

Materie Prime: la principale criticità in Europa per la transizione energetica

Nunzia Bernardo, Omar Perego RSE

Le tecnologie abilitanti per la transizione energetica in Europa affrontano problemi di disponibilità di materie prime. RSE supporta il Tavolo Nazionale Materie Prime Critiche con attività di ricerca su processi sostenibili di approvvigionamento

Introduzione

L'Europa persegue obiettivi sfidanti legati al processo di decarbonizzazione e digitalizzazione del sistema energetico. La transizione energetica, ecologica e digitale di questo processo passa attraverso lo sviluppo di nuove tecnologie, processi e sistemi innovativi, in grado di limita-

re o annullare le emissioni di carbonio. Una strada è quella dell'elettificazione da fonti rinnovabili, in servizi come la mobilità, il riscaldamento, la produzione industriale.

Le tecnologie di transizione energetica contengono ciascuna materie prime (MP) considerate critiche e/o strategiche dalla stessa Unione Europea (UE). La lista delle materie prime critiche (MPC) e strategiche è riportata nel documento della Commissione Europea (CE) *Study on the Critical Raw Material for the EU (2023)* [1].

Le Materie Prime sono definite Critiche in base a due indicatori (**figura 1**): importanza economica (*Economic Importance - EI*) che misura l'importanza di un determinato materiale nell'UE per le varie applicazioni di usi finali in cui

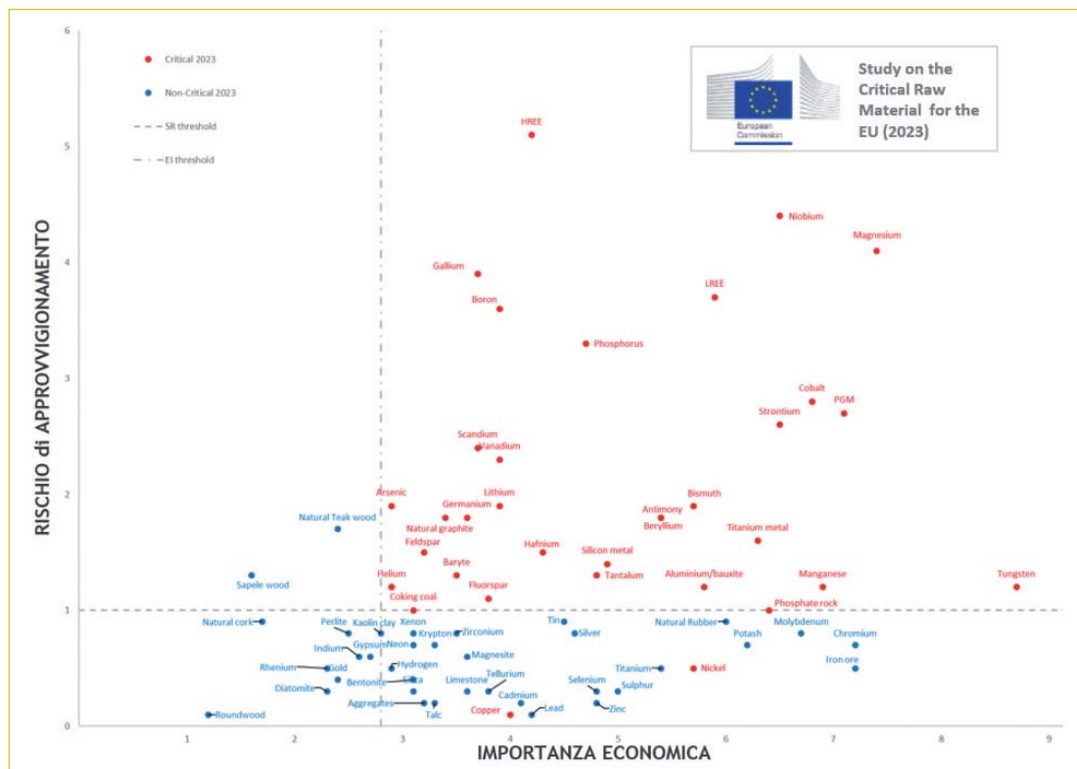


Figura 1
Distribuzione delle materie prime critiche e strategiche e indicatori di criticità definiti a livello europeo [1] Criticality Assessment della CE

è impiegato (il calcolo è fatto considerando anche le prestazioni di materiali sostituiti disponibili per queste applicazioni); rischio di approvvigionamento (*Supply Risk* - SR) che misura il rischio di interruzione della fornitura di un materiale specifico e tiene conto della fornitura globale e del mix di paesi di provenienza UE, della dipendenza dalle importazioni extra UE, della governance dei paesi fornitori, delle restrizioni commerciali e accordi, della disponibilità e criticità dei sostituti.

La distribuzione delle MP secondo i due indicatori descritti è mostrata nel grafico di **figura 1**. Le materie prime critiche sono evidenziate da punti rossi e si trovano all'interno della zona di criticità del grafico ($SR \geq 1,0$ e $EI \geq 2,8$ arrotondato a un decimale). Rame e nichel non superano le soglie di criticità, ma sono inclusi nella lista delle materie prime strategiche. Queste, rappresentate per la prima volta nella lista aggiornata delle MPC [1], sono definite tali in quanto rivestono un ruolo chiave per l'Europa e per il raggiungimento degli obiettivi fissati dall'Accordo di Parigi [2], a causa del loro massiccio impiego nelle tecnologie chiave per la transizione energetica. I punti blu rappresentano le materie prime non critiche.

Gli indicatori di criticità sono molto legati a concetti chiave dell'industria, in quanto connessi a domanda e offerta di MP e all'ottenimento di canali sicuri di approvvigionamento.

Lo studio della CE sulle MPC si inserisce in un contesto generale di profonda consapevolezza dell'importanza che le materie prime ricoprono nella società, nella sua evoluzione economica, sociale e industriale.

Lo studio è, infatti, parte di un'azione lanciata per la prima volta nel 2008 con l'Iniziativa UE sulle materie prime (*Raw Materials Initiative* - RMI), ma la vera consapevolezza legata alla difficoltà di approvvigionamento di MP è emersa fortemente nel 2017, quando l'industria europea ha richiesto l'intervento della CE su un settore fortemente a rischio, quello automobilistico, che sta perdendo il vantaggio competitivo nel passaggio dal motore termico a quello elettrico con la decisione di elettrificare i trasporti. Se prima la costruzione del motore termico era in capo alle aziende automobilistiche europee, ora le batterie e lo stesso motore elettrico sono tecnologie che vedono un impiego ingente di MPC per le quali l'Europa è fortemente dipendente dalle importazioni con una supremazia asiatica e nordamericana. È da questa esigenza che nasce la *European Battery Alliance* (EBA) [3], un'iniziativa

a forte spinta industriale per la costruzione di fabbriche europee di batterie. EBA raggruppa tutti gli *stakeholder* del mondo delle batterie (la stessa CE, i paesi dell'UE, l'industria e la comunità scientifica) con lo scopo di rendere l'Europa un leader globale nella produzione e nell'uso sostenibile delle batterie. Sotto questa spinta, nel 2018 la Commissione ha adottato un piano d'azione strategico per le batterie [4], definendo un quadro completo di misure normative e non normative per supportare tutti i segmenti della catena del valore delle batterie, identificando 6 aree prioritarie di intervento di cui la prima "*securing access to raw materials for batteries*" riguarda proprio l'approvvigionamento sostenibile di MP.

Oltre al settore automobilistico, altri settori hanno avvertito il problema delle MPC. Il 2023 è stato un anno che ha visto la redazione di diversi documenti di analisi e regolatori su diversi settori e per diverse tecnologie. In ognuno di essi il problema delle MPC è centrale. Oltre allo studio della CE sulle MPC [1], è stato pubblicato il documento dell'*International Energy Agency* (IEA) sul potenziale delle tecnologie energetiche [5] e sono stati pubblicati, in consultazione, il regolamento batterie [6], il *Net-Zero Industry Act* (NZIA) [7] e il documento cardine sulle MPC, il *Critical Raw Material Act* (CRMA) [8]. Quest'ultimo pone obiettivi sfidanti sull'approvvigionamento di MPC per l'UE. Stabilisce che entro il 2030:

- almeno il 10% delle materie prime critiche consumate nell'UE dovrà essere estratto da miniere europee;
- almeno il 40% delle materie prime critiche consumate nell'UE dovrà essere lavorato (raffinato) in Europa;
- almeno il 25% delle materie prime critiche consumate nell'UE dovrà arrivare da attività di recupero e riciclo;
- non più del 65% del consumo annuo dell'UE di ciascuna materia prima critica in qualsiasi fase del processo di lavorazione provenga da un singolo Paese terzo.

L'iter negoziale del regolamento si è concluso con l'accordo e l'approvazione del testo finale da parte delle istituzioni europee in sede di ultimo trilogio, svoltosi il 12 dicembre 2023. Il testo ora dovrà essere formalmente approvato dal Consiglio prima della pubblicazione nella Gazzetta Ufficiale. Il documento ha l'obiettivo di supportare la costruzione di una strategia di approvvigionamento interno di MPC, di creare canali di approvvigionamento sostenibile (sicuro e resiliente) di MPC per l'UE, diversificando le

fonti, stringendo accordi strategici tra i vari Paesi europei e a livello internazionale, mitigando i rischi, investendo in ricerca e innovazione, promuovendo la circolarità. Il processo di definizione del NZIA, invece, è ancora in corso. La proposta di regolamento ha l'obiettivo di contribuire a rafforzare la capacità produttiva di tecnologie a zero emissioni nette in Europa.

È da citare, infine, anche la *Strategic Technologies for Europe Platform* - STEP [9], la risposta europea alla necessità di incrementare gli investimenti nelle tecnologie strategiche per l'Europa.

Attualmente l'approvvigionamento di materie prime critiche in Europa fa capo a pochi paesi. Per fare alcuni esempi, "la Cina fornisce all'UE circa il 98% delle terre rare, la Turchia il 98% del borato, il Sudafrica il 71% del platino e una percentuale ancora più alta per i materiali del gruppo del platino: iridio, rodio, rutenio. Il litio è fornito al 78% dal Cile" [10].

Tavolo nazionale permanente Materie Prime Critiche

L'Europa ha, dunque, dettato linee di indirizzo molto sfidanti che devono essere adottate dai singoli Stati Membri. L'Italia è parte integrante di questo meccanismo di pianificazione e regolamentazione. È, infatti, attivo dal 2021 un Tavolo Nazionale permanente Materie Prime Critiche [11], avviato e gestito da due dicasteri: il Ministero delle Imprese e del Made in Italy (MIMIT) e il Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE). Dal 2023 partecipa ai lavori del Tavolo anche il Ministero degli Affari Esteri e della Cooperazione Internazionale (MAECI).

Nel 2022 sono stati presentati quattro Gruppi di Lavoro (GdL) tematici e nel 2023 è stato attivato il quinto, al fine di lavorare su macro-obiettivi specifici:

- ❑ GdL 1 "Analisi Fabbisogni" - coordinato da Confindustria e RSE - con l'obiettivo di stimare i fabbisogni italiani ed europei attuali e futuri di materie prime critiche, sia diretti che indiretti, analizzando anche il divario tra domanda e offerta.
- ❑ GdL 2 "Mining" - coordinato da ISPRA - con l'obiettivo di identificare le potenzialità per le attività estrattive primarie e secondarie (recupero da rifiuti estrattivi), verificando le possibilità di un'estrazione sostenibile nel territorio italiano, compreso il recupero di materie prime da siti precedentemente abbandonati e da rifiuti minerari.
- ❑ GdL 3 "Ecodesign - Eco-progettazione" - coordinato da ENEA - con l'obiettivo di analizzare le potenzialità della progettazione per ridurre

la domanda di materie prime critiche: partire da una corretta progettazione delle tecnologie può favorire il riuso e il recupero dei componenti e dei materiali a fine vita.

- ❑ GdL 4 "Urban mining" - coordinato da ENEA - con l'obiettivo di stimare il potenziale della cosiddetta "miniera urbana", con un focus sui RAEE, di elaborare proposte normative di semplificazione anche a seguito dell'analisi delle *best practice* a livello europeo e mondiale.
- ❑ GdL 5 "Coordinamento Internazionale" - attivato nel 2023 e guidato direttamente da MAECI - con l'obiettivo di coordinare tutte le iniziative attive a livello italiano, europeo e internazionale (es. *United Nation Environmental Programme* - UNEP [12], *Mineral Security Partnership* - MSP [13]) e per la stipula di accordi di approvvigionamento extra confini.

I contributi attesi dai gruppi di lavoro del Tavolo dovrebbero permettere ai dicasteri competenti di attuare un'adeguata pianificazione delle attività e dei provvedimenti da prendere per un approvvigionamento più sicuro e sostenibile di materie prime critiche, da garantire attraverso processi di estrazione o riciclo, rafforzando il coordinamento sul tema, potenziando la progettualità in termini di sostenibilità degli approvvigionamenti e di circolarità, contribuendo alla creazione delle condizioni normative, economiche e di mercato favorevoli, anche attraverso accordi commerciali coi paesi terzi.

Il GdL 1 è fondamentale per l'analisi dei fabbisogni delle imprese, in quanto queste sono al centro di questa criticità legata alle MPC. Compito del GdL 1 è raccogliere e analizzare i fabbisogni, intesi come domanda di MPC e canali di approvvigionamento attuali e futuri, da estrazione, trasformazione e riciclo. L'analisi dei fabbisogni, insieme ai risultati degli altri GdL del Tavolo MPC, consentirà ai ministeri competenti di definire una strategia nazionale sulle MPC.

Ad oggi poche imprese hanno chiara la criticità legata ai fabbisogni di MP che potrebbe avere proporzioni pari, se non superiori, alla recente crisi del gas. Il tema è ancora poco considerato nella versione a breve termine delle imprese. Il Tavolo MPC ha avviato una campagna di sensibilizzazione, che passa attraverso il coinvolgimento dei media, con conferenze, articoli, diffusione di notizie. Al momento, questa comunicazione vede già una grande partecipazione di esperti del settore, ma non è sufficientemente estesa. Il tema è sentito a livello politico e ciò è confermato dalla presenza in prima linea di MIMIT, MASE e MAECI. Inoltre, lo stes-

so CRMA [8] può essere da stimolo per una reazione più intensa, per effetto di alcuni obblighi imposti dall'atto, come monitoraggio del rischio e gli stress test per le aziende (art. 19) e il *Company Risk Preparedness* (art. 23), o attraverso alcune azioni di supporto, come il *facilitating off-take agreement* (art. 16) e la possibilità di acquisti in comune (art. 24).

In merito al coinvolgimento delle imprese, il GdL 1 con Confindustria, supportata da RSE e dai ministeri competenti, ha avviato una campagna di interviste, partendo dai *big-player* italiani che possono avere maggiore influenza sul mercato di MP, per verificare se questi abbiano chiaramente identificato i propri fabbisogni di MPC, o abbiano già definito propri piani strategici sulle MPC o, viceversa, se sia necessario un intervento per indirizzarli verso la realizzazione degli stessi o un aiuto per fornire loro canali di approvvigionamento sicuri e resilienti.

L'azione di coinvolgimento e supporto è stata estesa alle Piccole e Medie Imprese (PMI), attraverso l'attivazione di organismi territoriali, quali ad esempio i *cluster* e i consorzi, dove risiedono le imprese.

Al momento il focus è sulle imprese che operano nell'ambito delle tecnologie per la transizione energetica (fotovoltaico, batterie, *fuel cell*, elettrolizzatori, componenti di reti elettriche, ecc.) e gli organismi territoriali coinvolti sono i cluster nazionali e regionali di energia e ambiente. Attraverso la rete dei *cluster* si vuole poi estendere l'azione verso altri settori. Tra i consorzi coinvolti in questo processo si citano i consorzi che si occupano di riciclo, quest'ultimo ritenuto un *asset* strategico per l'Italia.

In questo contesto generale di veloce evoluzione del tema delle MPC sotto il profilo geopolitico, economico e sociale si collocano le attività di ricerca e sviluppo, ma anche quelle di supporto alle istituzioni, condotte da RSE.

Materie Prime Critiche nel settore energetico

RSE sviluppa attività di ricerca nel settore elettro-energetico, con particolare riferimento ai progetti strategici nazionali, di interesse pubblico generale, finanziati con il Fondo di Ricerca di Sistema (RdS) [14].

Come evidenziato precedentemente, le MP hanno assunto un ruolo centrale in un arco temporale ristretto, rappresentando una delle priorità dell'agenda europea nelle azioni da intraprendere per il raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione e di transizione ecologica e

digitale. Anche per questo motivo, il tema delle MPC è un filone importante delle attività di ricerca di RSE, che si concentra principalmente sull'analisi delle MPC nelle tecnologie chiave per la transizione energetica.

Le attività di ricerca di RSE hanno come obiettivo principale l'identificazione delle opportunità del settore delle MPC in Italia, per poter supportare i decisori politici nella costruzione di strategie interne e catene di approvvigionamento strutturate e resilienti.

Ma quali sono le materie prime impiegate nelle tecnologie energetiche, in riferimento all'attuale stato tecnologico? E quali sono soggette a *criticality*, in termini di *Economic Importance e Supply Risk*? Da questi quesiti scaturisce la ricerca di RSE.

RSE parte dalla definizione di una lista di tecnologie energetiche, redatta in funzione del loro attuale utilizzo, delle previsioni di impiego per il raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione secondo diversi scenari stabiliti dalle agenzie internazionali (come la IEA) e, infine, in base agli obiettivi contenuti nei programmi ricerca di RSE.

La lista contiene dieci tecnologie energetiche, oggetto di studio in RSE:

1. Fotovoltaico delle principali tecnologie consolidate ed emergenti, a base di Silicio (eterogiunzione, Contatto Posteriore Interdigitato, *Passivated Emitter and Rear Cell*, Tandem Si-perovskite);
2. Solare termodinamico;
3. Accumulo elettrochimico (ioni litio - anche stato solido, ioni sodio, *Vanadium Redox Batteries*) per applicazioni stazionarie e di mobilità;
4. Componenti di reti elettriche (conduttori per alta e media tensione, interruttori, compensatori sincroni, isolatori);
5. Elettronica di potenza (convertitori DC/AC e DC/DC);
6. Motori elettrici per autoveicoli;
7. Geotermia per la produzione elettrica e termica;
8. Elettrolizzatori di tecnologia alcalina, PEM e SOEC;
9. Fuel Cell per uso veicolare e stazionario;
10. Produzione di combustibili e carburanti di sintesi da fonti rinnovabili



Figura 2 Campi di analisi della criticità delle materie prime impiegate nelle tecnologie energetiche

e idrogeno (produzione di ammoniaca da fonti rinnovabili).

Per tali tecnologie, RSE mira ad analizzare la criticità delle materie prime, coprendo l'intera catena del valore, dall'*exploration and mining*, considerando tutte le opzioni, dal *mining* tradizionale a quello innovativo e sostenibile, alla sostituibilità delle MPC, considerando eventuali possibili sostituti delle materie prime critiche con altre non soggette a criticità fino alle opportunità di eco-progettazione ed *eco-sign*, progettando e realizzando una tecnologia nell'ottica del suo riuso o riciclo, per poi arrivare alle poi arrivare alle potenzialità del riciclo dalle sorgenti dell'*urban mining*, chiudendo così il cerchio della circolarità (figura 2).

Materie prime critiche per le batterie

A titolo di esempio si riporta l'analisi di dettaglio svolta per la tecnologia di accumulo elettrochimico.

Le batterie agli ioni di litio (LIB) sono impiegate in numerosi tipi di applicazioni, ma lo sviluppo e la diffusione sono sicuramente guidati dalla domanda via via crescente nella mobilità elettrica (*Electric Vehicle - EV*), nell'uso stazionario (es. accumulo di energia per autoconsumo domestico o utilizzo per servizi alla rete) e per l'utilizzo nei dispositivi elettronici portatili.

Una caratteristica chiave per le batterie è la chimica catodica, che determina sia le prestazioni della batteria che la sua domanda di materiale. Per le applicazioni in ambito *automotive* attualmente le categorie di catodo più diffuse sono tre: ossido di litio nichel manganese cobalto (NMC); ossido di litio nichel cobalto alluminio (NCA); litio ferro fosfato (LFP). I catodi NMC e NCA sono diventati sempre più dominanti, poiché garantiscono le maggiori prestazioni in termini di densità di energia.

Le batterie agli ioni di litio utilizzate nei veicoli elettrici e per l'accumulo di energia sono composte da celle contenute in moduli all'interno del pacco batteria. Le celle in genere rappresentano dal 70% all'85% del peso totale della batteria [15] e contengono diverse MPC nel materiale catodico (es. litio, cobalto, nichel e manganese), nell'anodo (es. grafite naturale) e nel collettore di corrente (es. rame). I restanti moduli e componenti del pacchetto sono costituiti principalmente da alluminio, acciaio, refrigeranti e parti elettroniche.

A seconda del tipo di catodo presente, la richiesta di MPC nella batteria varia considerevolmente:

le batterie NMC, per esempio, richiedono quasi otto volte più cobalto e la metà di nichel rispetto alle batterie NCA. Le batterie LFP non richiedono nichel, cobalto o manganese, ma richiedono circa il 50% in più di rame rispetto alle batterie NMC.

Tra i più promettenti sostituti del litio in alcune applicazioni elettrochimiche è il sodio (Na) e, in particolare, l'opzione più praticabile è la tecnologia a ioni Na. Dal punto di vista energetico, le celle a ioni Na, presentate da alcuni produttori (es. CATL) hanno poco più della metà della densità energetica di quelle a ioni Li ad alto contenuto di nichel [15] e, pertanto, non sono per ora utilizzate per applicazioni ad alta densità di energia (es. nei veicoli elettrici) [16].

Il vantaggio fondamentale delle batterie agli ioni Na (NIB) rispetto a quelle LIB è che si basano su minerali abbondanti e a basso costo (sodio, ferro, azoto e carbonio) [15]. Inoltre, è richiesto meno rame, poiché gli ioni Na possono utilizzare collettori di corrente anodica in alluminio, a differenza degli ioni Li che lega con l'alluminio. Attualmente non ci sono ancora catene di approvvigionamento di materiali catodici e anodici per le NIB. Le principali incertezze sulla diffusione delle batterie a ioni Na sono la scalabilità dei processi di produzione di questi materiali e il tempo necessario per sviluppare una catena di approvvigionamento su scala industriale, anche se grazie alla somiglianza tra ioni Na e ioni Li, dovrebbe essere relativamente semplice adattare le attuali fabbriche alla produzione di celle agli ioni Na.

L'esercizio svolto per la tecnologia "batterie" è stato replicato per tutte le altre tecnologie energetiche citate in precedenza. Da questa analisi, RSE ha identificato una lista di 15 materie prime critiche e strategiche, di importanza rilevante per le tecnologie energetiche: Na, Mn, Cu, Fe, V, Si, Ti, Al, Ni, Co, F, P, Ge, Sn e grafite naturale (C). Per ogni materia prima sono stati approfonditi i tre macro-temi sopra citati (approvvigionamento, sostituibilità e riciclo) che coprono l'intera *value chain* di tali risorse. Sono state evidenziate tutte le caratteristiche geominerarie principali, nonché la relativa produzione (estrazione e *processing*) sia alla scala europea che mondiale; nello specifico sono stati approfonditi i seguenti aspetti:

- profilo generale;
- geologia ed esplorazione;
- *mining*, *processing* e metallurgia estrattiva;
- risorse e riserve;
- produzione europea;
- canali di approvvigionamento europei;

- produzione nel mondo;
- aspetti economici e *supply risk*;
- sostituibilità;

Il prodotto principale di tale attività è rappresentato dalle “Schede tecniche dei materiali”, contenute nel documento RSE “Criticità dei materiali per batterie: monitoraggio, grado di sostituibilità, fattibilità di processi di riciclo, analisi geologiche e geo-minerari” [16].

Siti minerari italiani

Parte dell'attività di ricerca di RSE è finalizzata all'analisi e all'aggiornamento del potenziale minerario italiano, inteso in termini di siti minerari presenti sul territorio nazionale.

I siti minerari forniscono un ventaglio di minerali potenzialmente estraibili sul territorio, che potranno poi entrare nella catena del valore delle diverse applicazioni industriali.

Nelle valutazioni di RSE ci si è concentrati sui siti italiani attivi e dismessi che hanno prodotto o producono materie prime contenute nella lista dei quindici materiali identificati. L'attività mira alla valorizzazione del potenziale minerario italiano in ottica futura di ripristino o di nuovi sviluppi di attività minerarie domestiche.

La ricerca ha messo in evidenza che non sono attualmente in corso attività estrattive di MPC metalliche, per le quali l'Italia è completamente dipendente dalle importazioni. Tuttavia, l'assenza di attività produttive in corso non implica l'assenza di tali materiali nel sottosuolo italiano. In passato, infatti, l'attività estrattiva italiana ha coinvolto una serie di minerali metallici, attualmente considerati critici e/o strategici dalla Commissione Europea. La fluorite (*Fluorspar* in **figura 1**) risulta essere l'unica materia prima critica attualmente in coltivazione in Italia. La sua presenza si rinviene anche in Sardegna nella miniera di Silius, dove risulta anche la presenza di quantitativi interessanti di terre rare.

RSE ha raccolto e rielaborato, grazie anche alle banche dati disponibili sul sito dell'Istituto Superiore per la Protezione Ambientare (ISPRA) [17], informazioni sui siti minerari italiani, individuando anche la tipologia di minerale estratto, distinguendo le informazioni per ogni regione, per un totale di 2684 siti minerari (attivi e dismessi) distribuiti su tutto il territorio nazionale [15].

Mining innovativo: geothermal brine mining

RSE sta anche valutando il potenziale di un *mining* innovativo, quello dei fluidi geotermici italiani (*geothermal brine mining*), essendo l'Italia, per le sue caratteristiche e peculiarità geologiche e geodinamiche, una delle potenze geotermiche del Mediterraneo, nonché la prima nazione al mondo a produrre energia elettrica dalla geotermia.

Il *target* principale di tale ricerca è il litio, elemento introdotto nella lista delle materie prime critiche pubblicata nel 2020 dalla Commissione Europea. Visto il ruolo chiave e strategico di questo elemento, RSE ha introdotto una serie di attività per verificarne la possibilità di un recupero sostenibile e alternativo, focalizzando l'attenzione sui fluidi geotermici. Sono stati approfonditi i contesti geologici e geochimici associati a brine geotermiche di campi noti nel mondo, per poi arrivare al contesto europeo e italiano, definendone, ove possibile, le potenzialità [16].

Il litio si trova in tre tipi principali di depositi: salamoie (continentali e geotermiche), argille alterate idrotermicamente (depositi sedimentari) e pegmatiti (roccia dura cristallina - *hard rock*). I minerali contenenti litio so-

no principalmente fosfati e complessi alluminosilicati [18] e quelli commercialmente importanti includono spodumene, lepidolite, petalite e amblygonite. Attualmente, le principali fonti commercialmente utili di litio sono gli *hard-rock deposits* pegmatitici in Australia e Cina e depositi di salamoia in Argentina, Cile e Cina [19, 20], ma le salamoie ricche di litio sono la fonte di Li più economicamente recuperabile e ambientalmente sostenibile del pianeta. Ma come e perché i fluidi geotermici possono contenere materie prime utili per l'estrazione? In generale i fluidi geotermici sono presenti a profondità elevate nella crosta terrestre e hanno temperature elevate. La loro presenza per milioni di anni nel sottosuolo fa sì che essi possano arricchirsi in minerali e metalli diversi a seconda della litologia della roccia serbatoio (*reservoir* geotermico) con la quale sono a contatto e dalla quale, in funzione della temperatura e del pH, possono lisciviare materiali di diverso tipo. I fluidi risultanti possono essere significativamente diversi, sia in pH che in salinità. Per questo il chimismo associato a brine geotermiche può essere molto variabile a seconda del contesto geologico in cui le brine si concentrano o si muovono [16].

In alcuni casi, come i fluidi geotermici della California, i quantitativi di materie prime presenti possono essere tali da supportare un'esplorazione e un'estrazione sostenibile dal punto di vista economico. Va precisato che nelle ricerche di RSE lo scopo è di combinare la produzione energetica da fonte geotermica con la produzione di materie prime. A valle della produzione energetica, dopo aver ceduto il suo calore, il fluido passa attraverso un circuito che separa le materie prime in esso presenti rispetto alla matrice fluida, per poi essere reiniettato in profondità nel serbatoio di provenienza. Da qui, il ciclo ricomincia. Il processo appena descritto risulta molto ben integrato nella sostenibilità ambientale, essendo la fonte geotermica una risorsa rinnovabile, flessibile e programmabile. In **figura 3** è rappresentato un processo di estrazione di litio da fluidi geotermici [21].

L'analisi e gli approfondimenti sul chimismo dei fluidi per ricostruire il chimismo che li caratterizza si è svolta dapprima alla scala mondiale, per poi arrivare alla ricostruzione delle informazioni presenti a livello europeo e, infine, italiano.

Con riferimento alle brine geotermiche analizzate in Nord America e, in particolare, alle brine geotermiche del Salton Sea in California [16], nelle quali è stato stimato un contenuto in litio di 200 mg/l, si nota l'ampia associazione di minerali riscontrati: molti di essi, come Na, Fe, Mn,

F, Al, Cu, Si, sono già considerati nella lista dei 15 materiali di interesse individuati da RSE.

Passando al contesto europeo, la bibliografia e i progetti analizzati riportano l'attenzione su alcune aree in Germania, Svizzera e Francia in cui sono in corso valutazioni per la stima di contenuto - promettenti - di litio in alcuni fluidi presenti nel sottosuolo in reservoir geotermici. In queste aree, sono in corso progetti anche avanzati che mirano alla produzione di materie prime da fluidi geotermici [16].

Stringendo il campo al contesto italiano, va precisato che la ricerca è ancora in fase embrionale, a eccezione di alcuni permessi di ricerca già presentati dalla società ENERGIA MINERALS nell'area di Campagnano (Lazio) [22].

La ricerca di RSE per l'area italiana si è concentrata sull'analisi dei dati esistenti di sorgenti geotermiche italiane, analizzando dati chimico-fisici e fisici associati, nonché le informazioni geologiche del serbatoio di provenienza. Quest'ultima informazione consente di effettuare delle ipotesi sul possibile arricchimento di litio o di altri minerali critici e strategici in fluidi geotermici presenti in zone geologicamente, geodinamicamente e litologicamente simili presenti nel sottosuolo italiano.

Sono state individuate 57 sorgenti in aree geotermicamente attive sul territorio nazionale. Le aree italiane più promettenti dal punto di vista del potenziale di litio in brine geotermiche sono la Toscana, l'alto Lazio e la Campania [16], in coerenza con i risultati prodotti da diversi progetti europei, tra cui EuGeLi - *European Geothermal Lithium brine* di ERAMET [23], ma dalla ricerca di

RSE emerge che vi sono potenzialità interessanti per lo sviluppo anche in Sardegna e in Sicilia.

Per tutte queste aree, le tipologie di fluidi coinvolti variano a seconda della zona, e in particolare [16]:

- nell'alto Lazio, nella zona del Lago di Bolsena, sono presenti brine ad alta temperatura con potenziale elevato [24];
- nell'area Toscana, tradizionalmente geotermica, dove si coltiva risorsa geotermica per la produzione di energia elettrica da oltre un secolo con fluidi ad alta temperatura, sono presenti graniti ricchi di biotite minerale con elevate quantità di litio; in questo caso, una potenziale coltivazione di litio potrebbe derivare dall'iniezione ed estrazione di acqua all'interno di questi serbatoi granitici caldi. Una volta in profondità, infatti, il fluido si riscalda a contatto con le rocce che presentano temperature elevate a causa del gradiente geotermico anormale, lisciviano litio e altri minerali dalle rocce e vengono riportati in superficie dove, poi, sono trattati per l'estrazione del litio [16-24].
- altre brine potenzialmente utili all'estrazione di minerali sono state identificate in Sicilia e Sardegna. In questo caso si tratta di fluidi a bassa temperatura ma che "sorprendentemente presentano delle quantità considerevoli di litio (fino a 200 mg/l)" [24].

La ricerca di RSE prosegue sul tema del recupero di materie prime critiche e strategiche dai fluidi geotermici. Sono in corso, infatti, valutazioni e analisi geochemiche su fluidi geotermici campionati *ad hoc* per gli scopi della ricerca.

Si auspica, per i prossimi anni, di poter effet-

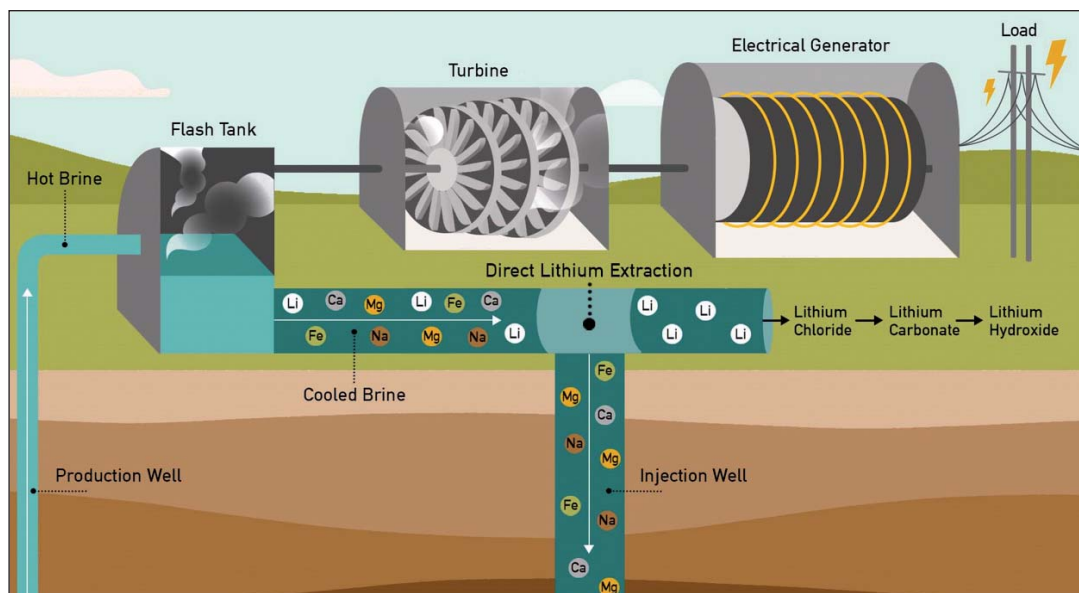


Figura 3 Immagine rappresentativa di un processo di estrazione di litio da fluidi geotermici [21]

tuare analisi con partner industriali diversi, per poter analizzare campioni di diversa provenienza, integrando il chimismo alle informazioni geologiche sito-specifiche delle aree di campionamento e poter replicare tali valutazioni alla scala nazionale.

Urban mining ed economia circolare

RSE segue con attenzione gli sviluppi a livello italiano ed europeo sul tema della circolarità e sulla possibilità di recuperare materie prime critiche e strategiche da fonti provenienti dalle miniere urbane (*urban mining*). A livello europeo sta assumendo importanza rilevante lo studio del potenziale di recupero di materie prime critiche e strategiche dai RAEE - Rifiuti da Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche. Visto il focus sulle tecnologie energetiche, RSE intende avviare le ricerche, stimando il potenziale di recupero di materie prime dai pannelli fotovoltaici dismessi, da cui ricavare silicio che è un elemento importante non solo per il fotovoltaico, ma per molteplici applicazioni, tra cui quelle elettrochimiche: essendo il Si un elemento legante con il Li. L'attività è stata avviata e i risultati nelle stime di potenziale minerario italiano sostenibile e innovativo saranno presto disponibili.

RSE lavora anche su altri ambiti dell'economia circolare. È dal 2021 che con diversi portatori d'interesse ha in essere un accordo di collaborazione, siglato con un *Memorandum of Understanding* [25], sul tema del second life delle batterie. È un'altra forma di sostenibilità, legata al prolungamento della vita utile delle batterie e, quindi, al procrastinare il fabbisogno di MPC.

Conclusioni

Le tecnologie e i processi in grado di abilitare la transizione ecologica e digitale affrontano il problema di approvvigionamento di materie prime critiche e strategiche. Litio, cobalto e grafite naturale nelle batterie, silicio e germanio nei pannelli fotovoltaici, terre rare nei magneti permanenti, rame nei componenti elettrici sono materie prime il cui approvvigionamento è fortemente dipendente da paesi extra europei. L'Unione Europea ha messo in atto azioni per ridimensionare la crisi. Ne sono un esempio i diversi regolamenti (es. regolamento batterie, *Net Zero Industry Act*, *Critical Raw Materials Act*) che pongono il tema delle materie prime critiche al centro dello sviluppo tecnologico e dell'innovazione per la decarbonizzazione di un

settore o per limitare le dipendenze di un intero continente da altri paesi. In particolare, il *Critical Raw Materials Act* pone obiettivi molto sfidanti per l'UE lungo tutta la catena del valore delle Materie Prime Critiche, dall'estrazione, alla raffinazione, all'utilizzo e al riciclo.

Anche l'Italia ha messo in atto un meccanismo virtuoso per definire una strategia nazionale sulle materie prime critiche. Tre ministeri (MI-MIT, MASE e MAECI) gestiscono la governance del Tavolo Nazionale Permanente "Materie Prime Critiche" e coordinano le azioni di cinque gruppi di lavoro che operano su tutta la catena del valore dei materiali: analisi dei fabbisogni delle imprese (domanda e canali di approvvigionamento), identificazione di un mining sostenibile sul territorio nazionale, individuazione di *best practice* di eco-progettazione per ridurre gli sprechi di materiali e favorirne il riciclo e sfruttamento delle "miniere urbane", sempre in ottica di riciclo, considerato un *asset* importante per il nostro paese. Si aggiungono ulteriori obiettivi sfidanti ai lavori del Tavolo: quello di identificare tutte le iniziative europee e internazionali sul tema (es. quelle promosse dalla *Mineral Security Partnership*) e quello di identificare e ratificare canali di approvvigionamento sicuro e sostenibile con altri paesi UE o terzi.

RSE è in prima linea su questi temi, sia nel suo compito direttamente a supporto dei lavori del Tavolo, essendo co-coordinatore del GdL 1 sui fabbisogni delle imprese oltre che partecipando attivamente ai lavori di altri GdL, sia attraverso le proprie attività di ricerca sul tema che esplorano l'intera catena del valore dei *raw material*, con un *focus* sui materiali per la transizione energetica, ossia quei materiali critici presenti nelle tecnologie abilitanti la decarbonizzazione e digitalizzazione del sistema energetico.

RSE sta sondando a livello geologico le potenzialità delle miniere attive o dismesse in Italia, anche grazie al confronto continuo con altri enti di ricerca coinvolti operanti nel settore delle Materie Prime Critiche, come ISPRA. Sta anche individuando e analizzando opzioni di *mining* potenzialmente più sostenibili, come l'estrazione di metalli (tra cui il litio) dalle brine geotermiche. Questa attività è condotta anche sperimentalmente con analisi di laboratorio per caratterizzare alcune brine e per trovare processi più efficienti per la loro raffinazione. Sta, inoltre, approcciando alle miniere urbane, collaborando con consorzi che lavorano nella valorizzazione dei prodotti a fine vita.

Il percorso è critico: nella visione a breve termine, le imprese non percepiscono ancora l'esi-

genza di valutare internamente le *supply chain* e verificare possibili alternative in casi di interruzioni delle forniture. La collaborazione nel Tavolo Materie Prime Critiche (gestito da tre dicasteri - MIMIT, MASE e MAECI) tra istituzioni, imprese e organismi di ricerca dovrebbe tradursi nella definizione di un piano strategico per mi-

tigare la crisi in corso e proporre soluzioni sostenibili e sicure di approvvigionamento. Tra queste, non saranno trascurate le proposte formulate dalla ricerca condotta nel nostro paese sul *mining* geotermico e su iniziative sul riuso e riciclo che possono creare valore in un processo virtuoso di Economia Circolare.

ACRONIMI

DESCRIZIONE

AC	<i>Alternating Current</i>
CE	Commissione Europea
CRMA	<i>Critical Raw Materials Act</i>
DC	<i>Direct Current</i>
EBA	<i>European Battery Alliance</i>
EI	<i>Economic Importance</i>
ENEA	Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile
EV	<i>Electric Vehicle</i>
GdL	Gruppi di Lavoro
GSE	Gestore Servizi Energetici
IBC	Contatto Posteriore Interdigitato
IEA	<i>International Energy Agency</i>
ISPRA	Istituto Superiore per la Protezione Ambientale
LFP	Litio-Ferro-Fosfato
LIB	Lithium-Ion Batteries
MAECI	Ministero degli Affari Esteri e della Cooperazione Internazionale
MASE	Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica
MIMIT	Ministero delle Imprese e del Made in Italy
MP	Materie Prime
MPC	Materie Prime Critiche
MPS	Materie Prime Strategiche
MSP	<i>Mineral Security Partnership</i>
NCA	Nichel-Cobalto-Alluminio
NIB	<i>Sodium-Ion Batteries</i>
NMC	Nichel Manganese Cobalto
NZIA	<i>Net Zero Industry Act</i>
PEM	<i>Proton-Exchange Membrane</i>
PERC	<i>Passivated Emitter and Rear Cell</i>
PMI	Piccole e Medie Imprese
RAEE	Rifiuti da Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche
RdS	Ricerca di Sistema
RMI	<i>Raw Materials Initiative</i>
RSE	Ricerca sul Sistema Energetico
SOEC	<i>Solid Oxide Electrolyzer Cell</i>
SR	<i>Supply Risk</i>
STEP	<i>Strategic Technologies for Europe Platform</i>
UE	Unione Europea
UNEP	<i>United Nation Environmental Programme</i>

bibliografia

- [1] **European Commission:** Study on the Critical Raw Material for the EU 2023 - final report, *Publications Office of the European Union*, 16 March 2023.
- [2] **Consiglio dell'Unione Europea:** *Accordo di Parigi sui cambiamenti climatici*, 2015 (online consultato il 06 nov. 2023) <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/climate-change/paris-agreement/>
- [3] **European Commission:** European Battery Alliance, 2017 (online consultato l'01 nov. 2023) https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/strategy/industrial-alliances/european-battery-alliance_en
- [4] **European Commission:** Annex to the communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European economic and social committee and the committee of the regions Europe on the move Sustainable Mobility for Europe: safe, connected and clean, *COM 293 final*, Brussels, 17/5/2018.
- [5] **International Energy Agency:** Energy Technologies prospectives, 2023.
- [6] **Parlamento Europeo e Consiglio:** Regolamento UE 2023/1542 relativo alle batterie e ai rifiuti di batterie, che modifica la direttiva 2008/98/CE e il regolamento UE 2019/1020 e abroga la direttiva 2006/66/CE, *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea L 191/1*, 12 luglio 2023.
- [7] **European Commission:** The Net-Zero Industry Act: Accelerating the transition to climate neutrality, 16 March 2023.
- [8] **European Commission:** Critical Raw Materials: ensuring secure and sustainable supply chains for EU's green and digital future, Brussels, 16 March 2023.
- [9] **European Commission:** Strategic Technologies for Europe Platform, sept. 2022 (online consultato il 12 nov. 2023) https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/eu-budget/strategic-technologies-europe-platform_en
- [10] **MIMIT:** Materie prime critiche: sett. 2023 (online consultato il 12 nov. 2023) <https://www.mimit.gov.it/impresa/competitivita-e-nuove-imprese/materie-prime-critiche/materie-prime-critiche>
- [11] **MIMIT:** Ministero dello Sviluppo Economico e dal Ministero della Transizione Ecologica, Materie prime critiche, gennaio 2021 (online consultato il 2 nov. 2023) <https://www.mimit.gov.it/impresa/competitivita-e-nuove-imprese/materie-prime-critiche/materie-prime-critiche#aggiornamento-tavolo>
- [12] **United Nation Environmental Programme** (online consultato il 12 nov. 2023) <https://www.unep.org/>
- [13] **Mineral Security Partnership** (online consultato il 12 nov. 2023) <https://www.state.gov/minerals-security-partnership/>
- [14] **Ricerca di Sistema:** CSEA, 2000 (online consultato il 14 nov. 2023) <https://www.csea.it/ricerca-di-sistema/>
- [15] **C. Guardamagna, N. Bernardo, M. Balordi:** Impiego delle materie prime critiche nelle tecnologie energetiche e analisi delle potenzialità minerarie del geothermal brine mining e delle urban mining sul territorio italiano (prot. 23007371), *RdS AdP 2022-2024*, Milano, 2023.
- [16] **C. Guardamagna, N. Bernardo:** Criticità dei materiali per batterie: monitoraggio, grado di sostituibilità, fattibilità di processi di riciclo, analisi geologiche e geo-minerari, *RdS AdP 2019-2021 (prot. 21011863)*, Milano, 2021.
- [17] **Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale** (online consultato il 07 nov. 2023) <https://www.isprambiente.gov.it/>
- [18] **B. Tadesse, F. Makuei, B. Albijanic, L. Dyer:** The beneficiation of lithium minerals from hard rock ores: *A review.*, *Miner. Eng.*, vol. 131, p. 170-184, 2019.
- [19] **U.S. Geological Survey:** Mineral Commodities Summary 2021, *Reston, VA, USA*, 2021.
- [20] **US Geological Survey:** Mineral Commodities Summary 2020, *Reston, VA, USA*, 2020.
- [21] **Berkeley National Laboratory:** *Sizing Up the Challenges in Extracting Lithium from Geothermal Brine*, 29 nov. 2021 (online consultato il 14 nov. 2023) <https://newscenter.lbl.gov/2021/11/29/sizing-up-the-challenges-in-extracting-lithium-from-geothermal-brine/>
- [22] **Il Sole 24 Ore:** *Dalla Regione Lazio primi via libera per la ricerca del litio*, 13 feb. 2023 (online consultato il 12 nov. 2023) https://www.ilsole24ore.com/art/dalla-regione-lazio-primi-via-libera-la-ricerca-litio-AEZnaZXC?refresh_ce=1
- [23] **eit Raw Materials:** *EuGeLi: European Geothermal Lithium Brines*, 2019 (online consultato il 7 nov. 2023) <https://eitrawmaterials.eu/project/eugeli/>
- [24] **COSVIG:** *Geotermia: Non solo energia, ma anche il litio sostenibile di cui abbiamo bisogno*, 25 set. 2020 (online consultato il 7 nov. 2023) <https://www.cosvig.it/geotermia-litio/>
- [25] **e_mob:** Conferenza pre-e_mob - *Second life delle batterie*, 14 ott. 2021 (online consultato il 12 nov. 2023) https://emob-italia.it/e_mob-2021/programma-e_mob-2021/conferenza-pre-e_mob-second-life-delle-batterie-14-ottobre/