

I QUADERNI DEL **GREEN**book

1. MATERIE PRIME CRITICHE
E URBAN MINING PER LA
SICUREZZA DEL PAESE

I Quaderni del Green Book sono una collana redatta dalla Fondazione Utilitatis



Si ringraziano, per il loro contributo: **ENEA, CDC RAEE, Gruppo CAP e Gruppo Iren.**

Si ringraziano inoltre, MM spa, Politecnico di Milano e Alma Mater Università di Bologna per la partecipazione, in collaborazione con il Gruppo CAP, al progetto NEOFOS.

Fondazione Utilitatis pro acqua energia ambiente
Piazza Cola di Rienzo, 80/A – 00192 Roma
Tel. (+39) 06 68300142
utilitatis@utilitatis.org
www.utilitatis.org

INDICE

INTRODUZIONE.....	5
CAPITOLO 1 - Quadro globale e disponibilità delle materie prime critiche.....	8
1.1 <i>Rischi geopolitici e concentrazione dell'offerta</i>	11
1.2 <i>Dipendenza dalle importazioni dell'UE per le MPC estratte e lavorate</i>	12
1.3 <i>Terre rare negli impianti eolici</i>	14
CAPITOLO 2 - Domanda e offerta di materie prime critiche in Italia	18
2.1 <i>Offerta di materie prime critiche dell'Italia</i>	18
2.2 <i>Domanda di MPC e Strategiche in Italia</i>	22
CAPITOLO 3 - Urban mining e riciclo come leva strategica	26
3.1 <i>Rifiuti come giacimento urbano e potenziale di recupero di materie prime critiche dai RAEE domestici</i>	27
3.2 <i>Materiali e processi innovativi per i magneti delle turbine eoliche</i>	28
3.3 <i>NEOFOS: un approccio integrato per la rimozione e il recupero del fosforo</i>	29
APPENDICE.....	33

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni il tema delle materie prime critiche (MPC) ha assunto una rilevanza crescente, uscendo da una dimensione specialistica per investire la politica industriale, la sicurezza economica e le strategie di transizione ecologica. L'elettrificazione, la diffusione delle tecnologie digitali, la crescita delle energie rinnovabili e il rafforzamento di filiere strategiche stanno infatti aumentando la domanda di materiali essenziali, spesso caratterizzati da forte concentrazione geografica dell'offerta, esposizione a rischi geopolitici e limitate possibilità di sostituzione. In questo contesto, il controllo delle catene di approvvigionamento incide direttamente sulla capacità dei sistemi economici di sostenere investimenti, innovazione e competitività.

Tuttavia, la disponibilità interna di risorse e la capacità di presidiare le diverse fasi della catena del valore restano parziali e disomogenee sia a livello europeo che nazionale. In particolare, il patrimonio minerario nazionale, pur significativo, non consente nel breve periodo di rispondere alla domanda interna attraverso la sola offerta primaria, anche a causa di tempi lunghi, complessità autorizzative, costi, vincoli territoriali e criticità ambientali.

Per le imprese attive nella raccolta e nel trattamento dei rifiuti, questo fenomeno si configura come un potenziale spazio di generazione di valore economico, legato alla capacità di intercettare, selezionare e valorizzare flussi di materiali ad alto contenuto di materie prime strategiche.

Proprio per questo, il tema richiede una lettura che tenga insieme dimensione geopolitica, struttura industriale e organizzazione delle filiere del recupero. In tale prospettiva, urban mining e riciclo assumono un ruolo crescente: il recupero di materiali da rifiuti tecnologici, residui industriali e prodotti a fine vita non rappresenta solo una risposta ambientale, ma una componente sempre più rilevante di una politica delle risorse. Esso può ampliare la disponibilità interna di input strategici, ridurre le vulnerabilità delle filiere e stimolare investimenti in capacità impiantistiche, innovazione tecnologica e competenze industriali.

Il rafforzamento della filiera europea delle materie prime critiche non riguarda soltanto l'apertura di nuovi siti estrattivi, ma anche lo sviluppo delle capacità di trattamento, riciclo, recupero e valorizzazione delle matrici a fine vita. In questa prospettiva, il recupero e trattamento di materie prime critiche e strategiche, apre uno spazio di opportunità particolarmente rilevante per le utility che operano nella gestione dei rifiuti.

La loro presenza capillare sui territori, il presidio delle attività di raccolta e trattamento, la disponibilità di infrastrutture impiantistiche e la relazione stabile con amministrazioni locali, cittadini e imprese possono infatti renderle attori centrali nella costruzione di una filiera nazionale dell'urban mining. Le opportunità non riguardano soltanto il riciclo in senso stretto, ma anche la capacità di intercettare e concentrare flussi ad alto contenuto di materiali strategici, sviluppare piattaforme di selezione e pretrattamento, favorire attività di raffinazione e valorizzazione delle materie recuperate, promuovere sistemi di tracciabilità e certificazione dei materiali e attivare partnership industriali con industrie a monte e con il mondo della ricerca.

In altri termini, il tema delle materie prime critiche può rappresentare per le utility un terreno di evoluzione del proprio ruolo: non più soltanto gestori del fine vita, ma soggetti in grado di contribuire direttamente alla sicurezza degli approvvigionamenti, alla resilienza industriale e alla competitività del Paese, trasformando il rifiuto da costo da

gestire a risorsa strategica da presidiare. In questo senso, il rafforzamento delle filiere delle materie prime critiche può diventare anche una leva per promuovere nuovi investimenti impiantistici, maggiore integrazione industriale e una più netta valorizzazione strategica del servizio ambientale all'interno delle politiche industriali nazionali ed europee.

Il presente Quaderno si propone di offrire una lettura integrata del tema, con particolare attenzione al caso italiano. L'obiettivo è evidenziare come il rafforzamento della resilienza nazionale ed europea richieda un insieme coordinato di strumenti. In questa prospettiva, il lavoro intende mettere in luce sia i limiti strutturali che caratterizzano oggi il posizionamento italiano, sia le opportunità che possono emergere dallo sviluppo di filiere innovative di recupero, trattamento e valorizzazione di risorse strategiche.

A tal fine, lo studio si sviluppa lungo tre direttrici tra loro strettamente connesse. La prima ricostruisce il contesto internazionale ed europeo, mettendo in evidenza concentrazione dell'offerta, rischi geopolitici e legame tra disponibilità dei materiali e sviluppo delle tecnologie della transizione, con un focus sulle filiere dei magneti permanenti e delle terre rare, rilevanti per il settore eolico. La seconda si concentra sul caso italiano, analizzando sia il lato dell'offerta, attraverso il patrimonio minerario e le potenzialità di valorizzazione delle risorse interne, sia il lato della domanda, a partire dal fabbisogno del sistema produttivo e dai flussi di approvvigionamento dall'estero. Ne emerge il profilo di un Paese dotato di alcune risorse e competenze, ma ancora fortemente dipendente dall'esterno. La terza approfondisce il contributo di riciclo e urban mining al rafforzamento delle filiere delle materie prime critiche, mostrando, attraverso casi significativi, come il recupero di materia possa tradursi in sviluppo impiantistico, innovazione tecnologica e maggiore resilienza degli approvvigionamenti, in coerenza con gli obiettivi di circolarità e autonomia strategica.

È in questa prospettiva che il Quaderno propone una lettura delle materie prime critiche come leva emergente per lo sviluppo di nuove opportunità economiche nella filiera del waste management, con particolare attenzione al contesto italiano ed europeo. L'obiettivo è mettere in evidenza come l'evoluzione dei fabbisogni industriali e la crescente centralità dei materiali strategici stiano progressivamente ampliando il perimetro di attività a valore per gli operatori del settore, aprendo spazi di posizionamento lungo segmenti sempre più avanzati della catena del recupero e della valorizzazione. In questa cornice, il caso italiano rappresenta un punto di osservazione rilevante sia per i vincoli strutturali che lo caratterizzano, sia per le potenzialità legate allo sviluppo di filiere integrate di trattamento e recupero.

CAPITOLO 1

Quadro globale e disponibilità
delle materie prime critiche

CAPITOLO 1 - Quadro globale e disponibilità delle materie prime critiche

Nei prossimi decenni, la pressione sulle risorse naturali è destinata ad aumentare in modo significativo, in conseguenza di dinamiche strutturali quali la crescita demografica globale, i processi di industrializzazione e digitalizzazione, l'incremento della domanda nei Paesi emergenti e la transizione verso la neutralità climatica. Quest'ultima, in particolare, comporta un uso crescente di metalli, minerali e materiali biotici nelle tecnologie e nei prodotti a basse emissioni. In tale contesto, le stime dell'OCSE indicano che la domanda mondiale di materiali è destinata a più che raddoppiare, passando da 79 miliardi di tonnellate a 167 miliardi di tonnellate entro il 2060¹. Le materie prime rappresentano un input essenziale per il sistema industriale dell'Unione europea, collocandosi a monte di tutte le principali catene del valore. Nell'ambito delle materie prime non energetiche e non agricole analizzate dalla Commissione europea, una parte viene classificata come critica sulla base di criteri oggettivi, tra cui l'importanza economica e il rischio di approvvigionamento. Queste, sono materie prime di grande importanza economica per l'UE e in generale nel contesto globale, con un elevato rischio di perturbazione dell'approvvigionamento a causa della concentrazione delle fonti e della mancanza di sostituti validi e a prezzi accessibili. Le materie prime critiche, pur essendo spesso prodotte e impiegate in volumi relativamente contenuti, presentano caratteristiche funzionali e prestazionali che le rendono indispensabili per lo sviluppo di settori strategici quali le energie rinnovabili, la mobilità elettrica, le tecnologie digitali, l'aerospazio e la difesa.

In particolare, risultano importanti per:

- Le catene del valore industriali: le materie prime non energetiche sono collegate a tutte le industrie lungo tutte le fasi della catena di approvvigionamento;
- Le tecnologie strategiche in settori come spazio e difesa: i progressi tecnologici e l'aumento della qualità della vita dipendono da un numero variabile e crescente di materie prime;
- Il clima, l'energia e l'ambiente: le tecnologie pulite richiedono materie prime, insostituibili nei pannelli solari, nelle turbine eoliche, nei veicoli elettrici e nell'illuminazione efficiente sotto il profilo energetico

Tra gli esempi più rilevanti si annoverano gli elementi delle terre rare, impiegati nei magneti permanenti per i motori delle turbine eoliche, il litio per le batterie e il silicio per la produzione di semiconduttori. Alla luce di tali applicazioni, le MPC assumono un ruolo abilitante per il conseguimento degli obiettivi strategici dell'Unione europea. In particolare, il Green Deal europeo, la comunicazione REPowerEU, la comunicazione congiunta sull'analisi dei divari negli investimenti per la difesa e sulle prospettive di intervento, nonché la Strategia digitale, definiscono obiettivi connessi alle transizioni verde e digitale, al rafforzamento della resilienza e all'autonomia strategica dell'UE. Il perseguimento di tali obiettivi è strettamente subordinato alla disponibilità e alla sicurezza di approvvigionamento delle materie prime critiche. In parallelo, la Commissione europea ha già avviato l'attuazione del piano d'azione delineato nella Comunicazione del 2020 sulle materie prime critiche.

Nel 2022, il Consiglio europeo, attraverso la Dichiarazione di Versailles, ha esplicitamente richiamato la necessità di adottare ulteriori misure per il rafforzamento della sovranità

¹ Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report

europea e la riduzione delle dipendenze strategiche, includendo tra le priorità la sicurezza dell'approvvigionamento di MPC e la valorizzazione del mercato unico. In modo analogo, il Parlamento europeo, con la risoluzione del novembre 2021², ha sollecitato l'adozione di una strategia europea sulle materie prime critiche. Anche la Conferenza sul futuro dell'Europa ha evidenziato l'esigenza di ridurre la dipendenza dell'UE da Paesi terzi in questo ambito.

A marzo 2024 il Consiglio Europeo ha adottato il Regolamento (UE) 2024/1252 – Critical Raw Materials Act (CRMA) - che mira ad assicurare il corretto approvvigionamento delle MPC nell'UE e a rafforzare tutte le fasi della catena del valore europea diversificando le importazioni dell'UE per ridurre le dipendenze strategiche, migliorando la capacità dell'UE di monitorare e attenuare i rischi di perturbazioni dell'approvvigionamento di MPC e Rafforzando la circolarità e la sostenibilità.

Il Regolamento dispone due elenchi di MPC, soggetti ad aggiornamento periodico e basati su metodologie chiare e trasparenti, ricorrendo a due categorie: materie prime strategiche e materie prime critiche. Delle 34 CRM, 17 sono strategiche: ovvero caratterizzate da un elevato rischio di fornitura, alta concentrazione geografica (es. Cina per terre rare) e domanda crescente e il Regolamento (UE) 2024/1252 le distingue definendole essenziali per la sicurezza e la competitività europea.

Figura 1 – Materie prime critiche (MPC) e materie prime strategiche (MPS)



Fonte: Elaborazione su dati UE³

Un elemento centrale del CRMA è la definizione di benchmark quantitativi al 2030 per le materie prime strategiche, che rendono il dispositivo normativo particolarmente rilevante anche sul piano della governance industriale. In particolare, l'UE fissa l'obiettivo di coprire internamente almeno il 10% del consumo annuo tramite estrazione, almeno il 40% tramite capacità di trasformazione/processing e almeno il 25% tramite riciclo. Inoltre,

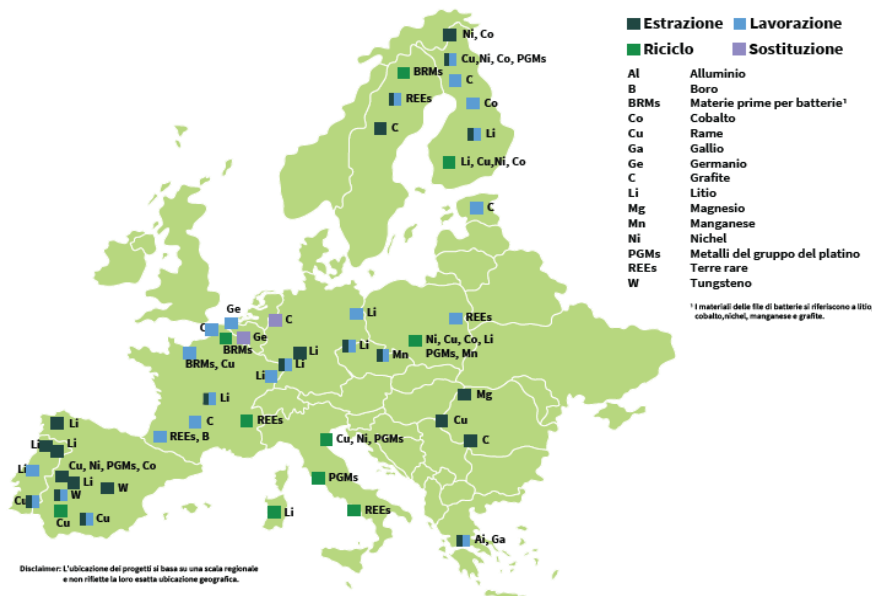
² A European strategy for critical raw materials (2021/2011(INI)); disponibile su: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2021-0468_EN.html

³ <https://www.consilium.europa.eu/it/infographics/critical-raw-materials/>

stabilisce che non oltre il 65% del fabbisogno annuo di ciascuna materia prima strategica (a ogni stadio rilevante di lavorazione) debba provenire da un singolo Paese terzo. Tali soglie segnalano una chiara evoluzione della politica europea che, dal solo monitoraggio della criticità passa alla costruzione di una vera strategia di autonomia materiale e mitigazione del rischio geopolitico.

Il CRMA si inserisce inoltre in una cornice politica più ampia, che negli ultimi mesi si è ulteriormente consolidata. Da un lato, il Net-Zero Industry Act (NZIA) rafforza il nesso tra sicurezza delle forniture di materie e capacità industriale europea, ponendo come riferimento il raggiungimento di una capacità manifatturiera interna pari ad almeno il 40% del fabbisogno annuo di tecnologie net-zero entro il 2030. Dall'altro, il Clean Industrial Deal (lanciato il 26 febbraio 2025) esplicita ulteriormente la centralità dell'accesso alle materie prime critiche e della circolarità nella strategia di competitività europea, prevedendo strumenti quali meccanismi di aggregazione della domanda, un centro europeo per gli acquisti congiunti di materie prime critiche e l'obiettivo di portare la quota di materiali circolari al 24% entro il 2030. Dal punto di vista attuativo, il 2025 ha segnato il passaggio dalla fase normativa alla fase operativa del CRMA. La Commissione ha infatti approvato i primi progetti strategici ai sensi del Regolamento EU 1252/2024: una prima lista di progetti localizzati nell'UE (approvata il 25 marzo 2025) e una successiva lista di progetti in Paesi terzi/territori d'oltremare (approvata il 4 giugno 2025). Questa evoluzione è particolarmente rilevante, perché traduce gli obiettivi del CRMA in una pipeline concreta di investimenti e interventi industriali, con implicazioni dirette per tempi autorizzativi, accesso al finanziamento e coordinamento europeo delle filiere.

Figura 2 – Progetti strategici per l'UE sulle MPC



Fonte: Elaborazione Utilitatis su dati della Commissione Europea

Nel complesso, il CRMA va quindi interpretato non soltanto come una misura di sicurezza dell'approvvigionamento, ma come un pilastro della politica industriale europea nella fase di convergenza tra transizione ecologica, competitività e autonomia strategica. In tale prospettiva, la sua efficacia dipenderà non solo dal raggiungimento dei benchmark quantitativi al 2030, ma anche dalla capacità dell'UE di coordinare strumenti industriali,

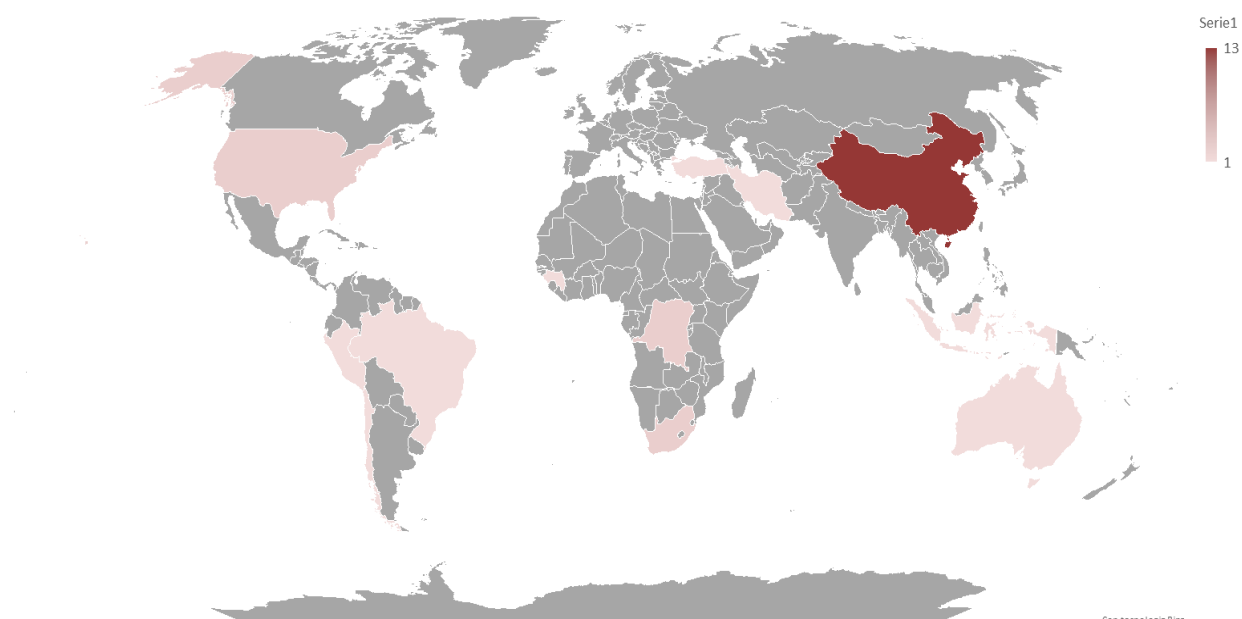
commerciali, finanziari e di economia circolare in un quadro coerente e tempestivo di implementazione.

1.1 Rischi geopolitici e concentrazione dell'offerta

La distribuzione geografica delle materie prime critiche configura un fenomeno articolato e multilivello che, negli ultimi anni, ha attirato crescente attenzione, soprattutto nel dibattito sulla catena di valore, sulla sicurezza degli approvvigionamenti e sulla sostenibilità. Le attività di estrazione e, soprattutto, di lavorazione/raffinazione delle MPC tendono a concentrarsi in un numero limitato di aree e impianti, determinando una struttura di mercato in cui pochi Paesi esercitano un'influenza dominante lungo l'intera filiera.

A titolo esemplificativo, l'Australia ricopre un ruolo di primo piano nella produzione di minerale di ferro e litio, risorse centrali rispettivamente per l'industria siderurgica e per le tecnologie elettrochimiche legate all'accumulo energetico. Il Cile si colloca tra i principali produttori mondiali di rame. La Repubblica Democratica del Congo rappresenta un nodo strategico per la produzione di cobalto. Infine, l'Indonesia ha consolidato una leadership nel nichel. La Cina è il primo paese produttore di ben 13 delle materie prime critiche identificate dal CRMA, configurandosi il paese che maggiormente detiene ed esporta MPC (Figura 3).




























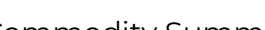
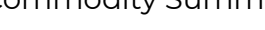
Figura 3 – Numero di MPC per cui un Paese è primo produttore al mondo



Fonte: Elaborazione Utilitatis su dati USGS, Mineral Commodity Summary, 2026

Guardando alla concentrazione della produzione di MPC, misurata come la produzione percentuale di MPC dei principali tre paesi produttori rispetto al totale prodotto a livello mondiale, si nota che le MPC sono principalmente concentrate in pochissimi Paesi, con alcuni materiali, come il gallio e il niobio che raggiungono quasi il 100% di concentrazione nei top 3 paesi produttori con i restanti paesi produttori che detengono una quota marginale e prossima allo zero (Tabella 1).

Tabella 1 - Principali Paesi produttori di MPC e concentrazione della produzione

Materiale	Top 1 Paese	Produzione top 1	Produzione top 3	Concentrazione produzione
Antimonio	Cina	36%	85%	
Arsenico	Perù	50%	98%	
Bauxite	Guinea	35%	77%	
Berillio	Usa	53%	90%	
Bismuto	Cina	86%	95%	
Boro	Turchia	51%	75%	
Cobalto	Congo	75%	92%	
Elio	Usa	41%	82%	
Gallio	Cina	99%	100%	
Grafite naturale	Cina	80%	89%	
Indio	Cina	70%	92%	
Magnesio	Cina	88%	95%	
Manganese	Sud Africa	40%	77%	
Nichel	Indonesia	72%	85%	
Niobio	Brasile	93%	100%	
Rame	Cile	26%	56%	
Roccia fosfatica	Cina	45%	68%	
Silicio metallico	Cina	88%	95%	
Stronzio	Iran	55%	95%	
Tantalio	Congo	52%	84%	
Terre rare	Cina	69%	90%	
Titanio metallico	Cina	33%	66%	
Tungsteno	Cina	81%	88%	
Vanadio	Cina	72%	96%	
Alluminio	Cina	67%	79%	
Barite	India	36%	74%	
Feldspato	India	22%	55%	
Litio	Australia	32%	73%	
Metalli del gruppo del Platino	Sud Africa	53%	92%	

Fonte: Elaborazione Utilitatis su dati USGS, Mineral Commodity Summary, 2026⁴

Particolarmente rilevante osservare che i Paesi che hanno maggiore concentrazione della produzione di MPC sono anche quelli che hanno la maggiore concentrazione di riserve. Tale coincidenza risulta particolarmente evidente per la Cina e per il Brasile. Ciò si traduce nella sostanziale posizione monopolistica di questi Paesi con riferimento a una determinata MPC prodotta, in quanto la possibilità di assicurare la produzione di tale MPC con continuità nel tempo è assicurata dalla disponibilità della riserva, insita nel proprio territorio.

1.2 Dipendenza dalle importazioni dell'UE per le MPC estratte e lavorate

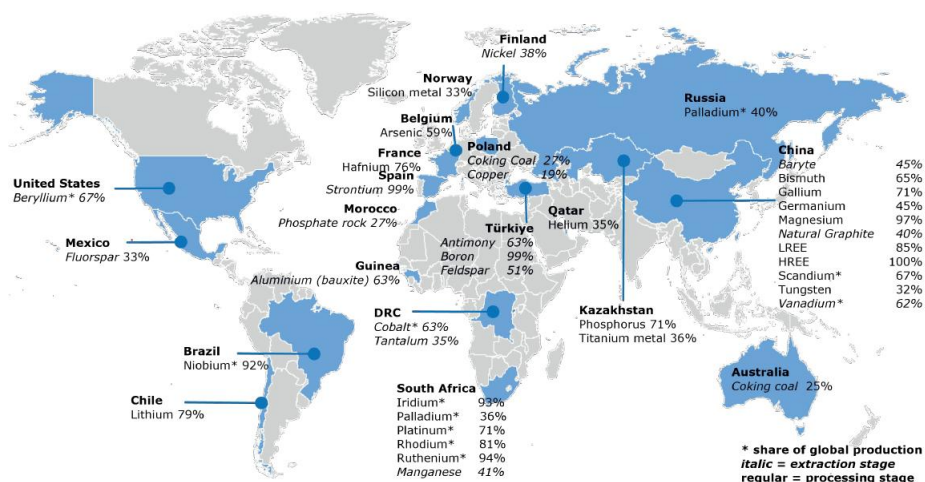
La concentrazione di produzione e di riserve di MPC in pochi Paesi ha chiaramente non pochi effetti sul piano degli equilibri geopolitici su scala globale. Chi controlla le catene di approvvigionamento delle MPC acquisisce infatti una leva strategica paragonabile a quella storicamente detenuta dai Paesi esportatori di petrolio. Attraverso tale leva è possibile influenzare prezzi e disponibilità globali, condizionare scelte politiche, industriali e tecnologiche e usare restrizioni all'export come strumento di pressione diplomatica. Questo trasforma le MPC in strumenti di politica estera, aumentando la vulnerabilità delle economie importatrici. Grazie alla sua posizione di principale

⁴ La lista comprende le MPC e le MPS i cui dati sono disponibili sul database USGS. Si precisa che, per questioni commerciali, non tutti i Paesi rendono note le produzioni e le riserve di materie prime critiche e strategiche.

detentore delle MPC, la Cina esercita di fatto un ruolo centrale sui flussi globali di materiali strategici, influenzando in modo determinante gli assetti di potere industriale su scala mondiale, ed in particolare sull'UE che risulta un importatore di MPC. Infatti, attualmente, l'UE dipende esclusivamente da un Paese (Figura 4) per diverse MPC, in particolare:

- la Cina fornisce il 100% dell'approvvigionamento di elementi delle terre rare pesanti nell'UE;
- la Turchia fornisce il 99% dell'approvvigionamento di boro dell'UE;
- il Sud Africa fornisce il 93% dell'iridio e del 71% del fabbisogno di platino dell'UE.

Figura 4 – Maggiori fornitori europei di MPC



Fonte: Study on the critical raw materials for the EU 2023

Altri importanti fornitori globali di materiali specifici sono la Russia per i metalli del gruppo del platino, la Repubblica Democratica del Congo per il cobalto e Tantalio, gli Stati Uniti per il berillio e il Brasile per il niobio. Per quanto riguarda le importazioni interne all'UE, queste rappresentano quote importanti dell'approvvigionamento di specifiche MPC, come il carbone da coke e il rame dalla Polonia, l'arsenico dal Belgio, l'afnio dalla Francia, lo stronzio dalla Spagna o il nichel dalla Finlandia.

La forte concentrazione del mercato e la scarsa diversificazione diventano ancora più critiche con l'aumento delle restrizioni alle esportazioni, introdotte per proteggere le filiere nazionali a valle (es. lavorazione, raffinazione, ecc.). Dal 2009 le restrizioni sono quintuplicate e circa il 10% del valore globale delle esportazioni di materie prime critiche è stato recentemente colpito da almeno una misura, in particolare per stagno, titanio, platino e cobalto⁵. I Paesi più attivi sono Cina, India, Russia, Argentina e RDC, con la Cina che ha aumentato le restrizioni di nove volte tra il 2009 e il 2020. Inoltre, a partire dal 2020, le azioni volte ad aumentare la capacità di raffinazione delle MPC si sono concentrate prevalentemente nei principali Paesi produttori, con un ruolo nettamente predominante della Cina. Questo scenario costituisce un segnale di forte criticità per l'Europa, chiamata a imprimere una rapida accelerazione alle proprie politiche di consolidamento e diversificazione delle catene di fornitura. L'assenza di investimenti tempestivi nello sviluppo di una filiera europea delle MPC comporterebbe per l'UE il rischio di nuove forme di dipendenza strategica, compromettendo la crescita di

⁵ OECD Inventory on Export Restrictions on Industrial Raw Materials, 2025

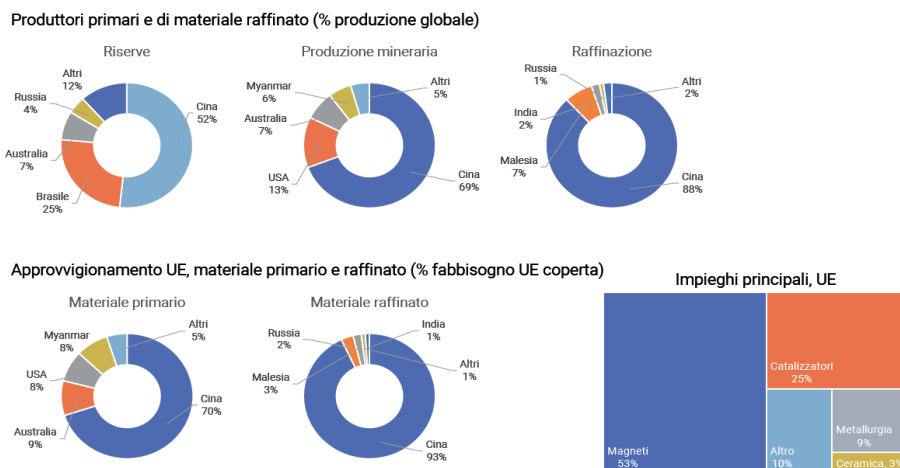
comparti fondamentali per la transizione energetica, la sicurezza tecnologica e l'indipendenza industriale del continente.

1.3 Terre rare negli impianti eolici

Il settore dell'energia eolica dipende fortemente da alcune materie prime critiche, le terre rare, impiegate nei magneti permanenti dei generatori delle turbine eoliche. La produzione globale di terre rare è fortemente concentrata in pochi Paesi, soprattutto asiatici. La Cina domina il mercato e controlla una quota significativa sia dell'estrazione sia delle fasi di raffinazione e lavorazione, possedendo più della metà delle riserve mondiali e arrivando a circa il 70% dell'estrazione e a quasi il 90% della raffinazione. Tale fase rappresenta uno dei principali colli di bottiglia della catena del valore, poiché richiede tecnologie avanzate e comporta impatti ambientali significativi (alcuni Paesi produttori di minerali, come l'Australia, spesso li esportano per il processamento in impianti localizzati in Asia).

L'Unione europea presenta una forte dipendenza dalla Cina, evidenziando un'elevata vulnerabilità della catena di approvvigionamento. Nel 2024 l'UE ha importato circa 12.900 tonnellate di terre rare, con la Cina come principale partner commerciale (46,3% delle importazioni), seguita da Russia e Malesia. Questa forte dipendenza è particolarmente critica per settori strategici europei come automotive elettrico, energia eolica, elettronica e difesa, che utilizzano magneti permanenti a base di neodimio. La limitata presenza di miniere attive e di impianti di raffinazione sul territorio europeo rende infatti cruciale la stabilità della catena di approvvigionamento, particolarmente vulnerabile a rischi geopolitici e commerciali (ad es. controlli sulle esportazioni e politiche industriali dei Paesi produttori e volatilità dei prezzi).

Figura 5 – Paesi produttori di terre rare e approvvigionamento UE

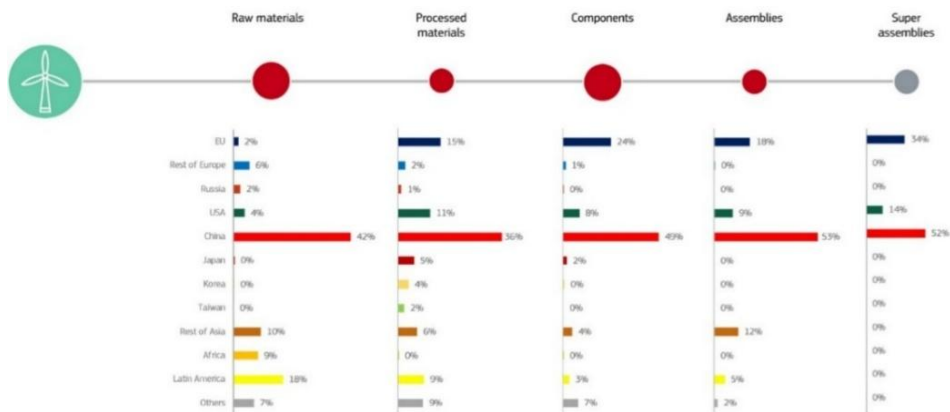


Fonte: Materie prime critiche e resilienza delle supply chains - Centro Studi Confindustria (2026); elaborazione dati Commissione Europea 2023, RMIS 2026, USGS 2026

Nel contesto europeo, l'Italia rappresenta un importante utilizzatore industriale di magneti permanenti. La produzione primaria di magneti e delle relative materie prime resta però fortemente concentrata in Cina, mentre l'industria europea e italiana sono coinvolte principalmente nella progettazione, applicazione industriale e integrazione. Il mercato nazionale risulta, quindi, vulnerabile a interruzioni della supply chain e alla volatilità dei prezzi, e critico a causa anche della crescente domanda di veicoli elettrici, sistemi di automazione e tecnologie per le energie rinnovabili.

La catena di approvvigionamento delle turbine eoliche si compone di cinque fasi: materie prime, materiali lavorati, componenti, assemblaggi e super-assemblaggio. L'UE presenta debolezze lungo l'intera catena di approvvigionamento, ad eccezione della fase finale relativa alla produzione delle turbine eoliche, e i colli di bottiglia più critici si riscontrano nella catena di approvvigionamento delle terre rare e dei magneti permanenti.

Figura 6 – Rischi di approvvigionamento, colli di bottiglia e attori chiave lungo tutta la catena delle turbine eoliche



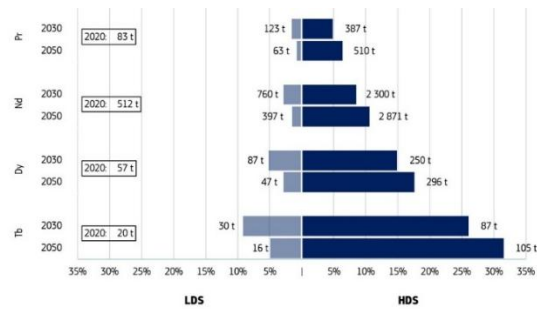
Fonte: elaborazione dati JRC 2023

Sebbene esistano diversi tipi di magneti permanenti, quelli Neodimio-Ferro-Boro (NdFeB) sono i più utilizzati per le loro eccezionali proprietà, uguagliate solo da quelli in Samario-Cobalto (SmCo), che sono però significativamente più costosi. I magneti NdFeB, oltre ai tre elementi principali, contengono di solito anche altre tre terre rare in piccole quantità, in particolare praseodimio (Pr), terbio (Tb) e disprosio (Dy). Nd e Pr contribuiscono alla forza magnetica, mentre Tb e Dy migliorano la resistenza alla smagnetizzazione ad alte temperature. L'esatta composizione delle terre rare all'interno di un magnete permanente NdFeB può variare, con diverse proporzioni dei diversi elementi che determinano diverse proprietà magnetiche. Per le turbine eoliche, un magnete permanente medio contiene principalmente il 28,5% di neodimio, il 4,4% di disprosio, l'1% di boro e il 66% di ferro e pesa fino a 4 tonnellate.

Il Joint Research Centre (JRC) ha effettuato una dettagliata analisi dei dati e ha fornito una stima della domanda globale di terre rare (in particolare Nd, Pr, Tb e Dy) per applicazioni nei generatori eolici e nei veicoli elettrici, ipotizzando due possibili scenari mondiali: il primo, chiamato "low-demand", in cui le risorse di terre rare riusciranno a soddisfare le attuali richieste di mercato ipotizzando che non cresceranno in modo significativo e che l'UE raggiungerà nel 2030 gli obiettivi previsti in materia di cambiamenti climatici; il secondo invece, chiamato "high-demand", in cui la domanda supererà abbondantemente l'offerta a causa del conseguimento entro il 2050 dell'obiettivo di raggiungere il 100% di energia primaria rinnovabile e la completa decarbonizzazione dell'UE e, quindi, di un incremento considerevole della produzione di energia rinnovabile, tra cui quella eolica.

Figura 7 – Domanda di REEs nel 2030 e nel 2050 rispetto al 2020⁶

⁶ HDS=High Demand Scenario; LDS= Low Demand Scenario (LDS)

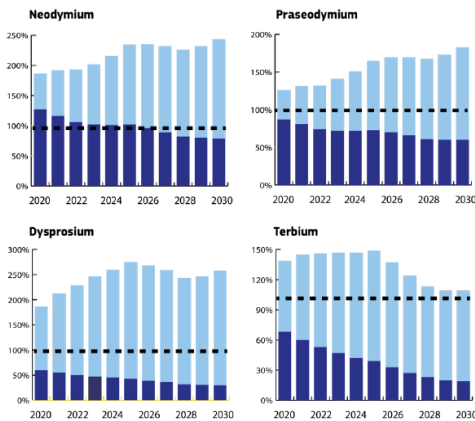


Fonte: elaborazione dati JRC 2023

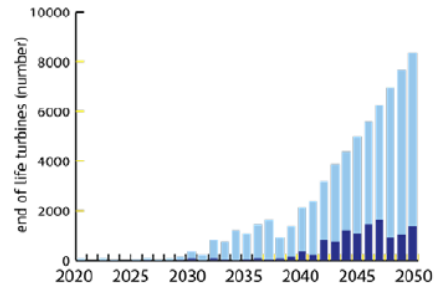
Nonostante l'Unione Europea dipenda al 100% dalle importazioni di terre rare, il tasso di riciclo a fine vita si attesta attualmente solo all'1% (calcolato come apporto di materiale secondario post-consumo sul totale dei materiali impiegati). L'UE ha previsto, quindi, investimenti sullo sviluppo di tecnologie sia di urban mining (recupero da rifiuti elettronici e magneti a fine vita) che di reshoring (riportare la catena del valore all'interno dei propri confini), allo scopo di ridurre la dipendenza dalle importazioni.

Figura 8 – Rapporto domanda/offerta dei 4 REEs più utilizzati considerando tutti i settori applicativi

Rapporto domanda/offerta dei 4 REEs più utilizzati considerando tutti i settori applicativi



Numero di turbine eoliche contenenti magneti permanenti a fine vita entro il 2050



High demand scenario
Low demand scenario

Fonte: JRC

Le strategie ritenute più efficaci sono l'innovazione nei processi produttivi per migliorare la riciclabilità e la sostituzione di terre rare con materiali alternativi. Poiché le possibilità di aumentare l'approvvigionamento primario delle terre rare sono limitate, risulta infatti particolarmente importante potenziare a livello europeo anche le infrastrutture per il riciclo, che potrebbe rivelarsi un'interessante fonte di terre rare nell'UE. Il JRC ha effettuato una stima del numero di magneti permanenti utilizzati nelle turbine eoliche che saranno disponibili a fine vita per il riciclo: maggiore è il numero di turbine eoliche installate (scenario ad alta domanda), maggiore sarà la quantità di prodotti a fine vita disponibili.

CAPITOLO 2

**Domanda e offerta di materie
prime critiche in Italia**

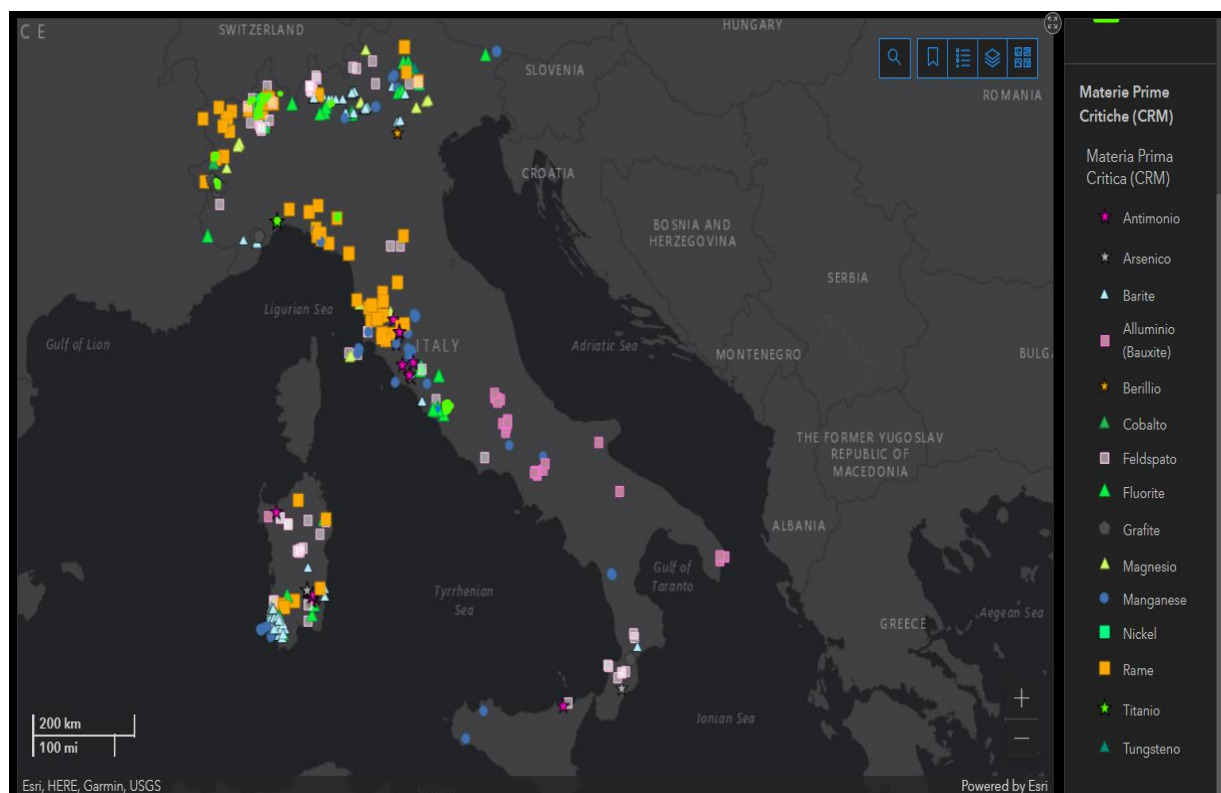
CAPITOLO 2 - Domanda e offerta di materie prime critiche in Italia

2.1 Offerta di materie prime critiche dell'Italia

In attuazione del Regolamento EU 1252/2024, Critical Raw Materials Act, che delinea la strategia che l'Unione europea deve perseguire per cercare di mitigare la propria dipendenza dalle forniture estere di materie prime essenziali per il proprio apparato industriale, il DL 25 giugno 2024, n. 84, convertito con modificazioni dalla legge 115/2024, ha incaricato ISPRA di elaborare e realizzare il Programma nazionale di esplorazione (PNE)⁷ mineraria generale per le materie prime critiche che mira a fornire le informazioni di base utili a definire le potenzialità minerarie nazionali.

L'estrazione di minerali metalliferi critici è oggi assente e l'Italia dipende totalmente dalle importazioni, ma molti giacimenti storici potrebbero essere rivalutati grazie a nuove tecniche di esplorazione e all'aumento dei prezzi di mercato. Va chiarito, al riguardo, che la sola strategia efficace è quella che integra una attività estrattiva sostenibile con le pratiche di economia circolare, di riprogettazione ecologica dei prodotti, di ricerca di materiali sostitutivi e con lo sviluppo di collaborazioni con i paesi europei ed extra UE. Nessun sistema economico avanzato è indipendente sotto il profilo minerario e la situazione italiana non è diversa da quella di molte delle economie di riferimento. Non è dunque né possibile, né verosimilmente auspicabile che la strategia nazionale guardi verso una generalizzata autosufficienza.

Figura 9 - Dashboard delle miniere di MPC e MPS italiane



Fonte: Portale delle Georisorse Minerarie d'Italia - GeMMA - Ispra

⁷ <https://www.programmazioneeconomica.gov.it/media/hhtlqhse/pne.pdf>

Ad oggi, in Italia risultano attive circa 76 miniere, di cui 22 relative a materiali inclusi nell'elenco delle 34 materie prime critiche individuate dall'Unione europea. Tra queste, 20 riguardano l'estrazione di feldspato e 2 quella di fluorite, localizzate nei comuni di Bracciano e Silius. Si tratta, allo stato attuale, delle uniche materie prime critiche effettivamente presenti nel Paese. Il feldspato riveste un ruolo particolarmente rilevante per l'industria ceramica, mentre la fluorite trova applicazione in numerosi comparti industriali, tra cui siderurgia, produzione di alluminio, vetro, elettronica e refrigerazione (GeMMA Database).

BOX 1 - Attività di indagine mineraria nell'ambito del PNE e progetto PNRR URBES

Dati recenti (luglio 2025) di ISPRA indicano che le attività di indagine si concentreranno sulle aree più promettenti, selezionate da un gruppo di esperti tra i massimi specialisti italiani di giacimenti minerari. Il focus sarà rivolto in particolare a numerose Materie Prime Critiche e Strategiche individuate dalla Commissione Europea, tra cui: litio, boro, grafite, rame, manganese, fluorite, barite, feldspato, antimonio, tungsteno, titanio, bismuto, arsenico, magnesio, terre rare e metalli del gruppo del platino.

L'attenzione si estende anche ad altri minerali di interesse per l'industria nazionale, come zeoliti e minerali industriali. I focus di esplorazione interesseranno quasi tutte le macroaree geografiche del Paese, concentrandosi in particolare su territori già noti per la loro potenzialità mineraria o per la presenza di formazioni geologiche favorevoli.

Nel Nord-Est, Lombardia e Trentino-Alto Adige saranno al centro delle ricerche per la presenza di fluorite e barite, nonché di terre rare localizzate nelle Alpi Meridionali.

A Nord-Ovest, l'attenzione si concentrerà sull'area di Finero, in Piemonte, per l'indagine sui metalli del gruppo del platino (PGM), mentre nelle ofioliti liguri verranno esplorati giacimenti di rame e manganese. Sempre in Piemonte e in Liguria si cercherà di approfondire la conoscenza dei depositi di grafite.

Nel Centro Italia, in particolare in Toscana, Lazio, Emilia-Romagna, Marche e alcune aree del Piemonte, sarà analizzato il potenziale del litio, sia in contesti geotermali che sedimentari. In Toscana, inoltre, saranno oggetto di studio i noti depositi di antimonio e magnesio delle Colline Metallifere, mentre nel Lazio le attività si focalizzeranno sulla fluorite, anche in relazione alla sua concentrazione in terre rare.

Nel Sud Italia, la Campania sarà interessata da indagini sul litio, sui feldspati e su altri minerali industriali strategici per l'industria nazionale, mentre in Calabria verranno esaminati i significativi giacimenti di grafite della Sila. In Sardegna, storicamente la principale regione mineraria italiana, l'esplorazione riguarderà diversi materiali: minerali industriali come feldspati, zeoliti, bentoniti e caolino presenti nelle aree magmatiche; mineralizzazioni a fluorite, barite e terre rare nel centro-sud dell'isola; e i più importanti depositi metalliferi. In particolare, si opererà nel distretto di Funtana Raminosa, dove verranno indagati tungsteno, terre rare, rame e altri solfuri, e nel settore sud-occidentale dell'isola, dove l'interesse è rivolto al rame e al molibdeno, associati a stagno, bismuto, arsenico e oro.

In tutte le aree oggetto di indagine saranno inoltre mappati e caratterizzati i depositi di rifiuti estrattivi abbandonati, nell'ambito del Progetto PNRR URBES, che contribuisce alla definizione di un quadro nazionale aggiornato sulle passività ambientali legate alle attività minerarie del passato e finanziato con dieci milioni di euro.

Nel contesto europeo, l'Italia occupa una posizione di rilievo soprattutto per il feldspato. Secondo i dati del World Mining Data, nel 2023 la produzione mondiale di feldspato è stata pari a 34,3 milioni di tonnellate, in crescita rispetto agli anni precedenti. L'Europa consuma 9,8 milioni di tonnellate di feldspato, corrispondente a circa il 29% della produzione mondiale e dipende quasi esclusivamente dall'estero. Il 68% delle importazioni proviene dalla Turchia e un 26% dai Paesi europei, tra cui la Norvegia e l'Italia. In questo scenario, l'Italia rappresenta il 6% della produzione globale ed è il principale produttore europeo, con circa 2,2 milioni di tonnellate estratte.

Tabella 2 – Offerta e domanda di feldspato (estrazione), 2025

<i>Produzione globale</i>	Produttori globali	Consumo UE⁸	Quota UE	Fornitori UE
34,2 Mt	Turchia 28% India 18% Iran 12% Cina 7% Italia 6%	9,8 Mt	29%	Turchia 68% Paesi UE 26%

Fonte: Elaborazione Utilitatis su dati World Mining Data and UE⁹

Anche per quanto riguarda la fluorite, l'Italia presenta una buona produzione nazionale, inferiore rispetto a quella di Spagna, Germania e Francia, ma comunque significativa nel quadro continentale. In prospettiva, particolare attenzione merita la miniera di Genna Tres Montis, nel Sud Sardegna, che, una volta completati gli interventi di ristrutturazione e ripristinata la piena operatività, potrebbe tornare a rappresentare uno dei più importanti siti europei per questa materia prima. Se si considera inoltre il patrimonio minerario storico, emerge un potenziale più ampio: in passato erano attive nel Paese numerose altre miniere di fluorite, localizzate in particolare nel bergamasco, nel bresciano, in Trentino, oltre che in Sardegna e nel Lazio¹⁰. Alla luce della crescita della domanda e del rialzo dei prezzi di mercato, questi siti potrebbero essere oggetto di nuove valutazioni economiche e strategiche.

Accanto a feldspato e fluorite, il posizionamento italiano nelle filiere delle materie prime critiche presenta elementi di interesse anche per palladio e platino, sebbene in forme diverse rispetto all'estrazione primaria. Per il palladio, l'Italia compare tra i Paesi che presentano una quota economicamente rilevante di esportazioni di questo metallo rispetto alle esportazioni complessive, segnale di un inserimento non trascurabile nella filiera commerciale e industriale del materiale. Per i metalli del gruppo del platino, la filiera europea risulta complessa e di difficile quantificazione, poiché combina fonti primarie e secondarie. Una parte consistente delle importazioni entra nell'Unione sotto forma di materiali già concentrati o parzialmente raffinati, mentre le successive fasi di raffinazione vengono svolte nei Paesi europei, tra cui l'Italia, le cui competenze industriali e la capacità di trattamento e raffinazione lungo la catena del valore rappresentano un vantaggio importante.

⁸ I dati sul consumo di feldspato si riferiscono al 2020, ultimo anno disponibile.

⁹ https://screen.eu/wp-content/uploads/2023/08/SCRREEN2_factsheets_FELDSPAR-1.pdf

¹⁰ <https://www.isprambiente.gov.it/files2024/area-stampa/comunicati-stampa/comunicato-stampa-materie-prime.pdf>

Tabella 3 – Paesi con la quota economica più elevata di esportazioni di palladio sul totale delle esportazioni (primi 10 Paesi)

<i>Paese</i>	Valore export (miliardi di dollari)	Quota sul totale export (%)
<i>Sud Africa</i>	0,49	26%
<i>Germania</i>	0,47	25%
<i>Svizzera</i>	0,31	16%
<i>Canada</i>	0,21	11%
<i>UK</i>	0,12	7%
<i>USA</i>	0,10	5%
<i>Giappone</i>	0,05	3%
<i>Cina</i>	0,03	2%
Italia	0,02	1%
<i>Spagna</i>	0,01	1%

Fonte: World Integrated Trade Solution (WITS)¹¹

Al di fuori di queste filiere, la situazione italiana appare più debole sul fronte dei minerali metalliferi, che comprendono una parte rilevante delle materie prime critiche europee. Sebbene in passato l'estrazione di minerali metalliferi abbia interessato circa 900 siti sul territorio nazionale, tale attività è oggi sostanzialmente assente. L'Italia non estrae attualmente Critical Raw Materials metallici e dipende pertanto quasi totalmente dai mercati esteri per il loro approvvigionamento. Tuttavia, i permessi di ricerca in essere, le evidenze relative alle miniere storiche e i risultati delle attività esplorative, sia pregresse sia recenti, documentano la possibile presenza di ulteriori materie prime critiche e strategiche.

Tra queste figurano il rame, noto nelle Colline Metallifere toscane, nell'Appennino ligure-emiliano, nelle Alpi occidentali, in Trentino, in Carnia e in Sardegna; il manganese, presente soprattutto in Liguria e Toscana; il tungsteno, documentato in Calabria, Sardegna e Alpi centro-orientali; il cobalto, segnalato in Sardegna e Piemonte, dove il deposito di Punta Corna è considerato di interesse strategico europeo; la magnesite in Toscana e i sali magnesiaci nelle Prealpi venete; il titanio nel savonese; nonché la bauxite, localizzata nell'Appennino centrale, in Puglia e soprattutto nella Nurra, in Sardegna.

Un caso di particolare interesse è rappresentato dal litio, la cui presenza è nota sia nelle pegmatiti dell'Isola d'Elba, del Giglio e dell'area di Vipiteno, sia, più recentemente, nei fluidi geotermici dell'area toscano-laziale-campana. Proprio quest'ultima evidenza apre prospettive potenzialmente significative, anche in termini di tecniche estrattive a minore impatto ambientale. Più in generale, l'insieme dei dati disponibili suggerisce che il patrimonio minerario nazionale, pur oggi scarsamente valorizzato, possa ancora offrire margini di rivalutazione alla luce dell'evoluzione delle tecniche di esplorazione, dell'aumento dei prezzi delle commodity e della crescente centralità geopolitica delle materie prime critiche.

Accanto ai giacimenti primari, un ambito di crescente interesse è rappresentato dai rifiuti estrattivi, che in Italia ammontano a circa 150 milioni di metri cubi di scarti di lavorazione accumulati nel corso delle pregresse attività minerarie. Tali depositi, spesso collocati in strutture obsolete o degradate, costituiscono oggi un rilevante problema

¹¹<https://wits.worldbank.org/trade/comtrade/en/country/ALL/year/2024/tradeflow/Exports/partner/WLD/product/711029#>

ambientale, in quanto possono determinare contaminazione delle acque superficiali e sotterranee e dei suoli da metalli pesanti. Allo stesso tempo, questi stessi materiali possono contenere risorse potenzialmente recuperabili, rendendo necessario un cambio di paradigma: da passività ambientali da bonificare a possibili fonti secondarie di approvvigionamento.

In questo quadro, il rinnovato interesse europeo per le materie prime critiche contribuisce a riportare al centro del dibattito il tema dell'approvvigionamento minerario e della sicurezza delle filiere. Tuttavia, per un Paese come l'Italia, una strategia efficace non può fondarsi esclusivamente sulla possibile riattivazione o apertura di siti estrattivi. Se da un lato la presenza di giacimenti noti, di miniere storiche e di competenze industriali lungo alcune filiere rappresenta un patrimonio strategico da non trascurare, dall'altro i tempi lunghi, la complessità autorizzativa e le rilevanti criticità ambientali e sociali che accompagnano i progetti minerari ne limitano il contributo nel breve e medio periodo.

2.2 Domanda di MPC e Strategiche in Italia

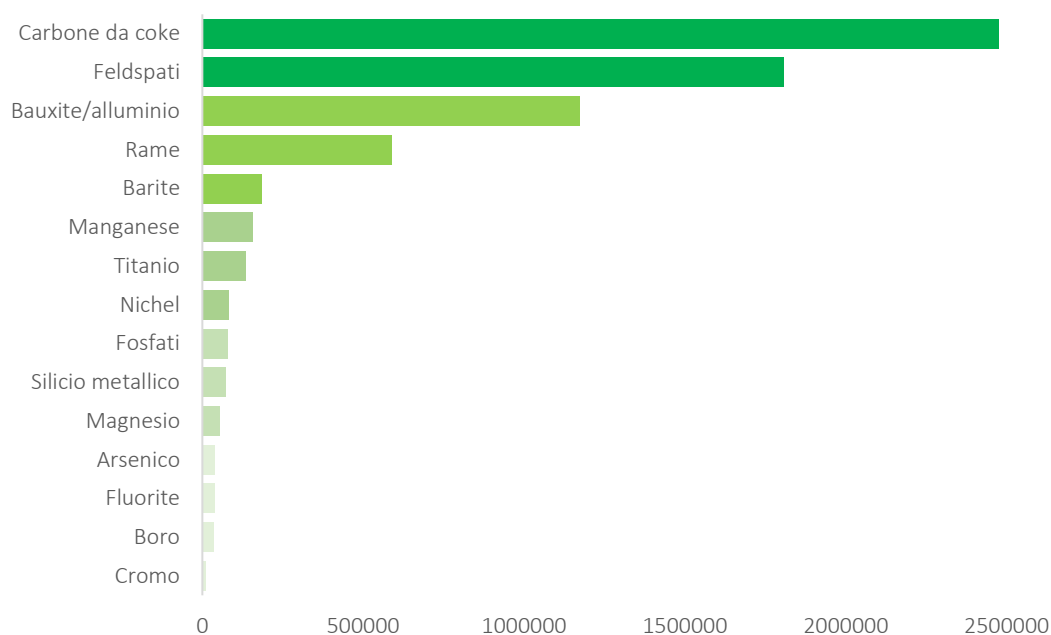
Attualmente la domanda di materie prime critiche e strategiche dell'Italia risulta particolarmente rilevante e legata alla dipendenza da paesi Extra-UE. Inoltre, si stima che nel 2040, il fabbisogno italiano di materie prime strategiche per le tecnologie chiave è destinato a crescere in media tra le tre e le cinque volte rispetto al 2020, soprattutto per l'aumento delle unità richieste e lo sviluppo di tecnologie più efficienti¹².

In particolare, la domanda italiana di materie prime critiche può essere ricostruita, attraverso l'osservazione dei flussi commerciali, assumendo le importazioni nette come indicatore del fabbisogno espresso dal sistema economico nazionale. In questa prospettiva, il saldo tra importazioni ed esportazioni consente di individuare i materiali per i quali l'Italia presenta il maggiore assorbimento netto dall'estero e, quindi, una più marcata esigenza di approvvigionamento sui mercati internazionali.

I risultati dell'elaborazione evidenziano, sotto il profilo quantitativo, una forte concentrazione della domanda su un numero limitato di materie prime. Il saldo fisico più elevato riguarda il carbone da coke, con un valore prossimo a 2,48 milioni di tonnellate, seguito dai feldspati, con circa 1,81 milioni di tonnellate, dalla bauxite/alluminio, con circa 1,17 milioni di tonnellate, e dal rame, con un saldo pari a circa 588 mila tonnellate. Già questi primi valori mostrano con chiarezza come il fabbisogno italiano si concentri su materiali strettamente connessi alla base industriale del Paese e a filiere produttive ad elevata intensità materiale.

¹² The European House Ambrosetti, 2024 – La Road Map Italiana per le Materie Prime Critiche

Figura 10 - Saldo fisico import/export delle MPC e MPS in Italia¹³



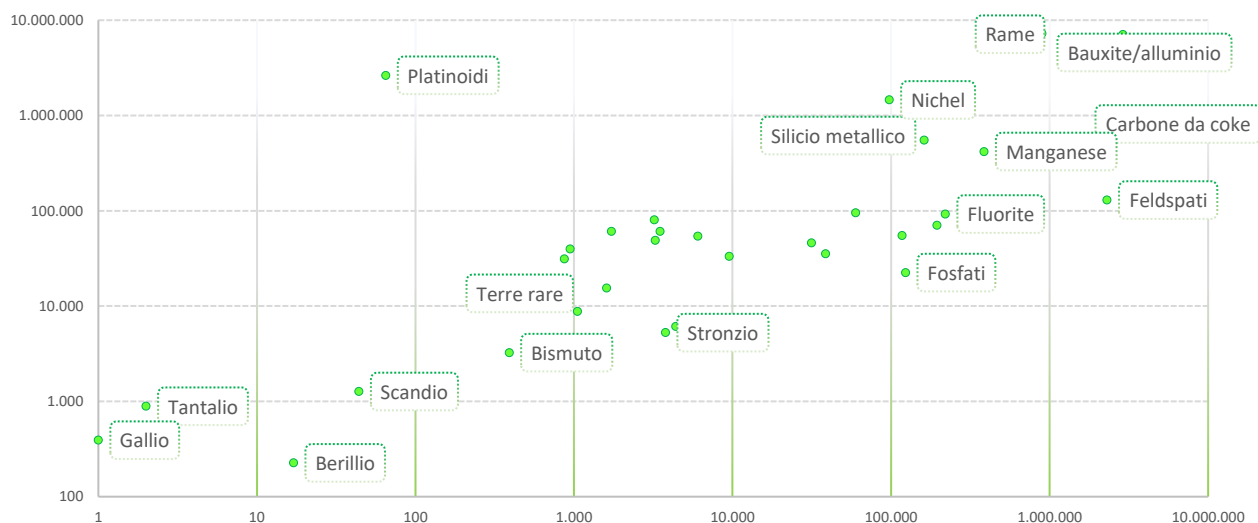
Fonte: Elaborazione Utilitatis su dati CRIET e Lab24 - il sole 24 Ore

Accanto a queste voci principali, emergono poi una serie di materiali caratterizzati da saldi fisici positivi più contenuti ma comunque rilevanti, tra cui barite, manganese, titanio, nichel, fosfati, silicio metallico, magnesio, arsenico, fluorite, boro e cromo. Pur presentando dimensioni inferiori rispetto ai primi materiali della graduatoria, tali flussi contribuiscono a delineare un quadro di domanda articolato, nel quale convivono input destinati a impieghi manifatturieri diffusi e materie prime di maggiore specializzazione industriale. Nel complesso, la distribuzione dei saldi fisici suggerisce che il fabbisogno nazionale non si esaurisce nelle sole materie tradizionalmente associate alla produzione di base, ma interessa anche materiali funzionali a comparti a più elevato contenuto tecnologico e a segmenti produttivi strategici.

La lettura dei dati in valore economico consente di integrare questo quadro e di qualificare ulteriormente la struttura della domanda. Sotto tale profilo, il materiale che presenta il maggiore peso è il rame, con importazioni pari a circa 7,26 miliardi di euro a fronte di esportazioni pari a circa 2,45 miliardi di euro. Si tratta di un dato particolarmente significativo, in quanto conferma la centralità del rame per il sistema produttivo nazionale e, al tempo stesso, il rilievo economico del relativo fabbisogno di approvvigionamento. Molto elevati risultano anche i valori riferiti alla bauxite/alluminio, che registra circa 7,07 miliardi di euro di importazioni e 6,71 miliardi di euro di esportazioni: un risultato che segnala l'esistenza di flussi molto consistenti in entrambe le direzioni e riflette il ruolo di questa materia prima all'interno di una filiera industriale strutturata e integrata con i mercati esteri.

¹³ Il grafico mostra solamente i primi 16 materiali.

Figura 11 - Domanda italiana di materie prime critiche - confronto tra importazioni in tonnellate e in valore



Fonte: Elaborazione Utilitatis su dati CRIET e Lab24 - il sole 24 Ore

Di particolare interesse sono inoltre i platinoidi, per i quali si osservano valori economici molto elevati, a fronte di quantitativi fisici modesti. Questo elemento segnala con evidenza come, nell'analisi della domanda di materie prime critiche, la dimensione quantitativa non esaurisca la rilevanza del fenomeno: accanto ai materiali che pesano soprattutto per volumi, ve ne sono altri la cui importanza dipende principalmente dal loro elevato valore unitario e dalla funzione che svolgono in applicazioni industriali avanzate. Nella stessa direzione si collocano anche nichel, silicio metallico, titanio, manganese e, in misura diversa, cobalto, che presentano saldi economici positivi o comunque flussi in entrata di rilievo, a conferma del loro peso nelle catene del valore legate alla manifattura, alla metallurgia avanzata, all'elettrificazione e ai processi di trasformazione industriale.

Considerando congiuntamente le due dimensioni, fisica ed economica, emerge quindi una struttura della domanda italiana articolata su due piani. Da un lato si collocano le materie prime per cui il fabbisogno nazionale si manifesta soprattutto in termini di grandi volumi importati, come nel caso del carbone da coke, dei feldspati, della bauxite/alluminio e del rame; dall'altro lato si individuano materiali per i quali la rilevanza della domanda appare connessa soprattutto al peso economico, al valore unitario e alla funzione strategica svolta nei processi produttivi. Questa distinzione consente di leggere in modo più completo il profilo della domanda italiana, evitando di ridurre il fenomeno a una sola dimensione quantitativa.

Nel complesso, i risultati confermano che il sistema economico italiano esprime un fabbisogno significativo di approvvigionamento dall'estero per un insieme ampio e differenziato di materie prime. Tale fabbisogno riflette sia la struttura industriale del Paese, ancora fortemente ancorata a filiere manifatturiere e di trasformazione ad alta intensità materiale, sia la crescente rilevanza di input essenziali per comparti più innovativi e strategici. In questa prospettiva, l'analisi dei flussi commerciali restituisce una prima rappresentazione della domanda nazionale di materie prime critiche, utile a individuare i materiali maggiormente assorbiti dal sistema produttivo italiano e a mettere in evidenza le aree nelle quali il ricorso ai mercati esteri appare più rilevante.

CAPITOLO 3

**Urban mining e riciclo come leva
strategica**

CAPITOLO 3 - Urban mining e riciclo come leva strategica

La transizione ecologica e digitale sta determinando una crescita strutturale della domanda di materie prime critiche che, come evidenziato nei capitoli precedenti, non può essere soddisfatta attraverso la sola offerta primaria. Né a livello europeo né a livello nazionale esistono oggi le condizioni per rispondere attraverso l'estrazione interna a una domanda in rapida espansione, caratterizzata da concentrazione geografica dell'offerta, rischi geopolitici crescenti e tempi di sviluppo minerario incompatibili con le scadenze della transizione. In questo contesto, urban mining e riciclo assumono un ruolo strategico e complementare, che va ben oltre la dimensione ambientale: il recupero di materiali da rifiuti tecnologici, residui industriali e prodotti a fine vita rappresenta una componente sempre più rilevante di una politica delle risorse orientata alla resilienza, alla circolarità e all'autonomia strategica.

Il quadro normativo europeo ha recepito questa prospettiva in modo esplicito. Il Regolamento (UE) 2024/1252 — Critical Raw Materials Act — fissa tra i propri benchmark quantitativi al 2030 l'obiettivo di coprire almeno il 25% del consumo annuo di materie prime strategiche attraverso il riciclo, riconoscendo le fonti secondarie come pilastro strutturale dell'approvvigionamento europeo. Analogamente, il Clean Industrial Deal e il Net-Zero Industry Act richiamano la centralità della circolarità e dell'urban mining nella costruzione di una filiera industriale europea competitiva e resiliente. Tuttavia, il contributo effettivo del riciclo resta oggi limitato per la maggior parte delle materie prime critiche: il tasso di riciclo delle terre rare non supera il 5% a livello globale, mentre per molti altri materiali strategici le infrastrutture di recupero sono ancora frammentate, sottodimensionate o dipendenti dalla disponibilità di impianti di raffinazione, separazione e processing localizzati fuori dall'Unione europea.

Questa distanza tra potenziale teorico e realizzazione concreta riflette la presenza di barriere strutturali di natura tecnologica, economica e organizzativa. Sul piano tecnologico, i processi di separazione e affinazione di molte materie prime critiche sono complessi, energeticamente intensivi e richiedono investimenti significativi in ricerca e sviluppo. Sul piano economico, la volatilità dei prezzi delle materie prime primarie rende spesso difficile la competitività delle fonti secondarie in assenza di adeguati strumenti di supporto. Sul piano organizzativo, la tracciabilità dei materiali lungo le catene del valore, la qualità e la purezza dei flussi di rifiuti e la disponibilità di infrastrutture di raccolta capillari rappresentano condizioni abilitanti ancora non pienamente soddisfatte, in Italia come nel resto d'Europa.

Nonostante queste criticità, negli ultimi anni si sono moltiplicati segnali concreti di avanzamento. Nuovi impianti industriali, progetti di ricerca applicata e sperimentazioni su scala pilota stanno dimostrando la fattibilità tecnica ed economica del recupero di materie prime critiche da diversi flussi di rifiuti, contribuendo a delineare un modello di filiera circolare che può rafforzare la resilienza degli approvvigionamenti nazionali ed europei. Il presente capitolo illustra tre ambiti applicativi nei quali urban mining e riciclo mostrano un potenziale particolarmente rilevante per il contesto italiano: il recupero di metalli critici dai rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE), lo sviluppo di tecnologie alternative e di riciclo per i magneti permanenti a terre rare impiegati nelle turbine eoliche, e il recupero del fosforo dai processi depurativi urbani attraverso il progetto NEOFOS.

3.1 Rifiuti come giacimento urbano e potenziale di recupero di materie prime critiche dai RAEE domestici

I rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche costituiscono uno dei flussi secondari più rilevanti per il recupero di materie prime critiche e rappresentano l'esempio più emblematico del concetto di "miniera urbana". Un dispositivo elettronico moderno può contenere oltre 60 elementi della tavola periodica: metalli preziosi come oro, argento e palladio; metalli di specialità come rame, alluminio, nichel, stagno, indio e antimonio; materie prime critiche quali terre rare, cobalto e litio. Si stima che ogni cittadino europeo generi mediamente circa 18,3 kg di rifiuti hi-tech all'anno, per un flusso complessivo a livello globale stimato in circa 55 milioni di tonnellate annue. La maggior parte di questo flusso non viene tuttavia trattata attraverso filiere tracciate e tecnologicamente avanzate, determinando una perdita significativa di risorse strategiche.

In Italia, il sistema nazionale di raccolta dei RAEE è articolato secondo i cinque raggruppamenti previsti dalla disciplina vigente e coordinato dal Centro di Coordinamento RAEE, che qualifica gli impianti di trattamento sulla base delle Specifiche Tecniche derivanti dalle norme Cenelec. Al 31 dicembre 2024 risultano certificati 50 impianti di trattamento, a copertura di tutti i raggruppamenti raccolti. I dati più recenti indicano una crescita complessiva della raccolta pari al +2,4% rispetto al 2024, con una distribuzione dei flussi fortemente concentrata sui raggruppamenti R1 (apparecchiature per lo scambio di temperatura, prevalentemente frigoriferi per il 91%) e R2 (altri grandi bianchi, con lavatrici, lavasciuga e lavastoviglie pari a circa l'80%), che insieme rappresentano circa il 65% del totale raccolto. Il raggruppamento R4 — che include IT, elettronica di consumo e piccoli elettrodomestici — si conferma il più eterogeneo, con una presenza significativa di stampanti e fotocopiatrici (17%), apparecchiature per uso domestico (27%), dispositivi per l'intrattenimento (11%) e per la cura della persona (4%), mentre solo il 4,5% è rappresentato da PC e ICT.

Un elemento di crescente rilevanza gestionale e strategica riguarda la diffusione di apparecchiature alimentate da batterie al litio integrate, la cui presenza nei flussi di R4 è stimata al 9,6% del totale raccolto. Questa categoria richiede un approccio specifico sotto il profilo della sicurezza operativa e della conformità normativa, ma rappresenta al tempo stesso una fonte potenzialmente interessante di materiali critici — in particolare cobalto, grafite, rame e alluminio — la cui valorizzazione è oggi ancora limitata dalla difficoltà di gestione e dalla frammentazione delle filiere di trattamento.

Per quanto riguarda il potenziale di recupero di materie prime critiche, l'analisi dei contenuti medi delle diverse categorie di RAEE evidenzia un quadro differenziato. Il rame rappresenta la principale materia prima critica recuperabile in termini quantitativi, con concentrazioni medie stimate tra il 2% e il 3% su tutti i raggruppamenti e un potenziale di recupero, ipotizzando un tasso di raccolta pari al 100% dell'immesso, compreso tra 20.000 e 30.000 tonnellate annue. Per altri materiali critici le concentrazioni medie risultano significativamente più basse: il nichel è presente in valori dell'ordine dello 0,01-0,02% in peso, con un potenziale stimato tra 100 e 200 tonnellate annue; cobalto, manganese e terre rare presentano valori ancora più contenuti, rendendo il loro recupero come obiettivo primario economicamente difficile in assenza di processi di trattamento avanzati e di economie di scala adeguate.

Ne deriva che, allo stato attuale, il contributo potenziale dei RAEE domestici alla copertura del fabbisogno nazionale di materie prime critiche appare quantitativamente significativo solo per il rame, mentre per la maggior parte degli altri materiali il recupero dai RAEE assume rilievo più come sottoprodotto di filiere già esistenti che come fonte autonoma di approvvigionamento. Questa valutazione non riduce tuttavia l'importanza strategica del settore: con l'aumento della raccolta e con la diffusione di apparecchiature tecnologicamente più avanzate — contenenti quantità più elevate di MPC — il potenziale di recupero è destinato a crescere, a condizione che si investa nella qualità della raccolta, nella specializzazione degli impianti di trattamento e nello sviluppo di tecnologie di separazione più efficienti¹⁴.

In questa direzione si inserisce un segnale significativo a livello nazionale: il primo impianto italiano per il recupero idrometallurgico di metalli preziosi da RAEE, entrato a regime nel gennaio 2026 nel Valdarno aretino, dimostra la fattibilità industriale di un modello di trattamento alternativo a quello pirometallurgico tradizionale, caratterizzato da maggiore selettività nel recupero di oro, argento e palladio, minori consumi energetici, ridotta impronta di CO₂ e integrazione nel tessuto industriale locale. La struttura, con una capacità di trattamento di circa 315 tonnellate annue di schede elettroniche, consente di recuperare ogni anno circa 40-50 kg di oro, 90-100 kg di argento, 15-20 kg di palladio e circa 40 tonnellate di rame, con concentrazioni medie di metalli preziosi nei materiali trattati comprese tra 400 e 700 grammi per tonnellata — valori significativamente superiori a quelli di molti giacimenti minerari primari. I dettagli tecnici dell'impianto e il confronto con il modello pirometallurgico tradizionale sono riportati nell'Appendice D.

3.2 Materiali e processi innovativi per i magneti delle turbine eoliche

I magneti permanenti a base di terre rare costituiscono uno dei principali colli di bottiglia della catena di approvvigionamento per il settore dell'energia eolica. Come illustrato nel Capitolo 1, la produzione di terre rare è fortemente concentrata in Cina, che controlla circa il 70% dell'estrazione globale e quasi il 90% della raffinazione, determinando una dipendenza strutturale dell'Unione europea che si traduce in vulnerabilità significative di fronte a restrizioni all'export, volatilità dei prezzi e tensioni geopolitiche. Un magnete permanente medio impiegato nelle turbine eoliche contiene il 28,5% di neodimio, il 4,4% di disprosio e l'1% di boro, per un peso complessivo fino a 4 tonnellate per generatore, e la domanda di questi materiali è destinata a crescere in modo significativo con l'espansione della capacità eolica installata prevista al 2030 e al 2050, sia nello scenario a bassa che nell'alto scenario definiti dal JRC.

La ricerca scientifica e industriale si muove su due direttrici principali per ridurre questa dipendenza. La prima riguarda lo sviluppo di materiali alternativi alle terre rare nei magneti permanenti. I magneti ferritici — basati su ossidi di ferro combinati con bario o stronzio — rappresentano la soluzione attualmente più matura e disponibile su scala industriale: sono privi di terre rare, utilizzano materie prime abbondanti e a basso costo, offrono buona stabilità chimica e resistenza alla corrosione, e presentano impatti ambientali di produzione inferiori rispetto alle filiere delle terre rare. Il loro limite principale risiede nelle prestazioni magnetiche significativamente inferiori rispetto ai magneti NdFeB — in particolare in termini di densità di energia magnetica (1-5 MGOe contro 30-50 MGOe) e coercitività — il che si traduce in magneti più grandi e pesanti a

¹⁴ Per maggiori dettagli sui RAEE e il recupero di materie prime critiche si rimanda all'Appendice C

parità di potenza generata. Questo li rende già competitivi nelle applicazioni a bassa-media intensità magnetica, come motori di elettrodomestici e sistemi ausiliari, ma ancora limitati nelle applicazioni ad alta densità di potenza come i generatori eolici di grande taglia. La ricerca attuale si concentra sul miglioramento delle prestazioni magnetiche delle ferriti e sull'ottimizzazione del design dei motori per ampliare il numero di applicazioni compatibili.

La seconda direttrice riguarda la riduzione del consumo di terre rare attraverso innovazioni di processo e il riciclo diretto dei magneti a fine vita. La manifattura additiva — stampa tridimensionale basata sulla deposizione strato per strato di polveri magnetiche o compositi polimero-magnetici contenenti particelle di NdFeB — offre prospettive interessanti per la produzione di magneti permanenti con geometrie complesse, riduzione degli scarti di materiale critico, eliminazione di fasi di lavorazione e flessibilità progettuale non ottenibile con i metodi convenzionali di sinterizzazione. Il processo consente di realizzare componenti near-net shape, utilizzando solo la quantità di polvere necessaria, con un vantaggio particolarmente rilevante per elementi ad alto valore unitario come il neodimio e il disprosio. L'integrazione della manifattura additiva con materiali riciclati o polveri recuperate da magneti a fine vita rappresenta inoltre una prospettiva di interesse per la sostenibilità e la circolarità della filiera.

Sul fronte del riciclo, l'approccio magnet-to-magnet — che prevede il recupero delle terre rare dai magneti a fine vita senza completa separazione chimica, con rifabbricazione diretta di nuovi magneti — consente di ridurre il numero di passaggi di processo e migliorare la resa complessiva rispetto ai processi idrometallurgici tradizionali. Il tasso di riciclo attuale delle terre rare a livello globale è inferiore al 5% dell'approvvigionamento complessivo, con ampi margini di crescita condizionati però da barriere strutturali: la difficoltà di tracciabilità dei magneti nei prodotti complessi, la scarsa qualità e purezza dei flussi di rifiuti, la complessità della separazione di leghe multicomponente e i costi elevati delle tecnologie di affinazione. Lo sviluppo del design for recycling — la progettazione di prodotti facilmente smontabili e con magneti separabili — e il miglioramento dei sistemi di raccolta e tracciabilità dei flussi rappresentano condizioni abilitanti per lo scaling industriale del riciclo delle terre rare in Europa. In questo ambito, ENEA — attraverso il Dipartimento SSPT — mette a disposizione un patrimonio consolidato di competenze che copre l'intera catena del valore, dallo sviluppo di nuovi materiali e processi produttivi innovativi fino alla progettazione sostenibile dei componenti e all'implementazione di strategie di economia circolare. I dettagli tecnici, le caratteristiche comparative dei diversi tipi di magneti e le attività di ricerca in corso sono riportati nell'Appendice B.

3.3 NEOFOS: un approccio integrato per la rimozione e il recupero del fosforo

Il fosforo è una materia prima critica di importanza strategica per l'agricoltura, l'industria dei fertilizzanti e la produzione di componenti avanzati come le batterie litio-ferro-fosfato. A differenza di molte altre MPC, il fosforo non è sostituibile nelle sue funzioni biologiche fondamentali per la nutrizione delle piante, rendendo la sicurezza del suo approvvigionamento una questione che intreccia dimensione industriale e alimentare. L'Unione europea non dispone di giacimenti primari significativi e dipende per oltre l'85% da importazioni extra-UE, principalmente da Marocco e Cina. Questa forte dipendenza, unita alla crescente domanda globale e alle tensioni geopolitiche, ha portato l'UE a classificare il fosforo come materia prima critica, inserendolo nell'elenco del CRMA.

Parallelamente, la nuova Direttiva sulle acque reflue urbane (2024/3019) introduce limiti allo scarico più severi per azoto e fosforo, rafforzando gli obblighi per il controllo dei nutrienti e introducendo l'obbligo di trattamento terziario per tutti gli impianti con un carico pari o superiore a 150.000 abitanti equivalenti. Il risultato è un quadro regolatorio che chiede ai gestori del ciclo idrico di fare di più con meno: ridurre l'uso di reagenti chimici, migliorare la performance depurativa e, al tempo stesso, generare risorse valorizzabili. Il Regolamento (UE) 2019/1009, che apre all'impiego di fertilizzanti derivati da processi di recupero, completa questo scenario normativo, creando le condizioni affinché il fosforo recuperato dagli impianti di depurazione possa trovare sbocco nel mercato agricolo come fertilizzante certificato.

È in questo contesto che si inserisce il progetto NEOFOS, finanziato nell'ambito del bando MASE "Materie Prime Critiche — Urban Mining" con un budget complessivo di 1.454.012,50 euro. Il progetto propone un approccio olistico e integrato al recupero del fosforo dai processi depurativi urbani, agendo su tre matrici distinte: acque reflue, fanghi di depurazione e ceneri di monoincenerimento. Il partenariato, coordinato da Gruppo CAP nel ruolo di capofila, coinvolge MM S.p.A., il Politecnico di Milano e l'Università di Bologna, unendo competenze di gestione impiantistica, ingegneria di processo, modellazione avanzata e analisi di sostenibilità.

Sul fronte delle acque reflue e dei fanghi, il progetto sviluppa e testa il processo S2EBPR (Side-Stream Enhanced Biological Phosphorus Removal), che consente di introdurre la rimozione biologica avanzata del fosforo anche in impianti originariamente non predisposti, con il vantaggio aggiuntivo di ridurre la produzione di fanghi biologici di supero. Il sistema, già installato in forma dimostrativa presso l'impianto di Bareggio del Gruppo CAP e in fase di validazione pilota presso l'impianto di Milano Nosedo gestito da MM, si basa sull'utilizzo di acidi grassi volatili (VFA) prodotti per via fermentativa come substrato per i microrganismi fosforo-accumulanti. Il fosforo così concentrato nei fanghi viene poi recuperato sotto forma di sali di fosfato ad alto valore attraverso un processo di precipitazione controllata presso l'impianto dimostrativo di Sesto San Giovanni, con l'obiettivo di produrre un materiale conforme alla categoria CM12 del Regolamento (UE) 2019/1009 e quindi direttamente commercializzabile come fertilizzante. Il processo consente potenzialmente di ridurre l'uso di reagenti chimici del 25-50% rispetto ai metodi di rimozione chimica tradizionali.

Sul fronte delle ceneri di monoincenerimento — matrici nelle quali il fosforo è presente in forma altamente concentrata — l'Università di Bologna coordina lo sviluppo di un processo innovativo che combina lisciviazione acida e scambio ionico. La fase di lisciviazione trasferisce il fosforo in soluzione, mentre lo scambio ionico consente di rimuovere selettivamente i metalli indesiderati e di rigenerare l'acido impiegato, riducendo drasticamente i consumi di reagenti e i volumi di rifiuto prodotti. L'obiettivo di NEOFOS è dimostrare la competitività economica del processo con un consumo di acido inferiore a 5 litri per kg di fosforo recuperato, aprendo la strada a una filiera industriale scalabile e replicabile.

A supporto di tutte le linee sperimentali, il Politecnico di Milano sviluppa modelli dinamici a scala di impianto che simulano il comportamento dei processi biologici in differenti condizioni operative, consentendo di ridurre i tempi di sperimentazione, prevedere gli effetti delle modifiche di processo e supportare le decisioni operative e di

investimento. La digitalizzazione, integrata attraverso sensori e sistemi di monitoraggio continuo, abilita una gestione sempre più automatizzata e ottimizzata degli impianti. Gli studi LCA e analisi costi-benefici condotti da Università di Bologna e Gruppo CAP completano il quadro valutativo, quantificando l'impronta ambientale e la sostenibilità economica delle soluzioni proposte in confronto alle alternative tradizionali e stimando il potenziale di industrializzazione, scalabilità e replicabilità su scala metropolitana, come delineato nel Masterplan sviluppato con MM e Politecnico di Milano.

NEOFOS rappresenta un esempio concreto di come gli impianti di depurazione possano evolvere da infrastrutture di trattamento dei rifiuti a veri e propri produttori di materie prime seconde strategiche, contribuendo simultaneamente alla riduzione della dipendenza dalle importazioni di fosforo, al rispetto dei nuovi obblighi normativi europei e alla costruzione di un ciclo idrico realmente circolare. I dettagli tecnici dei processi, la descrizione degli impianti dimostrativi e i risultati sperimentali sono riportati integralmente nell'Appendice E.

APPENDICE

APPENDICE

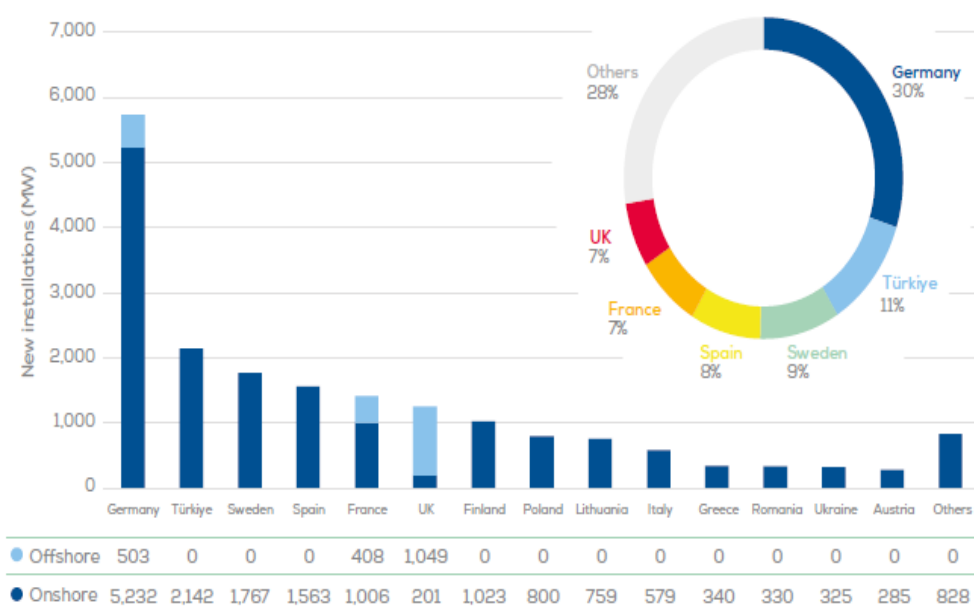
APPENDICE A – Evoluzione degli impianti eolici

L'energia è al centro della sfida per la competitività dell'Europa. L'UE ha come obiettivo il raggiungimento di una quota di energia rinnovabile pari almeno al 42,5% del consumo complessivo entro il 2030, con l'ambizione di arrivare fino al 45%, nel rispetto della direttiva rivista sulle energie rinnovabili (RED III, Direttiva UE 2023/2413), recepita in Italia dal D.Lgs. 5/2026 che impone di raggiungere una quota del 39,4% sui consumi finali.

In questo scenario, l'energia eolica riveste un ruolo cruciale: nel 2025 ha coperto il 19% della domanda totale di elettricità, con quote significative in Danimarca (50%), Lituania (33%), Irlanda (33%), Regno Unito (31%) e Svezia (30%). L'Europa dispone attualmente di una capacità eolica totale installata pari a 304 GW, di cui 265 GW onshore e 39 GW offshore (impianti in mare), di cui i 2/3 concentrati in soli sei Paesi. Le previsioni per il quinquennio 2026-2030 sono di installare ulteriori 151 GW di nuova energia eolica (mediamente 30 GW all'anno), di cui circa il 77% onshore. Nell'ultimo anno sono stati, infatti, installati 19,1 GW di nuova capacità eolica, di cui circa il 90% sulla terraferma (impianti onshore), soprattutto in Germania, Turchia e Svezia. I principali limiti alla diffusione dell'energia eolica sono rappresentati dai colli di bottiglia della rete, dalle difficoltà nell'ottenere i permessi in molti Paesi e da una crescita della domanda di elettricità inferiore alle aspettative.

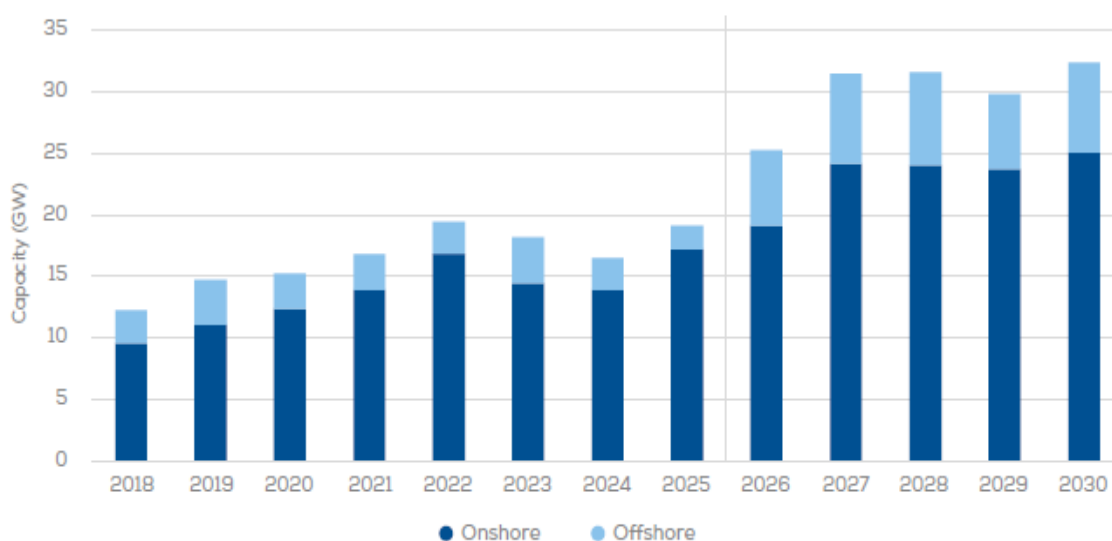
L'Italia nel 2025 ha installato 579 MW di capacità eolica onshore (15% in meno rispetto al 2024) con una potenza media delle turbine di nuova installazione pari a 4,9 MW (rispetto ai 4,1 MW del 2024) e una previsione di installare 4 GW di capacità eolica onshore tra il 2026 e il 2030, portando la capacità installata totale a 17 GW. Tale valore rimane comunque notevolmente al di sotto dell'obiettivo nazionale dei 26 GW entro il 2030. Il principale limite è ancora rappresentato dalle procedure di ottenimento dei permessi, dall'esclusione di ampie porzioni di territorio dallo sviluppo dell'energia eolica e dalle lunghe liste d'attesa per le connessioni alla rete.

Figura 12 – Nuove installazioni eoliche europee nel 2025



Fonte: Wind Europe

Figura 13 – Previsione nuove installazioni eoliche europee fino al 2030



Fonte: Wind Europe

Gli impianti eolici possono essere raggruppati in quattro categorie principali in base alla potenza, che dipende principalmente dalla dimensione del rotore della turbina, poiché l'energia catturata deriva dall'area spazzata dalle pale:

- Microeolico (fino a 1-5 kW): il diametro del rotore è compreso generalmente tra 0,5 e 3 metri, è utilizzato per camper, imbarcazioni o piccoli usi domestici;
- Minieolico (da 20 a 200 kW): i rotori hanno dimensioni comprese tra 3 e 20 metri, è adatto per gli impianti di piccola taglia che, grazie alle ridotte dimensioni, possono essere installati in aree abitate oppure nelle loro immediate vicinanze. Sono impianti principalmente dedicati al servizio di industrie, aziende agricole, edifici o comunità isolate, utilizzati singolarmente in sistemi che prevedono una qualche forma di accumulo energetico o l'integrazione con altre forme primarie di energia (ad es. sistemi fotovoltaici)
- Media taglia (da 200 kW a 1 MW): rotori tra 20 e 50 metri di diametro, sono impianti per comunità o medie imprese;
- Grande eolico (oltre 1 MW): il diametro del rotore parte da 90 metri e può superare i 150-200 metri per i modelli più potenti (oltre 10 MW), viene installato su torri che possono raggiungere un'altezza complessiva superiore ai 100 metri. Tali turbine sono spesso aggregate in grandi parchi eolici (wind farm) e sono tipicamente installate in aree remote, sulla terraferma (impianti onshore) oppure sul mare (impianti offshore), e direttamente collegate con la rete di distribuzione elettrica.

La scala Technology Readiness Level (TRL) è lo strumento che consente di misurare il grado di maturità di una tecnologia durante il suo sviluppo, cioè quanto sia pronta per essere usata in modo efficace e sicuro. Il TRL si articola su una scala di nove livelli, che rappresentano le diverse fasi di sviluppo di una tecnologia, dallo studio teorico alla sperimentazione pratica, fino all'impiego operativo. Ogni livello di TRL corrisponde a dei requisiti specifici che devono essere soddisfatti per passare al livello successivo ed è fondamentale per definire il passaggio dalla ricerca al mercato, perché consente di stimare il rischio tecnico, il tempo e i costi necessari per portare una tecnologia dallo stato di ricerca a quello di produzione e commercializzazione.

Tabella 4 – Technology Readiness Level – TRL

Livello di TRL	Descrizione
TRL 1	Osservati i principi fondamentali
TRL 2	Formulato il concetto della tecnologia
TRL 3	Prova di concetto sperimentale
TRL 4	Tecnologia convalidata in laboratorio
TRL 5	Tecnologia convalidata in ambiente (industrialmente) rilevante
TRL 6	Tecnologia dimostrata in ambiente (industrialmente) rilevante
TRL 7	Dimostrazione di un prototipo di sistema in ambiente operativo
TRL 8	Sistema completo e qualificato
TRL 9	Sistema reale provato in ambiente operativo (produzione competitiva, commercializzazione)

Fonte: Elaborazione ENEA su Commissione Europea

Il livello di maturità tecnologica (TRL) degli impianti eolici varia in funzione della tipologia di tecnologia impiegata. Nel corso degli anni, i progressi tecnologici hanno consentito alle turbine eoliche onshore e a quelle offshore fisse sul fondale marino di raggiungere elevati livelli di TRL, garantendo quindi un alto grado di affidabilità e diffusione commerciale. Al contrario, l'eolico offshore galleggiante, pur risultando già economicamente promettente in alcuni contesti, presenta un livello di maturità tecnologica leggermente inferiore, principalmente a causa della sua più recente introduzione e della maggiore complessità tecnica. Le tecnologie emergenti, come i sistemi eolici aviotrasportati e le turbine eoliche ad asse verticale, si collocano infine a livelli di TRL più bassi e richiedono ulteriori attività di ricerca e sviluppo prima di una diffusione su larga scala.

Tabella 5 – TRL delle tecnologie eoliche

Sub-Technology	TRL (Technology Readiness Level)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Onshore wind									
Bottom-fixed offshore wind									
Floating offshore wind									
Airborne wind energy									
Vertical-axis wind turbines									
Bladeless wind turbines									

Fonte: JRC 2025

L'Europa ha conquistato negli anni un'importanza crescente nel settore dell'energia eolica, occupando una posizione di rilievo nel mercato globale, in particolare arrivando a detenere il 38% del mercato nell'offshore e con un trend delle esportazioni extra-UE in aumento (più di 2 miliardi di euro nel 2024). Il dominio a livello globale continua però ad essere della Cina, che rimane leader in termini di produzione. La capacità eolica globale

ha mostrato nell'ultimo decennio un trend di crescita costante, raggiungendo una capacità installata di 1.135 GW nel 2024. La Cina ha rappresentato il 68,2% delle nuove installazioni a livello globale, seguita dall'UE con l'11% e complessivamente il 20,4% delle installazioni globali si trova in Europa.

Per tutti questi motivi, l'UE si sta concentrando sul miglioramento della sostenibilità della filiera dell'energia eolica, ponendo l'accento sul riciclo e sull'economia circolare e affrontando le dipendenze geopolitiche legate alle materie prime critiche.

Appendice B - Materiali e processi innovativi per i magneti delle turbine eoliche

La ricerca scientifica, negli ultimi anni, si concentra su soluzioni in grado di ridurre l'impiego di terre rare e di rafforzare la resilienza della filiera europea. Ricerca e innovazione mirano a ridurre la dipendenza dalle importazioni e migliorare la sostenibilità della filiera, concentrandosi in diversi ambiti come il miglioramento dell'efficienza dei processi di separazione, lo sviluppo di tecnologie di riciclo diretto (magnet-to-magnet, cioè recupero di magneti senza completa separazione chimica e fabbricazione di nuovi magneti, con il vantaggio di ridurre il numero dei passaggi e migliorare la resa complessiva del processo), la progettazione di prodotti a geometrie complesse o facilmente smontabili (design for recycling), lo sviluppo di magneti alternativi privi di terre rare. In questo scenario, ENEA, e in particolare il Dipartimento SSPT (Sostenibilità, circolarità e adattamento al cambiamento climatico dei Sistemi Produttivi e Territoriali), mette a disposizione un patrimonio consolidato di competenze che copre l'intera catena del valore, con attività che spaziano dallo sviluppo di nuovi materiali e processi produttivi innovativi, comprese tecnologie di AM, fino alla progettazione sostenibile dei componenti e all'implementazione di strategie di economia circolare per il recupero e il riciclo delle risorse critiche. Questo approccio integrato riflette una visione multidisciplinare in cui innovazione di prodotto e di processo, analisi di sostenibilità ambientale ed economica, e gestione strategica delle catene di approvvigionamento risultano strettamente interconnesse, sia per la completa sostituzione che per la riduzione del consumo di terre rare nei magneti permanenti, come qui di seguito descritto.

- **Sostituzione delle terre rare nei magneti permanenti:** lo sviluppo di materiali alternativi ai REEs non rappresenta allo stato attuale una soluzione competitiva, principalmente a causa delle inferiori prestazioni magnetiche rispetto ai sistemi basati sulle terre rare. Tale limitazione comporta un inevitabile aumento delle dimensioni e della massa dei magneti, per garantire le stesse caratteristiche funzionali. L'attuale criticità della catena di approvvigionamento con la dipendenza dell'Europa dalla Cina determina comunque un rinnovato interesse strategico per le ferriti, almeno nelle applicazioni dove non è indispensabile ridurre le dimensioni e il peso del magnete, sia utilizzando processi standard che di manifattura additiva.
- **Riduzione del consumo di terre rare nei magneti permanenti:** le proprietà magnetiche e fisico-chimiche dei Rare Earth Elements (REEs) ne rendono difficile la sostituzione con materiali alternativi senza compromessi sulle prestazioni elettromagnetiche. Una delle principali sfide consiste pertanto nella ricerca di soluzioni che ne riducano l'impiego o promuovano l'utilizzo di REEs da riciclo, limitando la dipendenza dell'Europa dalla Cina, sia facendo riferimento al processo di produzione standard che a tecnologie di manifattura additiva (AM), stampa tridimensionale basata sulla deposizione strato su strato dei materiali. L'AM rappresenta infatti una tecnologia produttiva innovativa e promettente che apre nuove possibilità nel settore dei magneti permanenti a base di terre rare. Offre, infatti, alcuni vantaggi rispetto ai metodi tradizionali, contribuendo ad un uso più efficiente delle risorse riducendo il consumo complessivo di materie prime critiche e minimizzando gli scarti di lavorazione, consentendo la realizzazione di componenti anche a geometria complessa prossimi alla forma finale (near-net shape),

semplificando l'intero ciclo produttivo grazie all'eliminazione di alcune fasi di lavorazione e alla conseguente riduzione dei tempi e dei costi.

In questa prospettiva, assume crescente interesse lo sviluppo di soluzioni basate su materie prime non critiche, soprattutto nelle applicazioni in cui è possibile individuare un equilibrio accettabile tra prestazioni, costi e sicurezza dell'approvvigionamento. Ovviamente tale sostituzione non dovrà determinare un calo delle prestazioni magnetiche e finora non sono state identificate soluzioni completamente competitive. Bisognerà individuare un valido compromesso tra prestazioni e costi e una possibile soluzione, almeno per applicazioni che non richiedono forze estreme, potrebbe essere rappresentata dalle ferriti, materiali magnetici ceramici di cui è stato fatto grande uso in passato. I magneti ferritici, generalmente costituiti da ossidi di ferro combinati con bario o stronzio, sono materiali ceramici ampiamente disponibili e prodotti su larga scala con processi industriali consolidati. Oltre ad essere molto più economici, offrono vantaggi in termini di sostenibilità e sicurezza dell'approvvigionamento, nonostante presentino proprietà magnetiche inferiori rispetto ai magneti NdFeB, in particolare in termini di densità di energia magnetica e coercitività. Dal punto di vista economico e strategico, utilizzano infatti materie prime abbondanti e a basso costo, riducendo la dipendenza da elementi critici e, dal punto di vista ambientale, la loro produzione comporta in genere minori impatti rispetto all'estrazione e raffinazione delle terre rare. Sono caratterizzati, inoltre, da maggiore stabilità chimica e resistenza alla corrosione (questo riduce ad es. la necessità di rivestimenti protettivi). Per questi motivi, i magneti a ferrite sono già ampiamente utilizzati in applicazioni in cui non sono richieste prestazioni magnetiche estreme, come motori elettrici di elettrodomestici, sistemi automobilistici ausiliari, altoparlanti e dispositivi elettronici. La ricerca attuale si concentra sul miglioramento delle prestazioni magnetiche e sull'ottimizzazione del design dei motori elettrici, con l'obiettivo di ampliare il numero di applicazioni in cui possano sostituire, almeno parzialmente, i magneti a base di neodimio.

I magneti permanenti a base di terre rare offrono elevate prestazioni, abbinando ottime proprietà magnetiche a dimensioni ridotte ed elevata efficienza a tutte le velocità di rotazione. I più ampiamente utilizzati sono quelli neodimio-ferro-boro (NdFeB), seguiti da quelli samario-cobalto (SmCo). In un'ottica sostenibile e circolare, che consenta di massimizzare l'efficienza nell'uso delle risorse e di trasformare i rifiuti in preziose risorse secondarie, è fondamentale considerare l'intero ciclo di vita delle terre rare, che è costituito da quattro fasi principali spesso fortemente interconnesse: estrazione mineraria, metallurgia, circolazione e riciclo. In questo contesto, il riciclo rappresenta una direttrice sempre più rilevante di approvvigionamento complementare alle fonti primarie, pur restando ancora limitato su scala globale. Allo stato attuale, infatti, il riciclo delle REEs copre una quota ancora modesta dell'approvvigionamento complessivo di terre rare. Nel complesso però, il riciclo delle REEs rappresenta meno del 5% dell'approvvigionamento globale di terre rare. Un'ulteriore direttrice di innovazione riguarda l'applicazione dei principi dell'ecodesign e l'impiego di tecnologie di additive manufacturing (AM), che offrono prospettive interessanti per la produzione di magneti permanenti. La manifattura additiva o stampa 3D, è una tecnologia di fabbricazione avanzata che consente di realizzare componenti tridimensionali a partire da un modello digitale, costruendoli strato dopo strato mediante deposizione controllata del materiale. A differenza delle tecniche tradizionali sottrattive (come fresatura o tornitura), dove il materiale viene rimosso da un blocco, l'AM aggiunge solo il materiale necessario, riducendo gli sprechi e permettendo forme geometriche complesse o impossibili da

ottenere con metodi convenzionali. Il processo inizia con la progettazione digitale dell'oggetto (CAD), seguito dalla sua suddivisione in strati tramite software di slicing, e dalla deposizione controllata del materiale attraverso diverse tecnologie. Offre, quindi, nuove possibilità rispetto ai metodi convenzionali di produzione dei magneti (sinterizzazione o stampaggio), contribuendo ad un uso più efficiente delle risorse. I magneti vengono realizzati strato per strato a partire da polveri magnetiche o composti polimero-magnetici contenenti particelle di NdFeB. È possibile in questo modo realizzare geometrie complesse e personalizzate, difficilmente ottenibili con tecniche tradizionali, consentendo l'ottimizzazione del design e l'integrazione diretta dei magneti in componenti multifunzionali, come motori elettrici o sensori. Un ulteriore vantaggio è rappresentato dalla riduzione degli scarti di materiale, particolarmente rilevante per elementi critici come il Nd, poiché il processo utilizza solo la quantità di polvere necessaria per realizzare il componente, consentendo la realizzazione di componenti anche a geometria complessa prossimi alla forma finale (near-net shape), semplificando l'intero ciclo produttivo grazie all'eliminazione di alcune fasi di lavorazione e alla conseguente riduzione dei tempi e dei costi. L'AM consente, inoltre, una maggiore flessibilità progettuale, permettendo di modulare la distribuzione del materiale magnetico e di ottenere configurazioni magnetiche ottimizzate per specifiche applicazioni. Infine, l'integrazione dell'additive manufacturing con materiali riciclati o polveri recuperate da magneti a fine vita rappresenta una prospettiva interessante per migliorare la sostenibilità e la circolarità della filiera delle terre rare, compresa quella del Nd. Tale tecnologia è applicabile sia ai magneti bulk che a quelli legati, contenenti cioè una matrice polimerica. A differenza dei magneti sinterizzati convenzionali, che richiedono una lavorazione ad alta temperatura e danno origine a un prodotto denso e completamente cristallino, i magneti legati vengono prodotti mescolando particelle magnetiche con un legante e modellando la miscela nella forma desiderata a basse temperature. Questo processo consente una maggiore complessità di progettazione, l'utilizzo di processi produttivi near-net shape, costi di produzione inferiori per alcune applicazioni e si presta anche all'impiego di REEs da riciclo.

Per le terre rare le difficoltà nell'implementazione dei processi di riciclo rappresentano la barriera più rilevante, insieme alla difficoltà di individuare materiali sostitutivi. Il potenziale del riciclo come strumento di riduzione della dipendenza da materie prime critiche è ampiamente riconosciuto, ma persistono vincoli tecnologici, organizzativi e di investimento, coerenti con la complessità dei processi di recupero e sostituzione, che ne limitano la piena realizzazione. La resilienza delle filiere delle materie prime critiche non dipende soltanto dall'individuazione di strumenti adeguati, ma dalla capacità di intervenire simultaneamente su più livelli: regolatorio, tecnologico, contrattuale e organizzativo. Le principali criticità sono di natura tecnica (complessità della separazione delle terre rare, presenza di leghe multicomponente difficili da trattare, degradazione dei magneti durante il ciclo di vita, difficoltà di individuare alternative tecnicamente sostenibili), normativa ed economica (costi elevati delle tecnologie di riciclo, prezzi volatili delle terre rare primarie, mancanza di filiere industriali consolidate in Europa, difficoltà di individuare alternative economicamente sostenibili). Le barriere operative (difficoltà di tracciabilità dei magneti nei prodotti complessi, la scarsa qualità e purezza dei flussi di rifiuti, problematiche di sicurezza nella gestione di rifiuti contenenti metalli reattivi) costituiscono un limite alla scalabilità dei processi di recupero. Le terre rare rappresentano una materia prima critica per la transizione energetica e digitale, con una domanda in crescita trainata dalla diffusione di veicoli elettrici, turbine eoliche e

tecnologie elettroniche avanzate. I principali punti chiave sono l'estrema concentrazione geografica della produzione globale, la quasi totale dipendenza dell'UE dalle importazioni, il ruolo strategico dei magneti permanenti in particolare nel settore dell'energia eolica, e il significativo potenziale del riciclo come fonte secondaria. Le priorità di intervento potrebbero quindi essere rivolte allo sviluppo di una filiera europea integrata delle terre rare, a investimenti dedicati a tecnologie di riciclo avanzate, al miglioramento della raccolta e del trattamento dei RAEE, alla promozione del design for recycling nei prodotti contenenti magneti e alla diversificazione delle fonti di approvvigionamento, oltre che lo studio di materiali e geometrie alternative.

Uno sviluppo competitivo delle tecnologie di additive manufacturing fino a TRL elevati, porterebbe i seguenti vantaggi principali:

- riduzione della dipendenza dalle terre rare (soprattutto neodimio e disprosio)
- riduzione del costo dei generatori
- incremento della resilienza della supply chain
- produzione di generatori più leggeri ed efficienti

La combinazione di nuovi materiali magnetici, anche da riciclo, e design ottimizzati tramite stampa 3D potrebbe migliorare significativamente efficienza e sostenibilità dei generatori eolici.

Tabella 6 – Comparazione tra tecnologie e materiali per magneti permanenti

Proprietà	SmCo sinterizzato	NdFeB sinterizzato	NdFeB legato	Ferrite sinterizzata	Ferrite legata
<i>Utilizzo di terre rare</i>	si	si	si	no	no
<i>Forza magnetica (B_r)</i>	Alta	Molto alta	Media	Bassa	Molto bassa
<i>Energia magnetica (BH_{max}) (MGOe)</i>	20–30	30–50	5–12	1–5	<1–2
<i>Coercitività (H_c)</i>	Molto alta	Molto alta	Alta	Media	Bassa
<i>Densità</i>	Alta	Alta	Media	Media	Bassa
<i>Fragilità</i>	Alta	Alta	Bassa	Media	Bassa
<i>Resistenza meccanica</i>	Scarsa	Scarsa	Buona	Discreta	Buona
<i>Forme realizzabili</i>	Limitate	Limitate	Molto complesse	Limitate	Complesse
<i>Precisione dimensionale</i>	Media	Media	Alta	Media	Alta
<i>Resistenza alla corrosione</i>	Ottima	Scarsa (serve coating)	Buona	Ottima	Ottima
<i>Temperatura max (°C)</i>	250–350	80–200	~120	~250	~150
<i>Stabilità termica</i>	Molto alta	Media	Media	Alta	Media
<i>Costo</i>	Molto alto	Alto	Medio	Basso	Basso
<i>Peso a parità di forza</i>	Medio	Basso	Medio	Alto	Alto
<i>Uso nelle turbine</i>	generatori compatti	generatori compatti	generatori più grandi	generatori più grandi	generatori più grandi
<i>Applicazioni tipiche</i>	Aerospazio, alta temperatura	Motori EV, elettronica	Sensori, micromotori	Altoparlanti, elettrodomestici	Componenti stampati

Fonte: ENEA

In sintesi, le proprietà magnetiche finali dipendono fortemente dal materiale scelto, mentre il processo produttivo incide principalmente sulle geometrie ottenibili e sui costi. I magneti sinterizzati offrono le migliori prestazioni, grazie alla microstruttura densa e orientata, ma sono più costosi e meno versatili di quelli legati, caratterizzati da grande flessibilità progettuale, resistenza meccanica e alla corrosione. Nelle applicazioni in cui è richiesta alta potenza e dimensioni ridotte, non si hanno attualmente ancora alternative valide ai magneti al neodimio, mentre quando il costo, la sostenibilità ambientale e la stabilità sono i fattori di scelta, i magneti ferritici risultano competitivi.

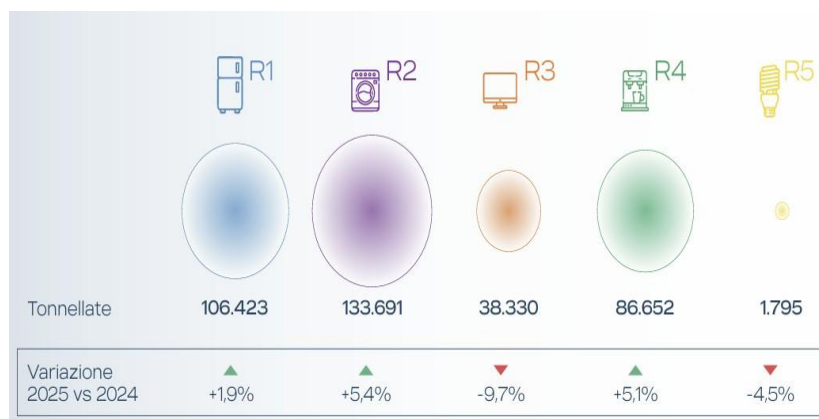
v

APPENDICE C - Rifiuti come giacimento urbano e potenziale di recupero di materie prime critiche dai RAEE domestici

Un esempio concreto di miniera urbana è quello dei rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE), che contengono diversi materiali, tra cui metalli preziosi (come argento, oro e palladio), metalli di specialità (rame, alluminio, nichel, stagno, zinco, ferro, indio, antimonio, bismuto), materie prime critiche (terre rare, cobalto, litio), oltre a plastiche, vetro, ceramiche e molti altri componenti. Un dispositivo elettronico moderno può includere oltre 60 elementi della tavola periodica e si stima che ogni cittadino europeo generi mediamente circa 18,3 kg di rifiuti hi-tech all'anno. Per valorizzare davvero queste risorse è necessaria un'azione di sistema: a partire dalla mappatura delle principali fonti secondarie disponibili, fino alla pianificazione e realizzazione di impianti dedicati alla produzione di materie prime critiche. In altre parole, occorre superare la visione degli impianti di riciclo come semplici strutture per la gestione dei rifiuti e riconoscerli come veri e propri impianti industriali in grado di produrre materie prime strategiche a beneficio del territorio e del sistema produttivo.

In Italia, i dati sulla raccolta dei RAEE domestici pubblicati dal Centro di Coordinamento RAEE consentono una lettura complessiva dei flussi intercettati dal sistema nazionale, articolati secondo i cinque raggruppamenti previsti dalla disciplina vigente. I numeri evidenziano una distribuzione dei volumi che riflette il peso strutturale dei raggruppamenti. R1 (apparecchiature per lo scambio di temperatura) e R2 (altri grandi bianchi) nel complesso rappresentano circa il 65% dei flussi raccolti, seguiti dai raggruppamenti R4 (IT, elettronica di consumo e piccoli elettrodomestici), R3 (schermi) e R5 (sorgenti luminose). Nel complesso, i dati quantitativi descrivono una sostanziale stabilità rispetto a quanto osservato negli ultimi anni, con una crescita della raccolta in tutti i raggruppamenti, ad eccezione di R3 ed R5, che porta il dato complessivo ad un lieve incremento rispetto ai RAEE raccolti nel 2024 (+2,4%). La lettura dei dati a livello di raggruppamento non consente di cogliere la composizione merceologica di dettaglio dei flussi, né la distribuzione delle diverse tipologie tecnologiche all'interno dei singoli raggruppamenti, informazione importante per valutare che cosa effettivamente arriva agli impianti di trattamento e quindi che cosa può poi essere recuperato. In questo quadro, le attività di campionamento previste dall'Accordo di programma ex art. 33 comma 5 lettera g) del D. Lgs. 49/2014 ed organizzate dal Centro di Coordinamento assumono un ruolo conoscitivo rilevante, in quanto permettono di affiancare alla dimensione quantitativa una valutazione qualitativa dei flussi raccolti. Le evidenze disponibili indicano che il raggruppamento R1 è costituito in prevalenza (91%) da frigoriferi, mentre in R2 le apparecchiature del lavaggio (lavatrici, lavasciuga, lavastoviglie) sono circa l'80% del raggruppamento; in R3 in termini di peso è ancora importante, seppur in riduzione, la presenza di apparecchiature a tubo catodico (50% circa) e in R5 le sorgenti luminose a LED rappresentano ancora una quota in peso relativamente contenuta (circa 15%). Nel raggruppamento R4, l'analisi mostra la naturale e prevedibile eterogeneità dei carichi, con una presenza importante di stampanti, fotocopiatrici e fax (circa 17%), così come delle varie apparecchiature per uso domestico (aspirapolveri, macchine per il caffè, ventilatori, orologi da parete, ferri da stiro etc., pari a circa il 27%), ma anche di dispositivi per l'intrattenimento (11%) e per la cura della persona (4%), mentre solo il 4,5% è rappresentato da PC e Information and Communication Technology (ICT). Un elemento di particolare attenzione riguarda la crescente diffusione di apparecchiature alimentate da batterie, e in particolare da batterie al litio integrate.

Questa tipologia di apparecchiature, storicamente marginale, sta assumendo un peso progressivamente più rilevante, soprattutto nel raggruppamento R4, rendendo



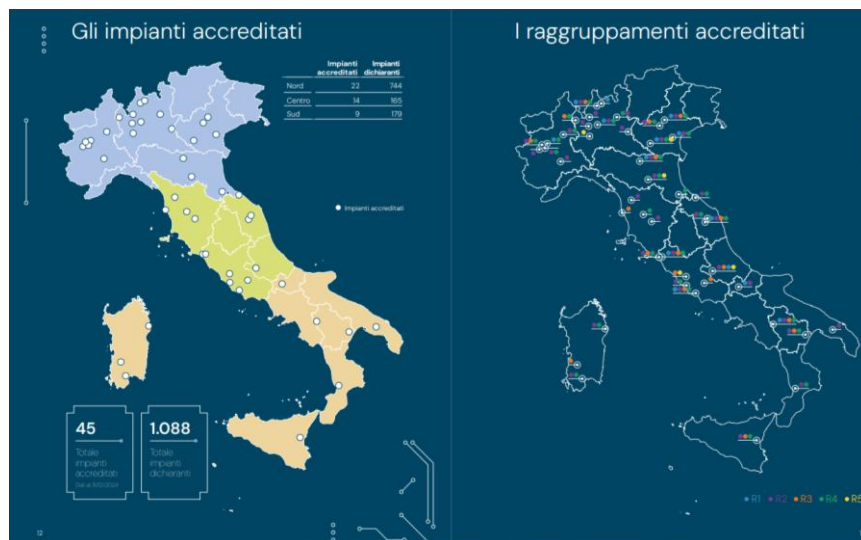
necessario un approccio gestionale più attento sotto il profilo della sicurezza e della conformità normativa. Un'analisi del Centro di Coordinamento rivela che, all'interno dei carichi tradizionali di R4 (quelli per i quali non viene effettuata una distinzione a monte tra R4 con batterie e R4 senza batterie), vengono erroneamente

conferiti anche pile e accumulatori "liberi", ovvero non inseriti in una apparecchiatura, pari allo 0,8% del peso di R4, mentre le apparecchiature che contengono batterie rappresentano il 9,6% del totale dei volumi raccolti in R4. In questo scenario, la separazione, già in fase di raccolta, delle apparecchiature con batterie al litio come fonte di alimentazione principale, consente di circoscrivere i flussi potenzialmente critici sia in termini di sicurezza di gestione, sia in termini di materiali di particolare interesse per l'industria del riciclo. Il tema delle batterie al litio si inserisce in un quadro più ampio legato alla presenza nei RAEE di materie prime definite critiche per il loro ruolo strategico nelle tecnologie energetiche e digitali e per le condizioni di rischio associate alle catene di approvvigionamento.

Come visto, i RAEE domestici costituiscono un flusso estremamente eterogeneo, all'interno del quale sono presenti numerosi materiali di interesse, tra cui rame, nichel, cobalto, manganese, grafite, silicio e, in misura più limitata, terre rare. Tuttavia, con l'eccezione del rame per cui alcune fonti parlano di una concentrazione, su tutti i raggruppamenti, compresa tra il 2% ed il 3%, le concentrazioni medie dei materiali critici risultano generalmente basse, rendendo complesso il loro recupero come obiettivo primario e legandone la valorizzazione economica a processi di recupero più ampi, spesso orientati a metalli più abbondanti o di maggior valore unitario: alcuni materiali, come il nichel, sono presenti in concentrazioni basse, ma non trascurabili (si parla di 0,01-0,02% come contenuto medio ponderale), mentre per altri materiali i valori sono ancora più bassi. Partendo da queste fonti, ed ipotizzando un tasso di raccolta dei RAEE domestici pari al 100% dell'immesso, ne deriverebbe un potenziale di circa 20/30.000 ton/anno di rame e tra le 100 e le 200 ton/anno di nichel. Anche per le batterie al litio, che pur escono dal perimetro del trattamento dei RAEE, l'interesse è rivolto a diversi materiali che possono essere riciclati, compresi quelli catodici come cobalto, alluminio, rame, grafite; tuttavia, allo stato attuale, l'effettivo riciclo di tali batterie è limitato, anche a causa della difficoltà di gestione di tali materiali. Le evidenze disponibili indicano quindi che, attualmente, il contributo potenziale dei RAEE domestici alla copertura del fabbisogno nazionale di materie prime critiche appare quantitativamente limitato, soprattutto per elementi come nichel e cobalto, il cui recupero dai RAEE può assumere rilievo più come sottoprodotto di filiere già esistenti, che come fonte autonoma di approvvigionamento. Diversa appare la situazione per il rame, che rappresenta la principale materia prima critica recuperabile dai RAEE in termini quantitativi, pur non potendo certamente arrivare a coprire una quota rilevante del fabbisogno complessivo nazionale.

Il Centro di Coordinamento RAEE, in applicazione di quanto previsto dall'Accordo di programma, ha qualificato le aziende di trattamento dei RAEE domestici, sulla base delle Specifiche Tecniche derivanti dalle norme Cenelec. Al 31.12.2024 risultano certificati 50 impianti di trattamento, a copertura di tutti i raggruppamenti raccolti.

Figura 14 – Geolocalizzazione degli impianti di trattamento RAEE accreditati



Fonte: CDC RAEE

La separazione di frazioni come rame e alluminio, oltre ai metalli ferrosi, è una attività svolta praticamente in tutti gli impianti che trattano rifiuti che contengono questi materiali; diversi impianti sono anche in grado di ottenere materiali che raggiungono la cessazione della qualifica di rifiuto, seppure questo non sia un requisito vincolante per la certificazione. Diversa è la situazione per le frazioni contenenti le altre materie critiche (tra cui le Terre Rare): nella stragrande maggioranza dei casi queste frazioni sono inviate all'estero (in Europa, dove ci sono alcuni big-players, ma non solo), anche se in Italia stanno nascendo realtà che si pongono l'obiettivo di trattare queste frazioni. Nel complesso, le attività di ricerca e sviluppo avviate negli ultimi anni contribuiscono a delineare il potenziale teorico del recupero di materiali critici dai RAEE; tuttavia, la concreta applicabilità e profittabilità su scala industriale resta condizionata da fattori strutturali, tra cui la dimensione dei flussi effettivamente raccolti e trattati. L'auspicio è che l'aumento della raccolta possa portare con sé anche l'aumento degli apparecchi che contengono maggiori quantità di materie prime critiche, aprendo quindi a prospettive più interessanti per il loro recupero.

APPENDICE D - Valdarno, il primo impianto italiano per il recupero idrometallurgico di metalli preziosi da RAEE

L'impianto realizzato a Terranuova Bracciolini, nel Valdarno aretino, rappresenta il primo esempio in Italia di infrastruttura industriale dedicata al recupero e all'affinazione di metalli preziosi contenuti nelle schede elettroniche provenienti da rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE) mediante un processo idrometallurgico. Entrato ufficialmente a regime il 1° gennaio 2026, l'impianto introduce nel panorama nazionale un modello innovativo di trattamento dei rifiuti elettronici, orientato alla valorizzazione delle cosiddette "miniere urbane".

A livello globale, infatti, la produzione di rifiuti elettronici è stimata in circa 55 milioni di tonnellate all'anno, ma solo una quota limitata viene effettivamente trattata attraverso filiere tracciate e tecnologicamente avanzate. Tradizionalmente il recupero dei metalli preziosi contenuti nelle schede elettroniche è affidato a processi pirometallurgici, caratterizzati da temperature operative superiori ai 1.200 °C, elevati consumi energetici e dalla necessità di grandi impianti centralizzati, spesso localizzati fuori dai confini nazionali e integrati in catene logistiche transfrontaliere. Questo approccio, oltre a presentare un'elevata intensità energetica, consente un recupero solo parzialmente selettivo dei metalli e si inserisce ancora in una logica industriale vicina ai modelli lineari di gestione delle risorse. Il nuovo impianto del Valdarno introduce invece una filiera di recupero a scala nazionale basata su tecnologie idrometallurgiche, che consentono una maggiore selettività nell'estrazione dei metalli e una migliore tracciabilità dei materiali lungo l'intero processo di trattamento. La struttura si estende su una superficie di circa 2.500 metri quadrati ed è stata realizzata grazie a un investimento di circa 5 milioni di euro. La capacità di trattamento è pari a circa 315 tonnellate annue di schede elettroniche (Printed Circuit Boards – PCB), provenienti principalmente dai raggruppamenti RAEE R3 e R4, che includono apparecchiature informatiche, elettronica di consumo e piccoli elettrodomestici. Il ciclo industriale è articolato in due fasi principali, integrate tra loro. Nella prima fase le schede elettroniche vengono sottoposte a un trattamento termomeccanico durante il quale, attraverso temperature relativamente contenute (circa 200–220 °C), vengono distaccati i componenti elettronici – quali resistori, condensatori, diodi, transistor, induttori e relè – per poi essere avviati a successive operazioni di selezione meccanica e triturazione. Questa fase consente in particolare di separare il rame dal substrato in vetronite ramata e di ottenere una frazione metallica pari a circa il 38–40% del peso del materiale in ingresso. La seconda fase del processo rappresenta l'elemento tecnologicamente più innovativo dell'impianto ed è basata su un trattamento idrometallurgico articolato in due stadi di lisciviazione. In questa fase i metalli presenti nelle schede elettroniche vengono progressivamente portati in soluzione: dapprima i metalli non nobili, come ferro, piombo e rame, e successivamente i metalli preziosi. Attraverso successive operazioni di affinazione elettrochimica selettiva è quindi possibile separare e recuperare i principali metalli di valore, tra cui oro, argento e palladio. I metalli recuperati vengono infine trasformati in "spugne metalliche" che, attraverso un processo di fusione, consentono la produzione di lingotti ad elevato grado di purezza. L'impianto consente di recuperare ogni anno quantità significative di metalli strategici, in particolare si stimano:

- circa 40–50 chilogrammi di oro con purezza superiore al 99,95%
- tra 90 e 100 chilogrammi di argento con purezza superiore al 99,25%
- tra 15 e 20 chilogrammi di palladio

- circa 40 tonnellate di rame.

Il contenuto medio di metalli preziosi nelle schede elettroniche è particolarmente elevato se confrontato con molti giacimenti minerari tradizionali, variando mediamente tra 400 e 700 grammi per tonnellata di materiale trattato.

Figura 15 - I numeri chiave dell'impianto



Dal punto di vista ambientale, il passaggio da tecnologie pirometallurgiche a processi idrometallurgici comporta benefici significativi in termini di efficienza energetica e riduzione delle emissioni. Il recupero dei metalli attraverso questa tecnologia può infatti comportare emissioni di CO₂ equivalenti fino a venti volte inferiori rispetto all'estrazione primaria da giacimento minerario. L'impianto è inoltre progettato per limitare gli impatti ambientali attraverso sistemi di filtrazione delle emissioni e torri di lavaggio dei gas, con una potenza installata complessiva pari a circa 750 kW e senza scarichi idrici industriali diretti, poiché i reflui vengono accumulati e gestiti tramite filiere esterne dedicate. La localizzazione dell'impianto nel Valdarno risponde a una precisa logica industriale e territoriale. L'infrastruttura si inserisce infatti in un'area già caratterizzata dalla presenza di attività legate all'economia circolare e consente di creare sinergie con il distretto orafino aretino, uno dei principali poli europei per la lavorazione dei metalli preziosi, che rappresenta uno dei possibili sbocchi per parte dei metalli raffinati. In questa prospettiva, l'impianto non si limita a svolgere una funzione di trattamento dei rifiuti, ma contribuisce alla costruzione di una filiera industriale locale capace di generare valore aggiunto sul territorio, ridurre la dipendenza dalle importazioni di materie prime critiche e trasformare i rifiuti elettronici in una risorsa strategica per il sistema produttivo.

Tabella 7 - Benchmark del modello tradizionale rispetto al modello idrometallurgico in Valdarno

Aspetto	Modello pirometallurgico tradizionale	Modello idrometallurgico Valdarno
Tecnologia di recupero	Tattamento ad alte temperature	Tattamento chimico-selettivo integrato con fase termomeccanica
Temperatura di processo	Superiore a 1.200 °C	Circa 200–220 °C nella fase termomeccanica, seguita da lisciviazione e affinazione elettrochimica
Scala impiantistica	Grande scala, spesso centralizzata	Scala industriale nazionale
Consumi energetici	Elevati	Più contenuti
Logistica	Spesso transfrontaliera	Filiera più locale e territorialmente integrata
Selettività nel recupero	Più limitata	Maggiore selettività nel recupero dei metalli
Tracciabilità dei flussi	Più debole	Più elevata
Metalli recuperabili	Recupero meno mirato dei metalli preziosi	Recupero selettivo di oro, argento, palladio e rame

<i>Valore aggiunto territoriale</i>	Generalmente ridotto	Elevato, con integrazione nel tessuto industriale locale
<i>Coerenza con l'urban mining</i>	Parziale	Elevata
<i>Implicazione strategica</i>	Modello vicino a logiche lineari	Modello coerente con economia circolare e autonomia strategica europea

Fonte: Gruppo Iren

L'infrastruttura sviluppata nel Valdarno presenta inoltre caratteristiche modulari che ne consentono una possibile estensione futura ad altre matrici contenenti metalli critici, come la cosiddetta "black mass" derivante dal riciclo delle batterie al litio, componenti elettronici contenenti tantalio o magneti permanenti a base di neodimio. In questo senso, l'impianto rappresenta non soltanto un primato tecnologico a livello nazionale, ma anche un possibile modello replicabile per lo sviluppo di una filiera industriale del recupero di materie prime critiche nel sistema delle utilities e dell'economia circolare italiana.

APPENDICE E – NEOFOS, un approccio integrato per la rimozione e il recupero del fosforo

Il fosforo è una risorsa essenziale per l'agricoltura, l'industria dei fertilizzanti e la produzione di componenti avanzati, come le batterie al litio-ferro-fosfato. Nonostante ciò, l'Unione Europea non dispone di giacimenti significativi e dipende per oltre l'85% da importazioni extra-UE, principalmente da Marocco e Cina. Questa forte dipendenza, unita alla crescente domanda globale e alle tensioni geopolitiche, ha portato l'UE a classificare il fosforo come Materia Prima Critica. Contestualmente, la nuova Direttiva sulle acque reflue urbane (2024/3019) introduce limiti allo scarico ancora più severi e rafforza gli obblighi per il controllo dei nutrienti. La Direttiva riconosce infatti che gli impianti di trattamento delle acque reflue costituiscono un canale significativo attraverso cui azoto e fosforo raggiungono l'ambiente, contribuendo direttamente ai fenomeni di eutrofizzazione dei corpi idrici e dei mari dell'Unione. Per questo motivo viene introdotto l'obbligo di trattamento terziario per tutti gli impianti con un carico pari o superiore a 150.000 abitanti equivalenti. Parallelamente, il Regolamento (UE) 2019/1009 apre all'impiego di fertilizzanti derivati da processi di recupero. Il risultato è un quadro regolatorio che chiede ai gestori di fare di più con meno: ridurre l'uso di reagenti, migliorare la performance depurativa e generare risorse valorizzabili. Il progetto NEOFOS nasce all'interno di questo scenario, proponendo un approccio olistico e integrato al recupero del fosforo dai processi depurativi urbani.

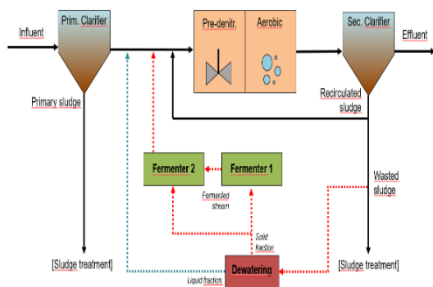
Governance del partenariato

NEOFOS è finanziato nell'ambito del bando MASE "Materie Prime Critiche – Urban Mining", con un budget complessivo di 1.454.012,50 euro. L'iniziativa mira a consolidare una filiera circolare del fosforo attraverso sperimentazioni integrate su acque reflue, fanghi e ceneri. Il partenariato unisce quattro soggetti con competenze complementari.

Gruppo CAP, nel ruolo di capofila, coordina le attività progettuali e mette a disposizione gli impianti di Bareggio e Sesto San Giovanni, dove sono installati un dimostratore S2EBPR e un impianto dedicato alla precipitazione dei sali di fosforo. MM S.p.A. contribuisce con la sperimentazione a scala pilota presso l'impianto di Milano Nosedo e fornisce dati operativi fondamentali per analizzare l'applicabilità su scala metropolitana. Il Politecnico di Milano supporta il progetto con l'ingegneria di processo e la modellazione avanzata dei processi biologici per la rimozione del fosforo. L'Università di Bologna guida le attività di recupero da ceneri di monoincenerimento e coordina gli studi Life Cycle Assessment (LCA) e Cost Benefit Analysis (CBA), indispensabili per definire la sostenibilità complessiva delle tecnologie proposte. Oltre agli aspetti tecnici, NEOFOS si configura come un progetto abilitante sul piano regolatorio: fornisce dati utili ai percorsi di End of Waste e alla definizione dei criteri di qualità per i materiali recuperati.

Innovazione del processo S2EBPR

L'intensificazione della rimozione biologica del fosforo (Enhanced Biological Phosphorus Removal, EBPR) rappresenta attualmente l'approccio biologico più promettente per l'abbattimento del fosforo negli impianti di trattamento delle acque reflue, soprattutto alla luce delle limitazioni associate ai processi di rimozione chimica tradizionalmente impiegati. Tuttavia, lo sviluppo e l'applicazione di tali processi sono subordinati a specifiche configurazioni impiantistiche, necessarie per favorire la selezione dei microrganismi fosforo-accumulanti (Phosphorus Accumulating Organisms, PAO).

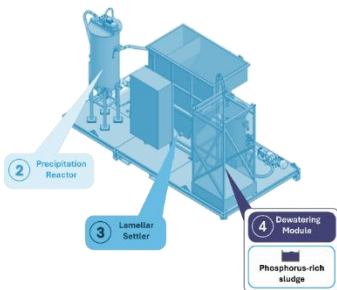


Il processo S2EBPR (Side-Stream Enhanced Biological Phosphorus Removal) consente di introdurre la rimozione biologica del fosforo anche in impianti in cui essa non era originariamente prevista, offrendo inoltre il potenziale vantaggio di ridurre la produzione di fanghi biologici di supero. L'implementazione di un sistema S2EBPR richiede la presenza combinata di due funzioni, generalmente ottenute mediante l'inserimento di unità in side-stream nella linea acque: la prima finalizzata alla produzione di miscele di acidi grassi volatili (Volatile Fatty

Acids, VFA) attraverso processi fermentativi, e la seconda volta a garantire un efficace contatto, in ambiente anaerobico, tra i VFA prodotti e una frazione dei fanghi biologici di ricircolo. Nel dimostratore installato a Bareggio, il sistema S2EBPR è quindi integrato con un fermentatore acidogenico per la produzione di VFA, indispensabili al metabolismo dei batteri PAO. Il sistema permette potenzialmente di ridurre l'uso di reagenti chimici del 25-50% e di migliorare la qualità del fango di supero, rendendolo più idoneo ai processi di recupero successivi. A Milano Nosedo, MM sta validando lo stesso approccio alla scala pilota, permettendone l'integrazione a layout di processo e capacità depurative differenti.

Linea fanghi: produzione di sali di fosfato

Il fosforo presente nei fanghi di depurazione può essere recuperato sotto forma di sali di fosfato ad alto valore. Presso l'impianto di Sesto San Giovanni, Gruppo CAP gestisce un impianto dimostrativo dedicato alla precipitazione controllata dei sali di fosfato. Il



processo prevede una fase preliminare di fermentazione anaerobica acidogenica, durante la quale il fosforo si solubilizza. Lo stream liquido in ingresso all'impianto dimostrativo è costituito dalla frazione liquida generata dalla disidratazione meccanica dei fanghi uscenti dal reattore di fermentazione. Questo, ricco di fosforo solubilizzato, viene poi inviato alla fase di precipitazione tramite aggiustamento del pH e controllo delle condizioni di cristallizzazione, seguito da una fase di

sedimentazione del precipitato e successiva separazione della fase solida ricca in sali di fosfato. Il precipitato costituisce una matrice ricca in fosforo, sali minerali e carbonio organico. L'obiettivo è ottenere un prodotto conforme alla categoria CMC12 del Regolamento (UE) 2019/1009, che disciplina le caratteristiche dei fertilizzanti ricavati da processi di recupero. Le attività sperimentali includono analisi chimiche, test merceologici e valutazioni di conformità, affiancate da una valutazione tecnico-economica del processo, volta a stimarne la fattibilità operativa e i costi associati, con l'ambizione di creare un prodotto pronto per la commercializzazione nel settore dei fertilizzanti.

Linea ceneri: estrazione chimica e scambio ionico

Il recupero del fosforo dalle ceneri di mono incenerimento rappresenta un'opportunità strategica, poiché queste matrici contengono il fosforo in forma altamente concentrata. L'Università di Bologna coordina lo sviluppo di un processo innovativo che combina lisciviazione acida e scambio ionico per migliorare resa e sostenibilità. L'obiettivo è sviluppare un processo di scambio ionico per la rimozione del fosforo e dei cationi Ca²⁺,

Al³⁺, Fe²⁺ e Fe³⁺ dalla corrente acida post-estrazione, con la duplice finalità di riutilizzare l'acido in diversi cicli di estrazione fosforo e scambio ionico, così da ridurre il consumo netto e la produzione di rifiuti complessivamente associata all'estrazione del fosforo. In particolare, la fase di lisciviazione consente di trasferire il fosforo in soluzione, mentre lo scambio ionico permette di rimuovere selettivamente metalli indesiderati e rigenerare l'acido impiegato. Il residuo sarà quindi riutilizzato nel processo di estrazione del fosforo dalle ceneri. Ciò riduce drasticamente i consumi di reagenti e i volumi di rifiuto prodotti. L'obiettivo di NEOFOS è dimostrare che il processo può essere reso economicamente competitivo, con un consumo di acido inferiore a 5 L per kg di fosforo recuperato. Inoltre, le correnti ottenute dalla periodica rigenerazione delle colonne di scambio ionico saranno miscelate in diverse proporzioni per verificare la possibilità di far precipitare sali di fosfato, ottenendo così un prodotto utilizzabile per la produzione di fertilizzanti.

Modellazione, digitalizzazione e supporto decisionale

La modellazione avanzata sviluppata dal Politecnico di Milano si basa su modelli dinamici a scala di impianto che permettono di simulare il comportamento del processo biologico in differenti condizioni operative e di valutare i principali KPI di processo, confrontando scenari alternativi. Tali strumenti consentono di ridurre i tempi di sperimentazione, prevedere gli effetti delle modifiche di processo e supportare sia le decisioni operative sia la pianificazione degli investimenti futuri.

La digitalizzazione, integrata attraverso sensori e sistemi di monitoraggio, assicura un controllo continuo dei parametri critici. Questo approccio abilita una transizione verso depuratori sempre più automatizzati e ottimizzati.

Scalabilità e sostenibilità

NEOFOS non si limita a validare tecnologie innovative, ma ne valuta anche l'impatto ambientale, economico e normativo. Gli studi LCA e CBA condotti da UNIBO e CAP permettono di confrontare i processi di recupero con le soluzioni tradizionali, evidenziandone vantaggi e potenziali criticità. Attraverso l'analisi LCA si intende valutare l'impronta ambientale complessiva delle soluzioni proposte, considerando da un lato gli impatti aggiuntivi legati al processo, ai suoi consumi energetici e alle filiere di approvvigionamento dei reagenti e dall'altro i benefici legati alla produzione di fertilizzante (o co-prodotto a base fosforica) e alla sostituzione di prodotto equivalente ottenuto a partire dalla materia prima minerale. Parallelamente, la CBA consentirà di stimare in via preliminare costi e benefici economici associati alle soluzioni proposte, fornendo indicazioni sulle voci di spesa più rilevanti e sulle possibilità di ritorno dell'investimento. Tra gli obiettivi rientra anche la valutazione del potenziale di industrializzazione dei processi e della loro scalabilità e replicabilità attraverso l'analisi degli elementi caratterizzanti delle tecnologie implementate e del contesto di riferimento. A questo scopo, il Masterplan sviluppato con MM e POLIMI delinea le condizioni necessarie per implementare le tecnologie su scala metropolitana. Questo

documento individua investimenti, priorità operative e requisiti normativi, facilitando la scalabilità delle soluzioni.



In conclusione, NEOFOS propone una nuova visione per il ciclo idrico urbano, in cui gli impianti di depurazione assumono un ruolo centrale nella produzione di materie prime seconde strategiche. Gli sviluppi introdotti non solo riducono la dipendenza dal fosforo importato, ma affrontano direttamente una delle sfide più complesse del settore: integrare tecnologie innovative in sistemi esistenti, garantendo continuità operativa, sostenibilità economica e piena conformità normativa. La natura stessa delle attività progettuali, che combinano sperimentazione in condizioni reali, modellazione avanzata e percorsi autorizzativi, evidenzia il carattere sfidante dell'iniziativa. Il progetto si colloca in un terreno in cui innovazione tecnologica, regolazione e sostenibilità devono procedere in modo coordinato: un equilibrio non banale, che richiede competenze multidisciplinari e una forte collaborazione tra utility e mondo accademico. NEOFOS vuole dimostrare che, anche in un contesto complesso, è possibile generare soluzioni replicabili, resilienti e in grado di contribuire alla costruzione di un ciclo idrico realmente circolare.

