, *Neuravision S.R.L.*, *Orbita Technologies S.R.L.* e *Iotilize.me S.R.L.*, spesso affiancata dall'impiego di agenti commerciali, come nel caso di *ReLearn S.R.L.*, *Greenvincible S.R.L.*, *Sustained S.R.L. Società Benefit*. In alcuni casi si osserva l'adozione di strategie multicanale, che includono, oltre alla vendita diretta, la grande distribuzione organizzata (GDO) e l'e-commerce, soprattutto per soluzioni orientate al mercato consumer o semi-consumer. Esempi in tal senso sono rappresentati da *Pixies Urban Lab S.R.L. SB*, *Repod S.R.L.* e *Redigits S.R.L.S.*, mentre *Ganiga Innovation S.R.L.* si distingue per l'utilizzo congiunto di tutti i principali canali di vendita.

A differenza delle startup innovative, per le quali l'assenza di dati emerge in maniera rilevante, nelle PMI innovative si osserva una totale disponibilità di informazioni. Tutte le imprese analizzate dichiarano infatti esplicitamente i propri canali di vendita, confermando un grado di maturità organizzativa nettamente superiore. Il ricorso alla vendita diretta è unanime, affiancato in casi specifici, quali *Recuperiamo S.R.L. SB*, *MKM Cube S.R.L.* ed *EXE – Engineering for Environment S.R.L.*, dall'utilizzo di reti di agenti commerciali. Tale assetto distributivo, definito e trasparente, presuppone una struttura commerciale consolidata, coerente con la maggiore anzianità operativa emersa dall'analisi anagrafica.

Accanto ai canali di vendita, l'analisi delle aree geografiche di interesse consente di delineare l'orientamento territoriale delle imprese. Dai dati emerge chiaramente che il

mercato italiano rappresenta la base operativa comune, da cui si sviluppa una marcata proiezione internazionale che caratterizza la quasi totalità del campione.

Con specifico riferimento alle startup innovative, il quadro appare frammentato e caratterizzato da una polarizzazione tra imprese che non dichiarano esplicitamente il mercato di riferimento e imprese che presentano una marcata vocazione internazionale. Su un totale di 19 rilevazioni, una quota rilevante (6 casi, pari a quasi il 32 % del sotto-campione) non riporta informazioni sull'area geografica di interesse. Tale assenza di dati è presumibilmente riconducibile alla fase embrionale di molte realtà early stage, che potrebbero non aver ancora formalizzato una strategia di espansione commerciale definita o che operano in una fase di sviluppo pre-commerciale.

Tra le startup che esplicitano l'area di interesse, emerge un orientamento significativo verso i mercati esteri. In particolare, l'Unione Europea si configura come il principale mercato di riferimento, citato nella quasi totalità delle dichiarazioni di internazionalizzazione. Risulta inoltre rilevante la propensione verso mercati extra-europei geograficamente distanti. In questo senso, le startup *Neuravision S.R.L.*, *Repod S.R.L.* e *Iotilize.me S.R.L.* dichiarano contemporaneamente un interesse verso l'America Settentrionale e l'Asia Orientale, suggerendo un elevato potenziale di scalabilità delle soluzioni sviluppate.

Un quadro differente è quello mostrato da *ReLearn S.R.L.* e *Pixies Urban Lab S.R.L. SB.* In questi due casi viene infatti dettagliata una presenza specifica in diverse regioni italiane (Lombardia, Lazio e Piemonte per *ReLearn*; Emilia-Romagna, Lazio, Lombardia, Piemonte, Toscana, Trentino-Alto Adige e Veneto per *Pixies Urban Lab*) affiancata all'Unione Europea.

Il segmento delle PMI innovative presenta un quadro complessivamente più definito e omogeneo, con una minore incidenza di informazioni mancanti (un solo caso di N.D. su otto imprese). L'Unione Europea risulta l'area di interesse in quasi la totalità delle PMI analizzate, mentre in alcuni casi emerge un'estensione verso mercati occidentali maturi, in particolare l'America Settentrionale. Tale orientamento è riscontrabile in particolar modo in *EXE – Engineering for Environment S.R.L.* e *9-Tech S.R.L.*, a conferma di strategie di internazionalizzazione più selettive e progressivamente consolidate.

## **4.5 Analisi qualitativa delle soluzioni tecnologiche**

Dopo aver delineato il profilo anagrafico e strutturale del campione, l'indagine si sposta sull'analisi qualitativa delle soluzioni tecnologiche offerte dalle imprese in questione. Attraverso l'esame approfondito delle tecnologie abilitanti e dei prodotti e servizi proposti, è stato possibile categorizzare le aziende del campione in quattro macro-cluster tecnologici principali, riconducibili alle diverse fasi del ciclo di gestione dei rifiuti: raccolta e logistica, trattamento, prevenzione e riduzione dello spreco alimentare, smaltimento in discarica.

### **4.5.1 La raccolta e la logistica dei rifiuti 4.0**

In continuità con quanto emerso dall'analisi della letteratura nei capitoli precedenti, dove la fase di raccolta rappresenta l'ambito maggiormente indagato nell'applicazione delle tecnologie digitali al Waste Management 4.0, anche l'analisi delle startup e delle PMI innovative mostra una sostanziale coerenza. Il cluster della raccolta e logistica dei rifiuti risulta infatti il più numeroso, a conferma della centralità di questa fase lungo l'intera filiera.

Un primo caso emblematico all'interno del cluster è rappresentato da *ReLearn S.R.L.*, startup che propone un approccio integrato alla gestione dei rifiuti nei contesti aziendali attraverso la soluzione NANDO, un sensore IoT applicabile ai contenitori esistenti che utilizza algoritmi di intelligenza artificiale per riconoscere automaticamente la tipologia di rifiuto conferito. Ad ogni utilizzo, il sistema acquisisce immagini e dati quantitativi che consentono di classificare i materiali, stimarne il peso e calcolare l'impatto ambientale in termini di CO<sub>2</sub>.

Inoltre, ReLearn propone meccanismi di gamification ed educazione ambientale, finalizzati a stimolare comportamenti virtuosi e ad aumentare la consapevolezza degli utenti (Registro delle Imprese, n.d.).

**Figura 4.3: Il sensore IoT NANDO installato su un cestino per la raccolta differenziata per la scansione e classificazione automatica dei rifiuti.**



*Fonte: Gruppo Iren (2023)*

L'efficacia della soluzione trova conferma in diversi casi applicativi concreti, tra cui spicca la collaborazione con Sisal. Il progetto, sviluppato tra il 2023 e il 2025 negli uffici di Milano e Roma, ha previsto una riprogettazione degli spazi di lavoro mediante hub centralizzati di raccolta e l'implementazione di dispositivi plug-and-play dotati di AI, con un'accuratezza superiore al 92% nell'identificazione automatica degli scarti, supportata dal coinvolgimento attivo dei dipendenti tramite la piattaforma NANDO.Quiz. Tale approccio integrato ha generato risultati misurabili: un incremento di 10 punti percentuali nella qualità del riciclo, con l'82% dei rifiuti complessivi correttamente recuperati (9.369 kg) e una riduzione stimata di 3.591 kg di CO<sub>2</sub> equivalente (Gatti, 2025).

Risultati analoghi emergono dalla collaborazione con FPT Industrial, leader globale nel settore dei propulsori e veicoli industriali. L'azienda ha implementato la soluzione NANDO per risolvere le problematiche tipiche della gestione dei rifiuti negli uffici, caratterizzate spesso da una carenza di dati in tempo reale e da frequenti errori nel conferimento dei materiali. Attraverso l'utilizzo della NANDO.Dashboard è stato possibile tracciare costantemente quanto fossero pieni i contenitori in ogni sede, consentendone lo svuotamento solo quando effettivamente necessario e ottimizzando così i processi logistici interni.

In un arco temporale ridotto, i risultati quantificabili hanno evidenziato un progresso dell'86% nella precisione della raccolta differenziata da parte del personale. Ciò ha consentito di destinare al riciclo l'89% degli oltre 318 kg di scarti generati, evitando il conferimento in discarica o l'incenerimento e determinando un risparmio di 89,48 kg di CO<sub>2</sub> (Gatti, 2024).

Un secondo caso guida è rappresentato da *Iotilize.me S.R.L.*, che supporta le aziende di raccolta rifiuti nel processo di digitalizzazione ed efficientamento operativo della logistica. La proposta di *Iotilize.me* si distingue per il forte orientamento alla gestione dei flussi di raccolta, in particolare attraverso sensori RAR (Resistenti, Adattabili, Ricaricabili), con benefici diretti in termini di riduzione dei costi e delle emissioni.

L'azienda stima un risparmio medio pari ad almeno il 30% sui costi logistici, grazie alla diminuzione del numero di viaggi, al miglioramento del carico dei mezzi e alla riduzione del consumo di carburante (Registro delle Imprese, n.d.).

L'efficacia del sistema sviluppato da *Iotilize.me* è documentata da diversi casi studio che ne evidenziano la versatilità in condizioni operative complesse. Nel tracciamento dei fanghi di depurazione, l'adozione di tali sensori ha permesso di superare le difficoltà legate alla gestione continua degli scarti. Nello specifico, i dispositivi installati sul lato corto dei container e configurati per inviare misurazioni ogni ora sono in grado di riconoscere la tipologia di distribuzione del fango, identificando anche la tipica conformazione a piramide che si crea al centro del cassone. Questo garantisce una stima del peso con una precisione del 99%, eliminando la necessità di verifiche visive da parte degli operatori e permettendo di coordinare i ritiri in modo automatico (*iotilize.me*, n.d.).

Un'altra applicazione riguarda il monitoraggio dei rifiuti solidi industriali, come legname, imballaggi in plastica, scarti alimentari e materiali edili. I sensori protetti da una scocca in acciaio per resistere agli urti durante le operazioni di carico tracciano volumi fino a 30 metri cubi e forniscono la posizione GPS dei container. Il sistema incrementa significativamente la sicurezza del personale, eliminando la necessità di arrampicarsi sui container per i controlli manuali, e ottimizza la logistica prenotando il ritiro autonomamente solo al raggiungimento del riempimento effettivo (*iotilize.me*, n.d.).

Il terzo e ultimo caso studio riportato dall'azienda concerne l'integrazione della tecnologia sugli autocompattatori, agevolando quindi il lavoro degli autisti, che spesso devono fare affidamento solo sulla propria esperienza per valutare il carico residuo. Installato dietro la paratia di espulsione e collegato direttamente all'alimentazione del mezzo, il dispositivo fornisce una misurazione continua (da 0 a 100%), testata su veicoli fino a 19 tonnellate. Questa consapevolezza in tempo reale permette di modificare dinamicamente i percorsi di raccolta in accordo con la logistica, massimizzando i volumi caricati per singolo turno e riducendo drasticamente le inefficienze di coordinamento (ioutilize.me, n.d.).

Oltre ai casi guida, il cluster include altre imprese che offrono soluzioni per la digitalizzazione del punto di conferimento, in particolare attraverso lo sviluppo di cestini intelligenti dotati di sensoristica avanzata e/o sistemi AI, come *MKM Cube S.R.L.*, *Etrash S.R.L.* e *Ganiga Innovation S.R.L.*

In particolare, quest'ultima ha sviluppato il cestino intelligente *Hooly!*, in grado di riconoscere automaticamente i rifiuti conferiti, ottimizzare la raccolta differenziata e interagire direttamente con i cittadini. Il sistema integra sensori, intelligenza artificiale e una piattaforma digitale che consente di raccogliere dati sui flussi di rifiuti e sugli sprechi, supportando la pianificazione dei percorsi di svuotamento (Registro delle Imprese, n.d.). Un elemento caratteristico di Ganiga Innovation risiede nell'introduzione di meccanismi di incentivo economico e cashback, che trasformano il corretto conferimento in un comportamento premiato: attraverso un'app dedicata, l'utente può localizzare il cestino più vicino, essere riconosciuto al momento del conferimento e ottenere benefici sotto forma di sconti, buoni spesa o riduzioni sulla tassa rifiuti (Mantovani, 2022).

Accanto a queste soluzioni si collocano *Repod S.R.L.* e *SustAIneed S.R.L. SB*, che intervengono in modo diretto sulla fase di selezione automatizzando il processo di riconoscimento dei materiali. Repod propone un omonimo elettrodomestico intelligente in grado di differenziare i rifiuti per macro e micro-categorie, pretrattarli e sigillarli in contenitori dedicati, preservando la purezza delle MPS (materie prime seconde) e accorciando la filiera del riciclo (Registro delle Imprese, n.d.). SustAIneed, attraverso il sistema MINOX, propone una soluzione di automazione della raccolta differenziata che combina scienze dei materiali e AI (Sust AI need, n.d.).

Un terzo filone tecnologico, complementare ai precedenti, riguarda la raccolta diffusa e il contrasto al littering sia in ambito urbano che naturale. In questo scenario si collocano nello specifico la startup *Pixies Urban Lab S.R.L. SB* e la PMI innovativa *Blue Eco Line S.R.L.*

Pixies Urban Lab sviluppa robot autonomi in grado di riconoscere e raccogliere i rifiuti abbandonati, utilizzando algoritmi di deep learning per classificare i materiali e ottimizzare la logistica di intervento (Gruppo Iren, 2022). La soluzione si configura come un ecosistema costituito da una panchina intelligente che funge da hub di ricarica per due Autonomous Mobile Robots (AMR). Tali dispositivi, realizzati interamente in plastica riciclata stampata in 3D, possiedono una capacità di 50 litri e un'autonomia di 12 ore e sono in grado di districarsi in ambienti complessi evitando ostacoli sia statici che dinamici (Santucci, 2021).

*Figura 4.4: Pixies, robot urbano a energia solare per la pulizia delle città*



*Fonte: Santucci (2021)*

Il sistema di Pixies Urban Lab è stato addestrato per riconoscere e raccogliere diversi tipi di materiali, in particolare le bottiglie di plastica, che rappresentano circa il 60% dei rifiuti gettati a terra (Nisi, 2022). Proprio questa focalizzazione sull'intercettazione della plastica crea un collegamento diretto con l'attività di Blue Eco Line, che trasferisce la sfida dal contesto urbano a quello fluviale, con l'obiettivo di prevenire la dispersione in mare e la formazione di microplastiche.

L'azienda ha sviluppato un ecosistema tecnologico sinergico composto da due soluzioni. La prima è River Eye, un sistema di monitoraggio basato su videocamere ad alta risoluzione e reti neurali specificamente addestrate per distinguere la plastica dalla materia organica. Il sistema opera 24 ore su 24, permettendo di quantificare i flussi di rifiuti e identificare i siti strategici per l'intervento. La seconda soluzione è River Cleaner, un impianto automatizzato a emissioni zero posizionato sugli argini, che intercetta e raccoglie fisicamente i rifiuti galleggianti. Nello specifico, il sistema trasporta i rifiuti fino al piano stradale, depositandoli in cassoni standard e rendendo possibile lo smaltimento tramite i mezzi già in dotazione alle aziende di igiene urbana, senza richiedere adeguamenti logistici o costi aggiuntivi per flotte speciali (La Nazione, 2025; Blue Eco line, 2021)

Accanto alle realtà specializzate nel waste management, il macrocluster comprende imprese caratterizzate da un posizionamento tecnologico trasversale, per le quali la gestione dei rifiuti rappresenta uno dei verticali applicativi. È il caso di *GreenX S.R.L.*, *Moltosenso S.R.L.* e *Redigits S.R.L.S.*, che mettono quindi a disposizione competenze avanzate in ambito IoT, intelligenza artificiale, big data e piattaforme digitali, applicandole a diversi settori.

Completano il quadro le imprese per le quali le informazioni disponibili risultano più limitate, focalizzate prevalentemente sull'infrastruttura digitale e gestionale dei servizi di raccolta, come *Eco Waste Management S.R.L.S.* e *Waste Engineering S.R.L.*

La prima propone una piattaforma gestionale integrata che unifica sensori IoT/RFID, dispositivi di bordo e applicazioni software, consentendo la centralizzazione dei dati operativi a fini di pianificazione, controllo e supporto decisionale (Eco Waste Management SRLS, 2025). La seconda si distingue per un orientamento più marcato verso la tariffazione puntuale (TARIP), attraverso sistemi avanzati di raccolta e analisi

dei dati in tempo reale, finalizzati all'ottimizzazione dei processi di raccolta e alla definizione di modelli tariffari basati sul principio "chi inquina paga", a supporto dei Comuni e delle aziende che gestiscono i servizi di igiene urbana (Registro delle Imprese, n.d.).

Informazioni ancor più limitate emergono dalle schede delle realtà più recenti, *WAI S.r.l.* e *A Smart Cup S.r.l. SB*, le cui attività risultano, ad oggi, prevalentemente orientate allo sviluppo di soluzioni future 4.0. In entrambi i casi, le imprese dichiarano comune l'intenzione di introdurre sistemi basati su cassonetti intelligenti e dispositivi interattivi per l'ottimizzazione della raccolta in contesti urbani.

#### **4.5.2 Automazione e intelligenza artificiale nei processi di trattamento**

All'interno della classificazione per fasi del ciclo di gestione dei rifiuti, il cluster relativo al trattamento emerge come il secondo più rilevante dell'intero campione analizzato, sia per numerosità di imprese coinvolte sia per il livello di complessità tecnologica delle soluzioni sviluppate.

In particolare, il campione evidenzia una marcata concentrazione di iniziative focalizzate sulla gestione e trattamento dei RAEE, ambito ampiamente dibattuto e adeguatamente approfondito nei capitoli precedenti della tesi per la complessità dei flussi e l'elevato contenuto di materiali critici e preziosi. In tale scenario si collocano aziende quali *Hiro Robotics S.R.L. SB*, *Neuravision S.R.L.*, *Greenvincible S.R.L.* e *Orbita Technologies S.R.L.*, anche se per quest'ultima sono reperibili informazioni tecniche meno dettagliate.

Hiro Robotics, con sede a Genova, si distingue per l'utilizzo di sistemi automatizzati specifici per il disassemblaggio di rifiuti elettronici complessi, quali monitor, display e pannelli fotovoltaici, integrando cobot dotati di sensori avanzati e di un sistema brevettato di guida tramite computer vision (Gruppo Iren, 2022; Registro delle Imprese, n.d.).

Un prodotto di punta dell'azienda è il modulo "MAIA", unità robotica progettata specificamente per lo svitamento autonomo di componenti elettronici. Grazie a un software di computer vision, il sistema è in grado di identificare la posizione e la tipologia delle viti senza alcuna conoscenza preventiva del dispositivo, gestendo con efficacia

anche apparecchiature ad alta densità di elementi di fissaggio. L'efficienza del processo è assicurata da tempi di ciclo estremamente rapidi, a partire da una vite ogni 4 secondi. Durante l'operazione, il robot gestisce autonomamente il cambio dell'utensile in base alla vite rilevata e combina i dati dei sensori video con quelli di forza per garantire uno svitamento fluido e preciso.

L'impiego di queste soluzioni avanzate permette di agevolare gli operatori nelle loro riducendone il loro impegno alle sole fasi di carico e scarico dei dispositivi e migliorandone sensibilmente l'ergonomia sul posto di lavoro (Hiro Robotics, 2026).

Neuravision si focalizza particolarmente sulla selezione automatizzata delle schede elettroniche (PCB) provenienti dai flussi RAEE. La startup ha progettato il PCB Selecter, un sistema che sfrutta algoritmi di AI per classificare e separare automaticamente i componenti in base al contenuto di metalli preziosi, quali oro, argento e palladio. Il sistema è in grado di processare oltre 3.000 schede all'ora, con una precisione di selezione pari al 97%, operando in modalità completamente automatica (NeuraVision Srl, 2026).

Un approccio di tipo sistemico e modulare è invece quello proposto da Greenvincible attraverso il progetto "RaeCycling". L'azienda ha sviluppato un impianto intelligente e adattivo, concepito per evolversi in funzione delle caratteristiche dei materiali trattati. La soluzione integra macchine già presenti sul mercato, originariamente destinate ad altri settori industriali, opportunamente riconfigurate mediante add-on proprietari e coordinate da un software distribuito che consente di automatizzare, monitorare e tracciare ogni fase del processo (Registro delle Imprese, n.d.). Attraverso l'impiego di micro-separazioni dinamiche, sistemi di visione artificiale e algoritmi predittivi, RaeCycling mira a trasformare il trattamento dei RAEE in una lavorazione di precisione, con l'obiettivo di ridurre drasticamente gli scarti e di restituire materiali ad elevata purezza pronti per la reimmissione nei cicli produttivi (Greenvincible, 2026).

All'interno del cluster di trattamento si colloca anche 9-Tech, impresa specializzata nello sviluppo di tecnologie avanzate per il riciclo dei pannelli fotovoltaici a fine vita, flusso sempre più rilevante e assimilabile ai RAEE complessi. L'azienda propone la tecnologia proprietaria 9PV, protetta da sette brevetti, che integra in modo sinergico tre fasi principali: una fase di riconoscimento e smontaggio supportata da intelligenza artificiale, finalizzata all'identificazione del modulo e alla rimozione automatizzata delle

cornici per migliorare la purezza dell'alluminio; una fase di trattamento termomeccanico ad alta efficienza per la decomposizione dei polimeri senza degradare i materiali di valore; e, infine, un trattamento a ultrasuoni basato su chimica debole, volto all'estrazione selettiva di argento e silicio (Registro Imprese, n.d.).

Infine, si colloca la startup abruzzese Startengy, che progetta e sviluppa un insieme integrato di prodotti e servizi ad alto valore tecnologico che consentono agli impianti di trattamento dei rifiuti di migliorare il recupero di materie prime seconde con elevati livelli di sicurezza tramite l'utilizzo di IoT e intelligenza artificiale. In tale cornice si distinguono, in particolare, due progetti: il progetto SIREFA (Sistema Integrato Rifiuti–Energia–Fertilizzanti–Agricoltura), volto alla valorizzazione industriale di rifiuti e biomasse, e il progetto MES (Manufacturing Execution System), per il recupero dei rifiuti nell'ambito dell'economia circolare, interfacciato con i principali software di gestione aziendale e amministrativa, nonché lo sviluppo di macchine dotate di intelligenza artificiale per il recupero di sostanze dai materiali di scarto (Registro Imprese, n.d.; Startengy S.r.l., 2021).

#### **4.5.3 Soluzioni tecnologiche per la gestione dello spreco alimentare**

Questo paragrafo approfondisce le risposte operative offerte da alcune imprese innovative italiane, come *ReLearn S.R.L.* e *Recuperiamo S.R.L. SB*, per quanto concerne la gestione degli sprechi alimentari, tema anch'esso ampiamente dibattuto nei capitoli precedenti.

La tecnologia NANDO offerta da ReLearn, già analizzata nel cluster sulla raccolta e logistica 4.0, ha trovato applicazione nel settore della ristorazione collettiva attraverso una partnership strategica con Dussmann. Attraverso l'utilizzo di telecamere dotate di Computer Vision e Machine Learning, il sistema scansiona i piatti a fine pasto, identificando gli avanzi e classificandoli in 21 categorie alimentari specifiche con relativa stima del peso. Questo approccio trasforma la cucina in un ambiente data-driven, in cui le informazioni raccolte permettono ai gestori di analizzare cosa viene sistematicamente avanzato, ottimizzando di conseguenza i menù e ricalibrando gli approvvigionamenti delle materie prime. L'efficacia del modello è confermata dai risultati del progetto pilota, nel quale l'analisi predittiva ha permesso di abbattere lo spreco alimentare dovuto alla sovrapproduzione, facendolo scendere dal 20% a un range del 6–8% (Gatti, 2025).

Complementare a questo approccio è la soluzione sviluppata da Recuperiamo con la piattaforma blockchain Regusto, che interviene sulla gestione logistica e amministrativa delle eccedenze già generate, creando valore dalla riduzione degli sprechi di prodotti food e non-food. Attraverso questa piattaforma è possibile connettere in tempo reale le aziende della filiera agroalimentare con una rete di enti non-profit, garantendo la tracciabilità immutabile di ogni donazione. Elemento distintivo del modello è l'utilizzo degli Impact Token per misurare e certificare l'impatto positivo generato, fornendo alle imprese metriche chiave per la reportistica ESG (Recuperiamo Srl Società Benefit, 2024). La rilevanza di questa infrastruttura tecnologica è confermata dai volumi gestiti: la piattaforma gestisce le donazioni di circa 650 aziende destinate a oltre 1.300 enti non profit attivi nella redistribuzione alle famiglie fragili. Solo in ambito food, Regusto ha gestito sino ad oggi 13.000 tonnellate di alimenti a rischio spreco, corrispondenti a 26 milioni di pasti equivalenti e a un risparmio ambientale di 35.000 tonnellate di CO2 evitata. L'analisi dei flussi permette inoltre di mappare le tipologie di prodotto maggiormente recuperate, dimostrando la capacità della piattaforma di gestire anche la complessità della catena del freddo. I prodotti freschi come frutta e verdura rappresentano infatti il 23% del totale recuperato, seguiti dai prodotti a lunga conservazione (19%) e da latticini e carne (17%) (Madeddu, 2024).

#### **4.5.4 Smart Landfill**

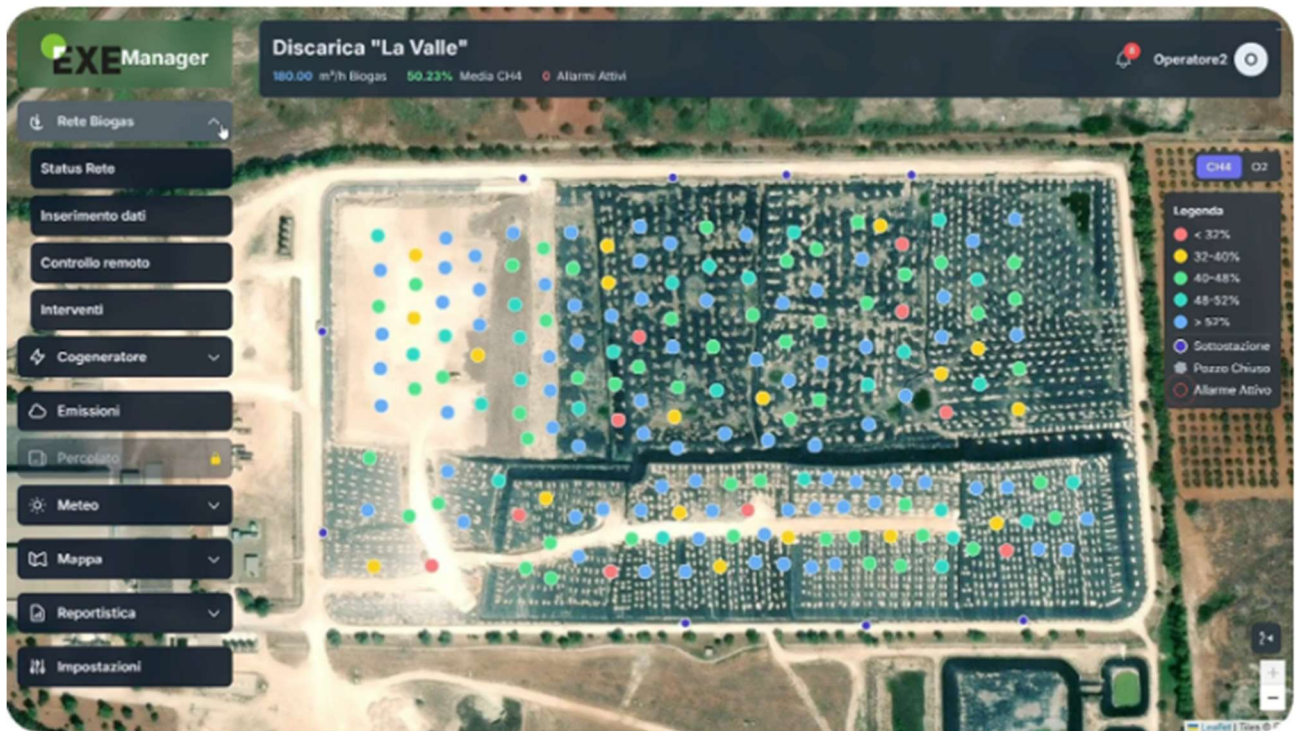
Il quinto e ultimo cluster riguarda il segmento finale della filiera del Waste Management, lo smaltimento in discarica, con un'unica impresa effettivamente attiva con soluzioni avanzate, la *Exe – Engineering for Environment S.R.L.*

L'azienda si distingue per la progettazione e vendita di impianti automatizzati di captazione del biogas, utilizzabile per la produzione di energia rinnovabile, con soluzioni proprietarie plug-and-play dotate di cloud e intelligenza artificiale (Registro delle Imprese, n.d.).

Il vertice tecnologico dell'offerta è rappresentato dalla EXE Station, un sistema di automazione completa che trasforma ogni pozzo di captazione in un nodo attivo. Grazie ad algoritmi proprietari che regolano le valvole 24/7 in base alle fluttuazioni barometriche e biologiche, la stazione può garantire un incremento della produzione di biogas tra il 30% e il 70%. L'intero ecosistema è coordinato da EXE Manager, una piattaforma Cloud

che opera come un Digital Twin geospaziale, permettendo di visualizzare lo stato di salute dell'impianto in tempo reale e fornendo funzioni di telecontrollo bidirezionale e analisi predittive (EXE – Engineering for Environment, n.d.).

*Figura 5.4: Interfaccia di Exe Manager*



*Fonte: EXE – Engineering for Environment(n.d.)*

L'efficacia di tali tecnologie trova riscontro in alcuni casi studio riportati dall'azienda stessa: nella discarica di Alfsnes (Islanda), la risoluzione automatizzata di un malfunzionamento ha generato un incremento del 50% del biogas catturabile, pari a 1.000.000 Nm<sup>3</sup> di biometano annuo aggiuntivo, riducendo le emissioni di ben 13.700 tonnellate di CO<sub>2</sub> equivalenti (EXE – Engineering for Environment, n.d.). Risultati analoghi sono stati ottenuti sul territorio nazionale, nella discarica di Rosignano Marittima (LI), con un aumento della raccolta di biogas tra il 30% e il 60% e livelli di ossigeno mantenuti costantemente al di sotto del 2% (EXE – Engineering for Environment, n.d.).

#### **4.6 Analisi economico-patrimoniale**

L'analisi dei dati economico-patrimoniali consente di fornire un'evidenza empirica della struttura, delle performance e della sostenibilità dell'ecosistema di startup e PMI innovative 4.0 analizzato. L'analisi delle informazioni desunte dal Registro delle Imprese, in particolare delle classi di capitale sociale e delle classi di valore della produzione, consente di delineare una prima fotografia della dimensione economica delle imprese analizzate.

Per quanto riguarda il capitale sociale, le startup sono caratterizzate da una dotazione molto contenuta che, nella quasi totalità dei casi, non supera i 50.000 euro. Nello specifico, la maggioranza del campione (14 imprese su 19) si colloca nelle fasce inferiori ai 10.000 euro, mentre quattro startup rientrano nella fascia standard 10.000–50.000 euro. Un'unica eccezione significativa è rappresentata da Pixies Urban Lab, che presenta un capitale sociale compreso tra 250.000 e 500.000 euro. A tali livelli di capitalizzazione si associano, per la maggior parte delle startup, valori della produzione ancora contenuti, generalmente inferiori ai 100.000 euro annui, configurazione coerente con una fase di sviluppo iniziale. Alcune startup mostrano tuttavia una maggiore capacità di generare valore, evidenziando un disallineamento positivo tra capitale sociale e valore della produzione: è il caso di ReLearn, che a fronte di un capitale contenuto, registra una produzione compresa tra 500.000 e 1 milione di euro, o di Ganiga Innovation, collocata nella fascia 100.000–500.000 euro.

Una struttura dimensionale mediamente più solida emerge nel gruppo delle PMI innovative, caratterizzato da una maggiore eterogeneità rispetto alle startup, ma anche da livelli di capitalizzazione e produzione complessivamente più elevati. Dal punto di vista del capitale sociale, una quota significativa del campione (tre imprese su otto) si colloca nella fascia 250.000–500.000 euro, segnalando una base patrimoniale già strutturata, mentre le restanti imprese presentano capitali più contenuti ma comunque compatibili con una fase di sviluppo operativa.

Tale configurazione trova riscontro nelle classi di valore della produzione, che risultano prevalentemente concentrate nelle fasce intermedie: la maggioranza delle PMI innovative registra infatti una produzione compresa tra 100.000 e 500.000 euro annui.

In questo quadro si distingue Hiro Robotics, che si colloca nella fascia di produzione 1–2 milioni di euro, rappresentando il caso di maggiore maturità commerciale del campione.

Successivamente, l'analisi è stata approfondita attraverso i dati di bilancio estratti dalla banca dati AIDA, consentendo di passare da una lettura statica a una dinamica delle performance economiche nel corso del tempo, con un focus specifico su:

- Ricavi di vendita
- EBITDA
- Utili/ perdite
- Attivo
- Patrimonio Netto
- Rapporto Debt/Equity

I ricavi di vendita nel corso degli ultimi anni confermano una generale crescita, in particolare tra le PMI innovative. Recuperiamo, ad esempio, ha registrato un incremento dei ricavi da valori inferiori ai 10.000 euro nel 2019 a oltre 531.000 euro nel 2024, mentre Hiro Robotics è passata da circa 94.000 euro nel 2020 a oltre 756.000 euro nel 2024, confermando un graduale consolidamento nel mercato dei RAEE. Anche tra le startup emergono segnali di accelerazione, come nei casi di Ganiga Innovation, dove è stata registrata una crescita progressiva dei ricavi, da valori nulli nel 2021 a oltre 72.000 euro nel 2024, e soprattutto di ReLearn, che è passata da circa 16.000 euro nel 2021 a oltre 530.000 euro nel 2024.

L'analisi congiunta dell'EBITDA e dell'Utile Netto mostra come, nonostante una tendenza positiva generalizzata dei ricavi di vendita, una parte rilevante del campione presenti risultati economici negativi. Ad esempio, Ganiga Innovation è passata da una situazione prossima al pareggio nel 2021 a una perdita netta superiore a 176.000 euro nel 2024. In modo analogo, ReLearn, pur a fronte di ricavi in forte espansione, come constatato in precedenza, ha chiuso l'ultimo esercizio con una perdita di oltre 105.000 euro. Anche tra le PMI più strutturate si osservano dinamiche analoghe: Hiro Robotics, dopo anni di risultati positivi, ha registrato nel 2024 una perdita di circa 103.000 euro. Tali evidenze non devono essere interpretate come segnali di squilibrio strutturale, bensì

come il riflesso di scelte strategiche orientate alla crescita e allo sviluppo tecnologico, a scapito della redditività di breve periodo.

A supporto di questa interpretazione, l'analisi delle spese in R&S fornisce una chiave di lettura rilevante per comprendere le dinamiche economico-finanziarie osservate. Numerose imprese del campione sostengono infatti investimenti in R&S di entità significativa, spesso superiori alle soglie minime previste dalla normativa per il mantenimento dello status di startup o PMI innovativa.

Tra le startup, Pixies Urban Lab ha destinato nel 2024 oltre 221.000 euro allo sviluppo tecnologico, con un'incidenza superiore a quella del valore della produzione, a testimonianza di una fase ancora fortemente orientata alla prototipazione e al perfezionamento del prodotto. ReLearn ha investito oltre 220.000 euro in attività di ricerca applicata e sviluppo, pari a circa il 25% del valore della produzione (a fronte di un minimo normativo del 15%, come citato in precedenza). Anche *Ganiga Innovation* presenta livelli elevati di spesa in R&S, con un'incidenza superiore al 40% del valore della produzione negli ultimi esercizi.

Pe quanto riguarda le PMI innovative, la mole di informazioni disponibili risulta minore rispetto alle startup. I dati che emergono sono quelli relativi a Moltosenso S.R.L., che destina in modo ricorrente una quota molto elevata del valore della produzione alla ricerca, con percentuali superiori al 50% in più esercizi.

Dal punto di vista patrimoniale, la struttura delle aziende incluse nel campione è solitamente caratterizzata da un capitale proprio e da un attivo in crescita nel tempo, indicativi dell'accumulo di asset tecnologici e immateriali. Tra le PMI innovative spicca la crescita di Hiro Robotics , che è passata da un attivo di circa 11.000 euro nel 2018 a oltre 2 milioni di euro nel 2024. Un trend analogo si riscontra anche tra le startup, in particolare in ReLearn , che ha superato 1,5 milioni di euro di attivo nel 2024, seguita da Startengy con circa 900.000 euro e Pixies Urban Lab con oltre 800.000 euro.

L'analisi del patrimonio netto conferma il ruolo centrale del capitale proprio nel finanziamento della crescita. Tra le PMI innovative, I4E S.R.L. mostra un patrimonio netto costantemente superiore ai 300.000 euro lungo l'intero periodo di osservazione, mentre 9-Tech evidenzia un rafforzamento significativo, passando da valori inizialmente

contenuti a oltre 470.000 euro nel 2024. Anche Recuperiamo presenta una dinamica di patrimonializzazione positiva negli ultimi esercizi, dopo una fase intermedia di assorbimento di capitale legata presumibilmente agli investimenti.

Dinamiche analoghe, seppur più eterogenee, si riscontrano tra le startup innovative. Alcune imprese, citate precedentemente, mostrano un rapido rafforzamento patrimoniale coerente con la crescita dell'attivo: ReLearn ha raggiunto un patrimonio netto prossimo al milione di euro nel 2024; Startengy supera i 490.000 euro; Pixies Urban Lab ha più che quadruplicato il valore rispetto ai primi tre anni di vita. Altre startup presentano invece valori di patrimonio netto più contenuti o in flessione, riflettendo una fase di sviluppo ancora iniziale e una maggiore esposizione agli effetti delle perdite operative.

A completamento dell'analisi, l'esame del rapporto debt/equity fornisce indicazioni sulla solidità finanziaria delle imprese. Nonostante la disponibilità dei dati sia disomogenea per le startup, emerge un quadro in cui la crescita iniziale è prevalentemente finanziata tramite capitale di rischio piuttosto che debito bancario, come nei casi di Neuravision e Iotilize.me, che presentano livelli di indebitamento prossimi allo zero. Più chiaro appare il quadro per le PMI innovative: 9-Tech e MKM Cube mostrano strutture finanziarie equilibrate, mentre Hiro Robotics ha progressivamente ridotto la propria esposizione, raggiungendo un rapporto Debt/Equity pari a 1,1 nell'ultimo esercizio, segnale di un rafforzamento patrimoniale che contribuisce alla resilienza complessiva dell'ecosistema.

#### **4.7 L'ecosistema di supporto: mappatura di investitori, acceleratori e open innovation**

L'analisi delle modalità di finanziamento e sviluppo delle imprese del campione consente di completare la lettura economico-patrimoniale proposta nel precedente paragrafo, offrendo elementi interpretativi utili a comprendere le traiettorie di crescita osservate. In particolare, la presenza di investitori istituzionali, incubatori certificati, acceleratori e programmi di corporate venture capital rappresenta un fattore rilevante nel sostenere le fasi iniziali di sviluppo e di validazione industriale delle soluzioni tecnologiche.

L'indagine è stata condotta, oltre che sulla base delle informazioni disponibili nel Registro delle Imprese, anche attraverso fonti pubbliche quali comunicati stampa, articoli di settore e siti istituzionali, per ricostruire in maniera esaustiva l'ecosistema di supporto in cui operano le imprese oggetto di indagine.

Con riferimento alle PMI innovative, soltanto in 3 casi su 8 è stato possibile individuare una tipologia specifica di finanziamento, senza tuttavia esplicitare l'identità degli investitori. Nello specifico, Blue Eco Line risulta associata a investimenti di tipo angel, EXE – Engineering for Environment a investimenti seed, e Recuperiamo sia ad investimenti angel che di equity crowdfunding.

Il quadro appare più articolato in riferimento alle startup innovative, nonostante vi sia anche in questo caso una quota significativa di dati non disponibili. Tra le imprese che dichiarano informazioni sulle modalità di finanziamento, la tipologia maggiormente ricorrente è quella seed, rilevata in ben cinque casi. Si riscontrano poi forme di venture capital, come nel caso di Pixies Urban Lab, di private equity per Startengy, di finanziamenti di tipo grant come per Iotilize.me e il ricorso all' equity crowdfunding per Repod. Merita una menzione particolare Ganiga Innovation che, oltre ad aver beneficiato di un finanziamento seed, ha ottenuto il supporto di due investitori angel.

Approfondendo l'indagine attraverso fonti esterne, ReLearn e Pixies Urban Lab emergono come i casi di maggiore successo nell'attrazione di capitali istituzionali strutturati. Entrambe le startup sono state selezionate per il programma ZERO – Acceleratore CleanTech promosso da CDP Venture Capital, LVenture Group ed Eni. Nello specifico, ReLearn, ha chiuso, a fine 2023, un round di investimento seed da 1 milione di euro, con il coinvolgimento, tra gli altri, di Club degli Investitori e Bocconi 4 Innovation, mentre Pixies ha concluso, a inizio 2022, un aumento di capitale di 180 mila euro con Key Capital, oltre ai già citati CDP Venture Capital e LVenture Group (LVenture Group, 2023; Nisi, 2022).

Il percorso di crescita di queste due realtà trova un'ulteriore conferma nella validazione industriale da parte di IREN, una delle principali multiutility nazionali. Sia Pixies che ReLearn sono infatti entrate a far parte di Iren UP, il programma di Corporate Venture Capital del Gruppo Iren.

Il programma prevede un modello di open innovation volto a facilitare l'interazione tra grandi operatori industriali e startup tecnologiche cleantech, favorendo processi di sperimentazione e validazione in diversi ambiti applicativi. Tra questi rientrano le reti per i servizi di pubblica utilità, la mobilità e soprattutto la gestione dei rifiuti, settore di specifico interesse della tesi (Gruppo Iren,2024)

Dal punto di vista operativo, il programma si distingue per un approccio agli investimenti molto flessibile. Iren interviene infatti con ticket che variano dai 100.000 euro ai 2 milioni di euro, modulando il supporto in base alla fase di vita dell'impresa, sia essa in fase Seed o Growth.<sup>3</sup> Un elemento di rilievo è la natura dell'investimento: non avendo una struttura a termine come i fondi tradizionali, Iren UP non impone vincoli temporali rigidi per l'exit, permettendo di accompagnare la crescita della startup con una visione industriale di lungo periodo (Gruppo Iren,n.d.)

L'ecosistema si è inoltre rafforzato dal 2022 grazie alla collaborazione con il Polo Tech4Planet, promosso da CDP Venture Capital e dai Politecnici, potenziando la capacità di intercettare l'innovazione già in fase pre-seed.

Oltre a Pixies Urban Lab e ReLearn, diverse altre realtà del campione evidenziano percorsi di incubazione e accelerazione rilevanti.

Iotilize.me, ad esempio, ha mosso i primi passi all'interno dell'incubatore Dock3 – The Startup Lab, per essere successivamente accelerata da NextSTEP SB S.r.l. (iotilize.me, n.d.). Un percorso di maturazione all'interno di ecosistemi digitali caratterizza anche Etrash, nata in H-Farm, che ha saputo sviluppare collaborazioni industriali strategiche con Daint ed Eurven, chiudendo nel 2025 un round pre-seed con Ecovera Holding (Redazione News, 2025).

Vi è poi Entopan Innovation S.r.l., incubatore sia della stessa Etrash che di Orbita Technologies. Va infine constatato che anche Pixies Urban Lab, oltre al finanziamento di tipo venture sopracitato, ha consolidato le proprie basi tecnologiche presso l'incubatore del politecnico di Torino (I3P).

---

<sup>3</sup> La fase seed fa riferimento a start-up o spin-off universitari che abbiano sviluppato un prodotto in forma prototipale o depositato un brevetto mentre la fase growth riguarda le imprese che hanno già effettuato un round di investimento seed o con un volume d'affari pari ad almeno 1 milione di euro (Iren S.p.a.,n.d.).

## CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi ha analizzato l'integrazione del paradigma dell'Industria 4.0 all'interno della filiera della gestione dei rifiuti, combinando una revisione sistematica della letteratura scientifica internazionale con un'indagine empirica sul panorama imprenditoriale italiano. L'analisi congiunta dei risultati consente di delineare un quadro articolato, nel quale il potenziale trasformativo della digitalizzazione avanzata coesiste con un livello di diffusione ancora disomogeneo e in fase di consolidamento.

Con riferimento al primo obiettivo di ricerca, emerge un disallineamento significativo tra l'ampiezza della produzione scientifica e l'effettiva implementazione su larga scala delle soluzioni 4.0. La letteratura evidenzia un crescente interesse verso l'applicazione di tecnologie digitali avanzate, in particolare nelle fasi di raccolta e trattamento dei rifiuti (con attenzione specifica ai RAEE) e nella gestione dello spreco alimentare, ambito particolarmente rilevante alla luce dei principali report internazionali, come quelli dell'UNEP e del World Bank, che ne sottolineano l'urgenza a livello globale. Diversi studi documentano benefici quantificabili in termini di efficienza operativa, ottimizzazione logistica, miglioramento della qualità della selezione e supporto agli obiettivi di sostenibilità ambientale. Tra gli esempi più significativi rientrano l'implementazione IoT documentata da Mastos et al. (2021) in Grecia, i sistemi di intelligenza artificiale descritti da Oliveira Neto et al. (2025) nella città di São Paulo, le piattaforme blockchain per l'incentivazione al riciclo analizzate da Gong et al. (2022), nonché i sistemi robotici ad alta produttività, come Apple Daisy e Zen Robotics. Tuttavia, le esperienze emerse dalla letteratura risultano nella maggior parte dei casi circoscritte a progetti pilota o a contesti sperimentali. I casi di implementazione sistemica su larga scala rappresentano ancora una minoranza. Ne emerge quindi l'immagine di un settore in fase di transizione: le tecnologie risultano tecnicamente disponibili e potenzialmente efficaci, ma il loro consolidamento operativo richiede condizioni organizzative, economiche e istituzionali non ancora pienamente mature.

Tale interpretazione trova riscontro anche nell'analisi del panorama italiano, dove si osservano iniziative tecnologicamente avanzate e casi di eccellenza, come ReLearn, che dimostrano la concreta applicabilità delle soluzioni 4.0 in contesti reali. Tuttavia, le imprese innovative attive nel Waste Management 4.0 risultano numericamente contenute

rispetto al totale delle realtà che operano nel settore (27 startup e PMI innovative su 79 imprese censite nel campione complessivo). Inoltre, molte delle realtà analizzate si collocano ancora in fasi iniziali di sviluppo o di validazione del modello di business, caratterizzate da investimenti significativi in ricerca e sviluppo e da ritorni economici non sempre immediati.

Le cause di questa diffusione graduale possono essere ricondotte a diverse tipologie di barriere. Sul piano tecnico, emergono criticità legate alla scalabilità e all'integrazione con infrastrutture esistenti; sul piano economico, l'entità degli investimenti e l'incertezza sui ritorni. Dal punto di vista organizzativo, l'integrazione di tecnologie digitali avanzate richiede competenze specialistiche, capacità di gestione del cambiamento e una profonda revisione dei processi interni. In questo senso, gli incumbent del settore devono sviluppare una adeguata *absorptive capacity* (Cohen & Levinthal, 1990) per essere in grado di assimilare e sfruttare conoscenze in ambiti tecnologici distanti dal core tradizionale. Senza tale capacità di assorbimento, fondata sulla conoscenza pregressa e sull'investimento in competenze digitali, le imprese consolidate rischiano un progressivo isolamento tecnologico rimanendo ancorate a modelli operativi obsoleti nonostante la disponibilità di soluzioni 4.0 potenzialmente dirompenti.

Parallelamente, lo studio ha evidenziato dinamiche potenzialmente virtuose riconducibili al paradigma dell'Open Innovation di Chesbrough (2003). Le esperienze di programmi di Open Innovation e Corporate Venture Capital, come quelle di IrenUp e LVenture Group analizzate nel contesto italiano, evidenziano il potenziale di modelli collaborativi capaci di ridurre il rischio intrinseco dell'innovazione e accelerarne la sperimentazione applicativa attraverso l'integrazione di competenze esterne. Questa prospettiva si inserisce coerentemente nella logica della Tripla Elica (Etzkowitz & Leydesdorff, 2000), sottolineando come la digitalizzazione avanzata del Waste Management richieda un coordinamento strategico tra attori pubblici, università e industrie per la creazione di organizzazioni ibride e reti trilaterali. In un settore complesso e regolamentato come quello della gestione dei rifiuti, il coordinamento tra queste tre dimensioni risulta essenziale per favorire il trasferimento tecnologico, sostenere la fase di scaling delle soluzioni e allineare la creazione di valore ambientale con la sostenibilità economica dei modelli di business. In tal senso, strumenti di politica industriale e

investimenti pubblici, come quelli previsti dal PNRR, possono svolgere un ruolo importante nel passaggio dalla sperimentazione alla diffusione su scala più ampia.

Il contributo della presente ricerca si articola quindi su tre livelli. Sul piano accademico, essa fornisce una mappatura sistematica dello stato dell'arte delle tecnologie 4.0 nel waste management, integrando l'analisi della letteratura con un'esplorazione empirica del contesto italiano e mettendo in luce il disallineamento tra produzione scientifica e realtà operativa. Sul piano manageriale, il lavoro evidenzia la necessità di strategie orientate alla gestione del cambiamento, allo sviluppo di competenze digitali e all'adozione di modelli collaborativi capaci di favorire l'integrazione tecnologica. Sul piano delle policy, emergono indicazioni relative all'importanza di standard tecnologici chiari, incentivi alla formazione e strumenti di supporto alla cooperazione tra ricerca e industria.

Future ricerche potrebbero approfondire in chiave comparativa le dinamiche di adozione in differenti contesti nazionali, al fine di comprendere come variabili istituzionali e infrastrutturali influenzino i tempi e le modalità di integrazione delle tecnologie 4.0. Un ulteriore sviluppo potrebbe consistere nell'estensione dell'analisi a un campione più ampio di operatori effettivi del settore, includendo non solo startup e PMI innovative, ma anche grandi incumbent, attraverso survey strutturate e analisi statistiche mirate. L'integrazione di interviste qualitative a manager, decisori pubblici e fondatori di imprese tecnologiche consentirebbe inoltre di indagare più in profondità le motivazioni alla base dell'adozione o della resistenza all'innovazione, verificando empiricamente il ruolo di fattori quali percezione dei benefici, compatibilità con le strutture esistenti e complessità percepita, in linea con la teoria della diffusione dell'innovazione.

In conclusione, il Waste Management 4.0 non rappresenta un esito già compiuto, bensì un processo di trasformazione in atto. La sfida principale riguarda la capacità degli attori coinvolti di coordinare innovazione digitale, modelli organizzativi e governance pubblica in una prospettiva coerente con gli obiettivi di sostenibilità. Il percorso risulta avviato, ma la sua piena maturazione dipenderà dalla progressiva convergenza tra sviluppo tecnologico, apprendimento organizzativo ed evoluzione delle politiche di supporto.

## BIBLIOGRAFIA

- Ali G., Asiku D., Mijwil M. M., Adamopoulos I., Dudek M., 2025, “Fusion of Blockchain, IoT, Artificial Intelligence, and Robotics for Efficient Waste Management in Smart Cities”, *International Journal of Innovative Technology and Interdisciplinary Sciences*, 8(3), 388–495.
- Almelhem M., Buics L., Süle E., Simoes R., 2025, “Industry 4.0 for sustainable reverse waste collection: A systematic literature review”, *Journal of Transport and Supply Chain Management*, 19(0), a1179.
- Anagnostopoulos T., Kolomvatsos K., Anagnostopoulos C., Zaslavsky A., Hadjiefthymiades S., 2015, “Assessing dynamic models for high priority waste collection in smart cities”, *The Journal of Systems and Software*, 110, 178–192.
- Asif M. E., Rastegarpanah A., Stolkin R., 2024, “Robotic disassembly of end-of-life products with a focus on task and motion planning”, *Journal of Manufacturing Systems*, 77, 483–524.
- Aterini L. (2018). Rifiuti, la raccolta differenziata porta a porta costa oltre il doppio rispetto a quella stradale. Green Report. <https://www.greenreport.it/news/green-economy/26136-rifiuti-la-raccolta-differenziata-porta-a-porta-costa-oltre-il-doppio-rispetto-a-quella-stradale> (Consultato il 03/09/2025)
- Atienza V., Sison E., Cardenas L., 2012, “Review of the Philippines' waste segregation and collection system and the trading of recyclables”, Joint Research Program Series 158. Institute of Developing Economies, Japan External Trade Organization.
- Atofarati E. O., Adogbeji V. O., Enweremadu, C. C., 2025, “Sustainable smart waste management solutions for rapidly urbanizing African cities: A systematic literature review”, *Utilities Policy*, 95, 101961.
- Aytaç K., Korçak O., 2021, “IoT based intelligence for proactive waste management in Quick Service Restaurants”, *Journal of Cleaner Production*, 284, 125401.
- Bagheri M., Bazvand A., Ehteshami M., 2017, “Application of artificial intelligence for the management of landfill leachate penetration into groundwater, and assessment of its environmental impacts” , *Journal of Cleaner Production*, 149, 784–796.
- Bamakan S. M. H., Malekinejad P., Ziaeeian M., 2022, “Towards blockchain-based hospital waste management systems; applications and future trends”, *Journal of Cleaner Production*, 349, 131440.
- Baralla G., Pinna A., Tonelli R., Marchesi M., 2023, “Waste management: A comprehensive state of the art about the rise of blockchain technology”, *Computers in Industry*, 145, 103812.
- Berg, H., Sebestyén, J., Bendix, P., Le Blevenec, K., & Vrancken, K., 2020, “Digital waste management (Eionet Report – ETC/WMGE 2020/4)”, European Topic Centre on Waste and Materials in a Green Economy.

- Blue Eco Line S.r.l. (2021). River Cleaner. Risorsa web reperibile all'indirizzo: <https://blueecoline.com/river-cleaner-impianto-ecosostenibile-per-ripulire-i-fiumi/> (Consultato il 10/01/2026)
- Blue Eco Line S.r.l. (2021). River Eye. Risorsa web reperibile all'indirizzo: <https://blueecoline.com/river-eye-sistema-monitoraggio-rifiuti-fluviali/> (Consultato il 10/01/2026)
- Bourguignon D. (2018), "Circular economy package: Four legislative proposals on waste", European Parliamentary Research Service (EPRS).
- Bureau van Dijk. (n.d.). AIDA: Analisi Informatizzata delle Aziende Italiane. Risorsa web reperibile all'indirizzo: <https://aida-r1.bvdinfo.com/version-20230825-15-0/home.serv?product=AidaNeo&> (Consultato il 15/01/2026)
- Cao C., Liu J., Liu Y., Wang H., Liu M., 2023, "Digital twin-driven multi-period COVID-19 medical waste clearance scheme under the circular economy: Location-transport integrated optimization", *Computers & Industrial Engineering*, 186, 109107.
- Castiglione A., Cimmino L., Di Nardo M., Murino T., 2023, "A framework for achieving a circular economy using blockchain technology in a sustainable waste management system", *Computers & Industrial Engineering*, 180, Article 109263.
- Chen C.-Y., Yu T.-T., 2023, "Towards a circular economy: Recapturing battery, metal, and plastic from soil-size and gravel-size municipal solid waste incineration bottom ash using convolutional neural networks", *Journal of Cleaner Production*, 432, 139737.
- Chesbrough H., 2003, "Open Innovation: The New Imperative for Creating and Profiting, from Technology", Harvard Business School Press, Boston.
- Ciccullo F., Fabbri M., Abdelkafi N., Pero M., 2022, "Exploring the potential of business models for sustainability and big data for food waste reduction", *Journal of Cleaner Production*, 340, 130673.
- Cohen W. M., & Levinthal, D. A., 1990, "Absorptive capacity: A new perspective on learning and innovation", *Administrative Science Quarterly*, 35(1), 128–152
- Decreto-Legge 18 ottobre 2012, n. 179. Ulteriori misure urgenti per la crescita del Paese (convertito con modificazioni dalla Legge 17 dicembre 2012, n. 221). *Gazzetta Ufficiale* n. 245 del 19 ottobre 2012
- Eco Waste Management SRLS. (2025). EWM – Eco Waste Management | Redefining Waste Management. Risorsa web reperibile all'indirizzo: <https://ecowastemanagement.it/> (Consultato il 12/01/2026).
- Etzkowitz H., Leydesdorff L., 2000, "The dynamics of innovation: From National Systems and "Mode 2" to a Triple Helix of university–industry–government relations", *Research Policy*, 29(2), 109–123.
- Euro Cities (2021). Solving the problem of waste collection and management through the Green City Accord. Risorsa web reperibile all'indirizzo: <https://eurocities.eu/latest/solving-the-problem-of-waste-collection-and-management-throughout-europe/> (Consultato il 05/09/2025).

- European Commission. (2020). A new Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe (COM (2020) 98 final).
- European Environment Agency. (n.d.). Biological waste treatment. In GEMET – Environmental thesaurus. Recuperato da <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/gemet-environmental-thesaurus/biological-waste-treatment> (Consultato il 03/09/2025)
- European Parliament and Council. (2008). Directive 2008/98/EC on waste and repealing certain Directives (Text with EEA relevance). Official Journal of the European Union, L 312, 3-30.
- European Parliament and Council. (2018). Directive (EU) 2018/851 amending Directive 2008/98/EC on waste (Text with EEA relevance). Official Journal of the European Union, L 150, 109-140.
- EXE – Engineering for Environment. (n.d.). Impianto automatico per la captazione del biogas. Risorsa web reperibile all'indirizzo: <https://exe-engineering.com/progetti/impianto-automatico-per-la-captazione-del-biogas/> (Consultato il 13/01/2026)
- EXE – Engineering for Environment. (n.d.). Modello di gestione e monitoraggio biogas. Risorsa web reperibile all'indirizzo: <https://exe-engineering.com/progetti/modello-di-gestione-e-monitoraggio-biogas/> (Consultato il 13/01/2026)
- EXE – Engineering for Environment. (n.d.). Tecnologia. Risorsa web reperibile all'indirizzo: <https://exe-engineering.com/prodotti-tecnologia-servizi/> (Consultato il 13/01/2026)
- Fatimah Y. A., Govindan K., Murniningsih R., Setiawan A., 2020, “Industry 4.0 based sustainable circular economy approach for smart waste management system to achieve sustainable development goals: A case study of Indonesia, Journal of Cleaner Production, 269, 122263.
- Fawole A.A., Orikpete O.F., Ehiobu N.N., Ewim D.R.E., 2023, “Climate change implications of electronic waste: strategies for sustainable management”, Bulletin of the National Research Centre, 47:147.
- Feng Z., Luo N., Shalpegin T., Cui, H., 2024, “The influence of carbon emission reduction instruments on blockchain technology adoption in recycling batteries of the new energy vehicles”, International Journal of Production Research, 62(3), 891–908.
- Ferrari F., Striani R., Minosi S., De Fazio R., Visconti P., Patrono L., Catarinucci L., Esposito Corcione C., Greco A., 2020 , “An innovative IoT-oriented prototype platform for the management and valorisation of the organic fraction of municipal solid waste”, Journal of Cleaner Production, 247, 119618.
- Ferronato N., Torretta V., 2019, “Waste mismanagement in developing countries: A review of global issues”, International Journal of Environmental Research and Public Health, 16(6), 1060.
- Forti V., Baldé C.P., Kuehr R., Bel G., 2020, “The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential”. United Nations University

(UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Ginevra/Rotterdam

- França A. S. L., Amato Neto J., Gonçalves R. F., Almeida C. M. V. B., 2020, “Proposing the use of blockchain to improve the solid waste management in small municipalities”, *Journal of Cleaner Production*, 244, 118529.
- Gao P., Zhou Y., Sun L., Alahmari S., Innab N., Venkatachalam K., Ferrara M., 2025, “Industrial solid waste recycling using digital servitisation for decarbonisation to promote Net zero in the circular economy”, *Computers & Industrial Engineering*, 206,
- Gatti A. (2024). NANDO Impact: FPT Industrial Case Study. NANDO.AI. Risorsa web reperibile all’indirizzo: <https://nandoai.com/nando-impact-fpt-industrial-case-study/> (Consultato il 09/01/2026)
- Gatti A. (2025). How NANDO is Tackling Food Waste with Dussmann. NANDO.AI. Risorsa web reperibile all’indirizzo: <https://nandoai.com/how-nando-canteen-is-tackling-food-waste-with-dussmann/> (Consultato l’11/01/2026)
- Gatti A. (2025). Shaping the Future with Circular Economy at Sisal with NANDO. NANDO.AI. Risorsa web reperibile all’indirizzo: <https://nandoai.com/shaping-the-future-with-circular-economy-at-sisal-with-nando/> (Consultato il 09/01/2026)
- Gong Y., Xie S., Arunachalam D., Dua J., Luo J., 2022, “Blockchain-based recycling and its impact on recycling performance: A network theory perspective”, *Business Strategy and the Environment*, 31(8), 3717–3741.
- Governo italiano. (2021, 30 novembre). PNRR: rivoluzione verde e transizione ecologica. Risorsa web reperibile all’indirizzo: <https://www.governo.it/it/approfondimento/rivoluzione-verde-e-transizione-ecologica/16703> (Consultato il 07/09/2026)
- Greenvincible.(2026). RaeeCycling. Risorsa web reperibile all’indirizzo: <https://www.greenvincible.it/> (Consultato il 13/01/2026)
- Gruppo Iren (n.d.). Il programma di Corporate Venture Capital. Risorsa web reperibile all’indirizzo: <https://www.gruppoiren.it/it/innovazione-e-ricerca/iren-up.html>(Consultato il 17/01/2026)
- Gruppo Iren. (2022). Robot collaborativi per il trattamento dei rifiuti: l’approccio unico di Hiro Robotics reinventa le tecnologie. Everyday. Risorsa web reperibile all’indirizzo: <https://www.gruppoiren.it/it/everyday/ispirazioni/2022/robot-collaborativi-per-il-trattamento-dei-rifiuti-l-approccio-unico-di-Hiro-Robotics-reinventa-le-tecnologie.html> (Consultato il 13/01/2026)
- Gruppo Iren. (2022). Un robot che pulisce e differenzia: la tecnologia di Pixies a sostegno dell’ambiente. Everyday. Risorsa web reperibile all’indirizzo: <https://www.gruppoiren.it/it/everyday/ispirazioni/2023/robot-pulisce-ambiente-pixies-startup.html> (Consultato il 12/01/2026)

- Gruppo Iren. (2023). Un sensore che rende intelligenti i cestini dei rifiuti: l'innovazione di ReLearn misurare l'impatto della raccolta. EveryDay. Risorsa web reperibile all'indirizzo: <https://www.gruppoiren.it/it/everyday/ispirazioni/2023/cestini-intelligenti-relearn-come-funziona.html> (Consultato il 09/01/2026)
- Gruppo Iren. (2024). I come Iren Up, in cosa consiste e a cosa serve il programma di Corporate Venture Capital del Gruppo Iren. Risorsa web reperibile all'indirizzo: <https://www.gruppoiren.it/it/everyday/abcircular/2024/iren-up-in-cosa-consiste-il-programma-corporate-venture.html> (Consultato il 17/01/2026)
- Gue I. H. V., Lopez N. S. A., Chiu A. S. F., Ubando A. T., Tan R. R., 2022, "Predicting waste management system performance from city and country attributes", Journal of Cleaner Production, 366, 132951.
- Hiro Robotics. (2026). MAIA – Electronics automated unscrewing. Risorsa web reperibile all'indirizzo: <https://www.hirorobotics.com/maia-electronics-automated-unscrewing/> (Consultato il 13/01/2026)
- Huang D., Zhan Y., Lonsdale C., 2025, "Utilising artificial intelligence to enhance firm circular economy maturity: A thematic review via machine learning", Business Strategy and the Environment, 34(5).
- Hübner N., Caspers J., Coroamă V. C., Finkbeiner M., 2024, "Machine-learning-based demand forecasting against food waste: Life cycle environmental impacts and benefits of a bakery case study", Journal of Industrial Ecology, 28(5), 1117–1131.
- IBM (2023). AI vs. Machine Learning vs. Deep Learning vs. Neural Networks: What's the difference? IBM. Disponibile su: <https://www.ibm.com/think/topics/ai-vs-machine-learning-vs-deep-learning-vs-neural-networks> (Consultato il 22/09/2026)
- IJgosse J. (2019). Waste incineration and informal livelihoods: A technical guide on waste-to-energy initiatives (WIEGO Technical Brief No. 11).
- Industrie 4.0 Working Group(2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group. acatech – National Academy of Science and Engineering
- iotilize.me. (n.d.). Autocompactor backfilling monitoring. Risorsa web reperibile all'indirizzo: <https://iotilize.me/caso-autocompattatore/> (Consultato il 11/01/2026)
- iotilize.me. (n.d.). Risorsa web reperibile all'indirizzo: <https://iotilize.me/> (Consultato il 11/01/2026)
- iotilize.me. (n.d.). Solid waste monitoring. Risorsa web reperibile all'indirizzo: <https://iotilize.me/caso-furlotti/> (Consultato il 11/01/2026)
- iotilize.me. (n.d.). Tracking sewage sludge. Risorsa web reperibile all'indirizzo: <https://iotilize.me/caso-daiki/> (Consultato il 11/01/2026)
- Iqbal M. W., 2024, "Waste management of multiple food products through IoT enabled preservation and secondary supply chains", Computers & Industrial Engineering, 197, 110569.

- Iqbal M. W., Kang Y., 2024, “A secondary supply chain model on food waste management incorporating IoT based technology” , *Journal of Cleaner Production*, 435, 140566.
- ISPRA. (2024). *Rapporto rifiuti urbani 2024*. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Roma.
- Italia. (2006, 3 aprile). \*Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152. Norme in materia ambientale\*. *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, n. 88, Supplemento Ordinario n. 96 (14 aprile 2006). Estratto da <https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legislativo:2006-04-03;152!vig=> (Consultato il 30/08/2025)
- Jammeli H., Ksantini R., Ben Abdelaziz F., Masri H., 2021, “Sequential Artificial Intelligence Models to Forecast Urban Solid Waste in the City of Sousse, Tunisia”, *IEEE Transactions on Engineering Management*.
- Jiang P., Zhang L., You S., Fan Y. V., Tan R. R., Klemeš J. J., You F., 2023, “Blockchain technology applications in waste management: Overview, challenges and opportunities” , *Journal of Cleaner Production*, 421, 138466.
- Joshi L. M., Bharti R. K., Singh R., 2021, “Internet of things and machine learning-based approaches in the urban solid waste management: Trends, challenges, and future directions” , *Expert Systems*, 39(5), e12865.
- Kamil I. A., Al-Askari M. A., 2024, “Principles of Fault Tolerance in IT Systems: A Review”, *SSRG International Journal of Computer Science and Engineering*, 11(4), 1–9.
- Kang K. D., Ilankoon I. M. S. K. Krishnan S. G., 2020, “Electronic waste collection systems using Internet of Things (IoT), Household electronic waste management in Malaysia” , *Journal of Cleaner Production*, 252, 119801.
- Kaza S., Yao L., Bhada-Tata P., Van Woerden F., 2018, “What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050”, *World Bank*.
- Kazancoglu Y., Ozbiltekin M., Ozkan Ozen Y. D., Sagnak M., 2021, “A proposed sustainable and digital collection and classification center model to manage e-waste in emerging economies”, *Journal of Enterprise Information Management* 28 January 2021; 34 (1): 267–291.
- Khajuria A., Atienza V. A., Chavanich S., Henning W., Islam I., Kral U., Liu M., Liu X., Murthy I. K., Oyedotun T. D. T., Verma P., Xu G., Zeng X., Li J., 2022, “Accelerating circular economy solutions to achieve the 2030 agenda for sustainable development goals” , *Circular Economy*, 1, 100001.
- Khan S. K., Chuenchart W., Karki R., Surendra K. C., Nguyen D., Alam M., Lee Y., Kang Y., Wang C. H., 2025, “Biochar-augmented anaerobic digestion system: Insights from an interpretable stacking ensemble deep learning model for methane yield optimization and stability prediction”, *Environmental Science & Technology*.
- Kumar A., 2024, “A novel framework for waste management in smart city transformation with industry 4.0 technologies” , *Research in Globalization*, 9, 100234.

- Kumar D. J. P., Mishra R. K., Chinnam S., Binnal P., Dwivedi N., 2024, “A comprehensive study on anaerobic digestion of organic solid waste: A review on configurations, operating parameters, techno-economic analysis and current trends”, *Biotechnology Notes*, 5, 33–49.
- Kurniawan T. A., Maiurova A., Kustikova M., Othman M. H. D., Goh H., Bykovskaia E., 2023, “Strengthening waste recycling industry in Malang (Indonesia) for promoting sustainable urban waste practices: a strategy to accelerate sustainability transition through digitalization-based circular economy”, *Journal of Cleaner Production*, 382, 135296.
- Kurniawan T. A., Othman M. H. D., Hwang G. H., Gikas P., 2022, “Unlocking digital technologies for waste recycling in Industry 4.0 era: A transformation towards a digitalization-based circular economy in Indonesia” , *Journal of Cleaner Production*, 357, 131911.
- La Nazione (2025). L'intelligenza artificiale diventa guardiana dei corsi d'acqua. La Nazione. Risorsa web reperibile all'indirizzo: <https://www.lanazione.it/speciali/sostenibilita/linelligenza-artificiale-diventa-guardiana-dei-corsi-dacqua-18a335d5> (Consultato il 10/01/2026).
- Lasi H., Fettke P., Kemper H.-G., Feld T., Hoffmann M., 2014, “Industry 4.0”, *Business & Information Systems Engineering*, 6(4), 239–242.
- Laurieri N., Lucchese A., Marino A., Digiesi S., 2020, “A door-to-door waste collection system case study: A survey on its sustainability and effectiveness” , *Sustainability*, 12(14), Article 5520
- Lei Z., Cai S., Cui L., Wu L., Liu Y., 2023, “How do different Industry 4.0 technologies support certain circular economy practices?”, *Industrial Management & Data Systems*, 123(4), 1220–1251.
- Lupia V. (2022). Rifiuti in strada? Due ragazzi romani inventano il robottino che se li mangia: "Un mondo più pulito è possibile". *La Repubblica*. Risorsa web reperibile all'indirizzo: [https://roma.repubblica.it/cronaca/2022/02/21/news/rifiuti\\_in\\_strada\\_due\\_ragazzi\\_romani\\_inventano\\_il\\_robotino\\_che\\_se\\_li\\_mangia-338556326/](https://roma.repubblica.it/cronaca/2022/02/21/news/rifiuti_in_strada_due_ragazzi_romani_inventano_il_robotino_che_se_li_mangia-338556326/) (Consultato il 10/01/2026)
- LVenture Group (2023). La startup ReLearn chiude un round di investimento seed da 1 milione di euro. Risorsa web reperibile all'indirizzo: <https://lventuregroup.com/la-startup-relearn-chiude-un-round-di-investimento-seed-da-1-milione-di-euro/> (Consultato il 17/01/2026).
- Madeddu, D. (2024). Regusto, così si salvano dallo spreco 26 milioni di pasti a favore dei più deboli. *Il Sole 24 ore*. Risorsa web reperibile all'indirizzo web: <https://www.ilsole24ore.com/art/regusto-cosi-si-salvano-spreco-26-milioni-pasti-favore-piu-deboli-AGeVV4j> (Consultato l'11/01/2026).
- Maiurova A., Kurniawan T. A., Kustikova M., Bykovskaia E., Othman M. H. D., Goh H. H., 2022, “Promoting digital transformation in waste collection service and waste recycling in a smart city: applying circular economy in Moscow (Russia) to mitigate

- climate change effects on the environment”, *Journal of Cleaner Production*, 354, 131604.
- Manea E. E., Bumbac C., Dinu L. R., Bumbac M., Nicolescu C. M., 2024, “Composting as a sustainable solution for organic solid waste management: Current practices and potential improvements”, *Sustainability*, 16(15), Article 6329.
- Mantovani V. (2022). Due under 30 italiani hanno creato il cestino intelligente. “Ora sogniamo la Dyson italiana”. *Forbes*. Risorsa web reperibile all’indirizzo: <https://forbes.it/2022/09/15/ganiga-innovation-startup-italiana-cestino-intelligente> (Consultato il 13/01/2026)
- Mastos T. D., Nizamis A., Vafeiadis T., Alexopoulos N., Ntinis C., Gkortzis D., Papadopoulou A., Ioannidis D., Tzovaras D., 2020, “Industry 4.0 sustainable supply chains: An application of an IoT enabled scrap metal management solution” , *Journal of Cleaner Production*, 269, 122377.
- Ministero dell’Ambiente e della Sicurezza Energetica. (n.d.). Registro elettronico nazionale per la tracciabilità dei rifiuti. <https://www.rentri.gov.it/it> (Consultato il 07/09/2025)
- Ministero della Transizione Ecologica (Italia). (2021, 28 settembre). Decreto Ministeriale n. 396 del 28 settembre 2021: Misure per il rafforzamento della capacità amministrativa delle pubbliche amministrazioni funzionale all’attuazione del Piano nazionale di ripresa e resilienza (PNRR) e per l’efficienza della giustizia.
- Ministero della Transizione Ecologica (Italia). (2021, 28 settembre). Decreto Ministeriale n. 397 del 28 settembre 2021: Disposizioni urgenti in materia di investimenti, sicurezza delle infrastrutture, dei trasporti e della circolazione stradale, per la funzionalità del Ministero delle infrastrutture e della mobilità sostenibili, del Consiglio superiore dei lavori pubblici e dell’agenzia nazionale per la sicurezza delle infrastrutture stradali e autostradali.
- Ministero delle Imprese e del Made in Italy. (n.d.). PMI innovative. Risorsa web reperibile all’indirizzo: <https://www.mimit.gov.it/it/impresa/piccole-e-medie-impres/pmi-innovative> (Consultato il 04/01/2026)
- Ministero delle Imprese e del Made in Italy. (n.d.). Startup innovative. Risorsa web reperibile all’indirizzo: <https://www.mimit.gov.it/it/startup-innovative> (Consultato il 05/01/2026)
- Mitchell T. M., 1997, “ Machine Learning” , McGraw-Hill.
- Nafiu, S. A., Azeez, M. O., AlAqad, K. M., Olarewaju, T. A., Yerima, E. A., & Tanimu, A. (2025). Waste plastic management: Recycling and the environmental health nexus. *Cleaner Materials*, 15, 100291
- NeuraVisionSrl(2026).NeuraVision. Risorsa web reperibile all’indirizzo: <https://www.neuravision.it/> (Consultato il 13/01/2026)
- Nisi A. (2022). AI, robot ed energia solare per pulire le strade: la startup Pixies punta sui rifiuti. *La Repubblica*. Risorsa web reperibile all’indirizzo: <https://www.repubblica.it/green-and->

[blue/2022/02/07/news/pixies\\_robot\\_energia\\_solare\\_rifiuti\\_ai\\_startup-336836514/](https://www.robots.com/news/pixies_robot_energia_solare_rifiuti_ai_startup-336836514/)  
(Consultato il 10/01/2026)

- OECD/Eurostat, 2018, “Oslo Manual 2018: Guidelines for collecting, reporting and using data on innovation (4th ed.)”, OECD Publishing; Eurostat.
- Oliveira Neto G. C., Bueno da Silva R. N., Lima G. A., de Araújo S. A., Belan P. A., Carvalho D., Almeida C. M. V. B., 2025, “Artificial intelligence-based optimization of the WEEE reverse chain in São Paulo – Brazil to promote economic, environmental and social benefits” , Journal of Cleaner Production, 521, 146073.
- Oliveira V., Sous V., Dias-Ferreira C., 2019, “ Artificial neural network modelling of the amount of separately-collected household packaging waste” , Journal of Cleaner Production, 210, 401–409.
- Omar I. A., Hasan M. A. A., Hussain A., Ahmad N. M. , 2024, “ Using blockchain technology to achieve sustainability in the hospitality industry by reducing food waste”, Computers & Industrial Engineering, 197, 110586.
- Palagan C. A., Joe S. S. A., Mary S. J. J., Jijo E. E., 2025, “Predictive analysis-based sustainable waste management in smart cities using IoT edge computing and blockchain technology” , Computers in Industry, 166, 104234.
- Parlamento europeo. (2023, 25 maggio). Economia circolare: definizione, importanza e vantaggi.  
<https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circolare-definizione-importanza-e-vantaggi> (Consultato il 06/09/2025)
- Recuperiamo Srl Società Benefit. (2024). Recuperiamo Srl Società Benefit. Risorsa web reperibile all’indirizzo: <https://recuperiamo.org/> (Consultato il 13/01/2026)
- RedazioneNews. (2025). Come funziona MIDA, il cestino smart per la raccolta differenziata. Fatti di Green. Risorsa web reperibile all’indirizzo: <https://fattidigreen.it/2025/10/come-funziona-mida-il-cestino-smart-per-la-raccolta-differenziata/> (Consultato il 17/01/2026)
- Registro delle Imprese (n.d.). Startup e PMI innovative. Risorsa web reperibile all’indirizzo: <https://startup.registroimprese.it/isin/home> (Consultato il 03/01/2026)
- Rogers E. M., 1983. “Diffusion of innovations (3rd ed.)”, The Free Press.
- Rossi, M., Papetti, A., & Germani, M. (2022). A comparison of different waste collection methods: Environmental impacts and occupational risks. Journal of Cleaner Production, 368, Article 133145
- Roy A., Manna A., Kim J., Moon I., 2022, “IoT-based smart bin allocation and vehicle routing in solid waste management: A case study in South Korea”, Computers & Industrial Engineering, 171, 108457.
- Saad M. R., Abdullah N. F., Abu-Samah A., Nordin R., 2025. “Empowering citizen scientists: A web app for plastic litter classification” , Expert Systems with Applications, 284, 127776.

- Sahoo S., Mukherjee A., Halder R. , 2021, “ A unified blockchain-based platform for global e-waste management” , International Journal of Web Information Systems, 17(5), 449–479.
- Santucci L. (2021). Pixies, il robot italiano a energia solare che pulisce le città. HuffPost Italia. Risorsa web reperibile all’indirizzo: [https://www.huffingtonpost.it/economia/2021/02/25/news/pixies\\_il\\_robot\\_italiano\\_a\\_energia\\_solare\\_che\\_pulisce\\_le\\_citta\\_-5078994/](https://www.huffingtonpost.it/economia/2021/02/25/news/pixies_il_robot_italiano_a_energia_solare_che_pulisce_le_citta_-5078994/) (Consultato il 12/01/2026)
- Scott I. J., de Castro Neto M., Pinheiro F. L., 2023, “Bringing trust and transparency to the opaque world of waste management with blockchain: A Polkadot parathread application”, Computers & Industrial Engineering, 182, 109347.
- Seker S., 2022, “IoT based sustainable smart waste management system evaluation using MCDM model under interval-valued q-rung orthopair fuzzy environment”, Technology in Society, 71, 102100.
- Seyyedi S. R., Kowsari, E., Gheibi M., Chinnappan A., Ramakrishna S., 2024, “A comprehensive review integration of digitalization and circular economy in waste management by adopting artificial intelligence approaches: Towards a simulation model”, Journal of Cleaner Production, 460, Article 142584.
- Sharma M., Joshi S., Kannan D., Govindan K., Singh R., Purohit H. C., 2020, “Internet of Things (IoT) adoption barriers of smart cities’ waste management: An Indian context”, Journal of Cleaner Production, 270, 122047.
- Song Q., Jinhui Li J., Zeng X., 2015, “Minimizing the increasing solid waste through zero waste strategy”, Journal of Cleaner Production, Volume 104,2015, Pages 199-210, ISSN 0959-6526.
- Startengy(2021). Il Progetto S.I.R.E.F.A. Risorsa web reperibile all’indirizzo: <https://www.startengy.com/il-progetto-sirefa/> (Consultato il 12/01/2026)
- Sust AI need. (n.d.). Progetti. Risorsa web reperibile all’indirizzo: <https://www.sustained.it/progetti-sustained-minox-societ%C3%A0-benefit.html> (Consultato il 10/01/2026)
- Thürer M., Pan Y. H., Qu T., Luo H., Li C. D., Huang G. Q., 2019, “Internet of Things (IoT) driven kanban system for reverse logistics: Solid waste collection”, Journal of Intelligent Manufacturing, 30(6), 2621–2630.
- Tian H., Tang J., Aljerf L., Wang T., Qiao J. , 2025, “ Furnace temperature control based on interval type-2 fuzzy broad learning system for municipal solid waste incineration process” , Expert Systems With Applications, 280, 127530.
- United Nations. (2015, September 25). Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development (A/RES/70/1). United Nations Department of Economic and Social Affairs. <https://sdgs.un.org/2030agenda> ( Consultato il 06/09/2025)
- Vaverková M. D., 2019,” Landfill impacts on the environment—Review”, Geosciences, 9(10), 431.
- Vimal K. E. K., Kandasamy J., Vezhavendhan R., Bose B., Menon A. K., Sivakumar K., 2024, “Digital technology adoption model for electric vehicle battery recycling

supply chain - an influential relationship mapping”, *Operations Management Research*, 17, 1469–1508.

Wan X. V., Wang L., 2018, “Digital twin-based WEEE recycling, recovery and remanufacturing in the background of Industry 4.0”, *International Journal of Production Research*, 57(12), 3892–3902.

Wegmann V. (2023). “Waste Management in Europe”. European Public Service Union (EPSU).

World Energy Council. (2016). *World Energy Resources* | 2016.

Yang L., Nguyen H., Bui X.-N., Nguyen-Thoi T., Zhou J., Huang J. , 2021 “Prediction of gas yield generated by energy recovery from municipal solid waste using deep neural network and moth-flame optimization algorithm”, *Journal of Cleaner Production*, 311, 127672.

Zoumpoulis P., Konstantinidis F. K., Tsimiklis G., Amditis A. , 2024, “ Smart bins for enhanced resource recovery and sustainable urban waste practices in smart cities: A systematic literature review” , *Cities*, 152, 105150.

