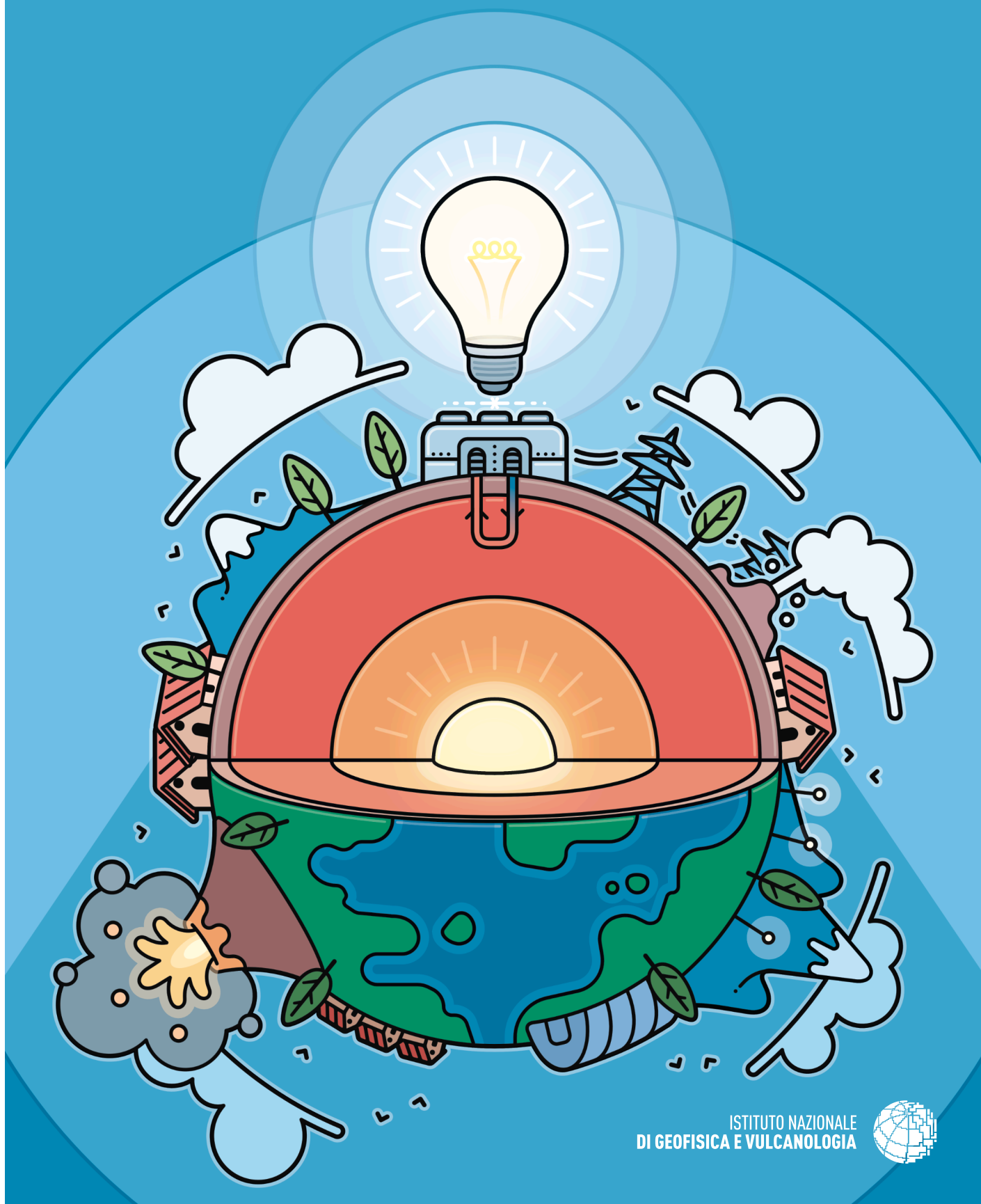


Conosciamo la geotermia

Percorsi educativi per la scuola primaria e secondaria



ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA



Conosciamo la geotermia

Percorsi educativi per la scuola primaria e secondaria

Autrici dei testi

Procesi Monia, La Longa Federica, Cantucci M. Barbara, Maffucci Roberta, Misiti Valeria, Voltattorni Nunzia

Revisione scientifica

Castellano Corrado, Crescimbene Massimo

Illustrazioni e infografiche

Florindo Federico

Progetto grafico

Florindo Federico

Prima edizione: 2025

Versione corrente: 1.1

ISBN: 979-12-80282-22-4

Editore: Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata 605, 00143 Roma

www.ingv.it

Per l'utilizzo, totale o parziale, di immagini, testi o altri contenuti presenti in questo volume, si richiede di riportare la seguente citazione: Procesi, M., La Longa, F., Cantucci M., B., Maffucci, R., Misiti, V., Voltattorni, N., Castellano, C., Crescimbene, M., Florindo, F. (2025) *Conosciamo la geotermia. Percorsi educativi per la scuola primaria e secondaria*. Ed. INGV. ISBN: 979-12-80282-22-4.

Volume realizzato nell'ambito del progetto IRGIE — Inventario delle Risorse Geotermiche delle Isole Eolie.

Il progetto IRGIE è finanziato dal Dipartimento dell'Energia della Regione Siciliana (2023–2026).



INGV



IRGIE
INVENTARIO DELLE RISORSE GEOTERMICHE DELLE ISOLE EOLIE



POC
SICILIA 14-20

Sommario

Prefazione	3
Sezione 1 - Percorsi educativi sulla geotermia	
1 - Introduzione.....	4
2 - Obiettivi formativi	4
3 - Approccio metodologico	5
4 - Linee guida per la costruzione dei percorsi educativi	6
5 - Conclusione.....	12
Sezione 2 - La struttura del pianeta Terra	
1 - Introduzione.....	13
2 - La struttura della Terra	13
3 - Le fonti di calore terrestre	16
4 - Evoluzione geologica dell'Italia e la geotermia	18
Sezione 3 - Principi della geotermia, utilizzi ed esempi in Italia e nel mondo	
1 - Introduzione.....	23
2 - Che cos'è l'energia geotermica? Definizione e origine	23
3 - Dove troviamo le risorse geotermiche?	24
4 - Utilizzi della risorsa geotermica	29
5 - In quali Paesi viene prodotta energia geotermoelettrica: esempi in Italia e nel mondo.....	36
Sezione 4 - Rischi e impatti ambientali associati all'utilizzo della geotermia	
1 - Introduzione.....	40
2 - Strategie di utilizzo per garantire la sostenibilità della risorsa geotermica	40
3 - Rischi e impatti ambientali associati all'utilizzo della geotermia.....	43
4 - Confronto con altre fonti energetiche	52
5 - Esempi di fake news	57
Bibliografia	59
Sitografia	61
Profili.....	62



Prefazione

Questo volume nasce con l'intento di offrire uno strumento educativo flessibile e accessibile a chi lavora ogni giorno nel mondo della scuola per accompagnare bambine, bambini, ragazze e ragazzi alla scoperta della geotermia, ossia l'energia contenuta nel calore terrestre.

È stato realizzato da ricercatrici e ricercatori dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) nell'ambito del progetto IRGIE (2023–2026) finanziato dal Dipartimento Energia della Regione Siciliana, con l'obiettivo di investigare le risorse geotermiche delle Isole Eolie e promuovere la conoscenza dell'energia geotermica come risorsa rinnovabile e sostenibile.

Il testo proposto è rivolto al personale docente delle scuole primarie e secondarie, e intende offrire contenuti scientifici aggiornati insieme a proposte operative adattabili ai diversi gradi scolastici.

L'obiettivo è sostenere percorsi che favoriscano la consapevolezza ambientale ed energetica, la curiosità scientifica e lo sviluppo del pensiero critico. L'energia geotermica rappresenta un'occasione concreta per collegare scienza, territorio e cittadinanza, è un esempio di come il sapere possa diventare strumento per interpretare la realtà e contribuire a un futuro più equo e sostenibile.

Il volume si articola in quattro sezioni. La prima propone un percorso formativo strutturato attraverso attività didattiche pensate per la scuola primaria e secondaria di primo e secondo grado. La seconda introduce i fondamenti scientifici legati alla struttura interna del pianeta Terra e all'origine del calore terrestre. La terza approfondisce la distribuzione delle risorse geotermiche nel mondo e i loro possibili utilizzi a fini energetici. L'ultima sezione è dedicata ai potenziali impatti associati all'uso dell'energia geotermica e alle azioni di mitigazione e monitoraggio adottate, in particolare in Italia. Essa propone anche una riflessione più ampia sul concetto di impatto e rischio, ricordando come ogni scelta — dalla più semplice alla più complessa — comporta inevitabilmente un rischio. Il rischio è parte integrante della vita: non può essere eliminato, ma può essere riconosciuto, compreso e gestito. Questo vale anche per le scelte energetiche: tutte le fonti, rinnovabili e non, presentano effetti, criticità e benefici che devono essere compresi e valutati. Il rischio non può essere eliminato, ma può essere riconosciuto, ridotto e governato attraverso conoscenza, tecnologie adeguate e monitoraggi continui. È nel bilanciamento tra benefici e rischi che si costruisce la consapevolezza delle nostre decisioni.

L'auspicio è che questo strumento possa ispirare progetti formativi appassionanti, attenti alla diversità, all'ambiente e alle generazioni future, e che possa diventare una guida utile per costruire insieme una cultura energetica consapevole.

Monia Procesi

Ricercatrice dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia



Sezione 1

Percorsi educativi sulla geotermia: proposte didattiche per le scuole primarie e secondarie di primo e secondo grado

A cura di Federica La Longa

1 - Introduzione

La prima sezione del volume ha l'obiettivo di fornire ai docenti delle scuole primarie e secondarie di primo e secondo grado, strumenti pratici e teorici per progettare e realizzare percorsi educativi che favoriscano la conoscenza della geotermia tra gli studenti e le studentesse. Gli insegnanti, attraverso il loro ruolo di mediatori, potranno tradurre le conoscenze scientifiche, affrontate nelle sezioni successive, in attività didattiche coinvolgenti e inclusive.



2 - Obiettivi formativi

I percorsi educativi che proponiamo sono strutturati su tre obiettivi principali:

- promuovere l'apprendimento dei concetti fondamentali legati alla geotermia, stimolando negli studenti e nelle studentesse la curiosità scientifica e la consapevolezza delle risorse energetiche disponibili sul proprio territorio;
- favorire lo sviluppo di capacità critica rispetto ai rischi, benefici e aspetti di sostenibilità legati all'uso delle risorse naturali e in particolare geotermiche;
- incentivare la collaborazione attiva tra docenti, studenti/studentesse, famiglie e comunità scientifica.



3 - Approccio metodologico

Il percorso educativo suggerisce un approccio multidisciplinare e interdisciplinare, che consente di integrare i contenuti della geotermia con diverse discipline curriculari come scienze, geografia, educazione civica, storia e tecnologia. Nella tabella 1.1 sono riportati alcuni esempi di collegamenti interdisciplinari. L'insegnante viene visto come un attore protagonista del processo educativo, capace di adattare i contenuti scientifici alla realtà della propria classe. Le attività proposte sono pensate per essere pratiche, esplorative ed espressive, stimolando la creatività degli studenti e delle studentesse, e valorizzando le peculiarità ambientali e culturali del proprio territorio.

<i>Discipline curriculari</i>	<i>Proposte di collegamenti interdisciplinari sul tema della geotermia</i>
Italiano	• Creazione di una rubrica dei termini tecnici relativi alla geotermia e all'energia. • Produzione di brochure e articoli divulgativi destinati al pubblico, con attenzione alla chiarezza e all'efficacia comunicativa. • Analisi di testi giornalistici o scientifici sul tema dell'energia e della sostenibilità.
Arte	• Studio di correnti artistiche legate all'energia e al movimento (espressionismo astratto, pittura d'azione, body art). • Realizzazione di opere grafiche o pittoriche che rappresentino il concetto di calore terrestre, movimento e trasformazione energetica. • Creazione di un logo o manifesto per una campagna informativa sulla geotermia.
Storia	• Approfondimento sugli impianti geotermici in Italia (es. Larderello, primo impianto al mondo). • Analisi del dibattito energetico nel corso del tempo: dalla rivoluzione industriale alle attuali politiche green. • Riflessione sull'evoluzione delle politiche ambientali e delle fonti rinnovabili.
Geografia	• Studio della distribuzione delle risorse geotermiche nel mondo e in Italia. • Analisi delle condizioni geologiche e geografiche che favoriscono la produzione geotermica. • Discussione sulle opportunità e criticità per lo sviluppo della geotermia nel territorio italiano.
Scienze	• Comprensione del funzionamento dei sistemi geotermici (alta e bassa entalpia). • Studio dei processi geologici e termici alla base del calore terrestre. • Analisi del ciclo dell'acqua geotermica e delle sue implicazioni ambientali.

→



Lingua straniera	• Acquisizione del lessico tecnico-energetico in lingua straniera. • Traduzione o produzione di brevi articoli scientifici o divulgativi sulla geotermia. • Presentazioni orali o poster in lingua su fonti rinnovabili e sostenibilità.
Educazione civica	• Discussione sui processi partecipativi nelle scelte energetiche del territorio. • Approfondimento sul rapporto tra sviluppo sostenibile e comunità locali. • Riflessione sull'Agenda 2030, in particolare sull'obiettivo 7: Energia pulita e accessibile per tutti.

Tabella 1.1: esempi di collegamenti interdisciplinari.

4 - Linee guida per la costruzione dei percorsi educativi

Per supportare gli insegnanti nella fase di progettazione dei percorsi sulla geotermia, proponiamo alcune linee guida declinate per i tre ordini di scuola.

Lo schema di lavoro, unico per i tre ordini di scuola, si articola su tre voci:

- gli *obiettivi formativi*, che indicano la finalizzazione dei percorsi all'apprendimento dei concetti base sulla geotermia e la conoscenza delle risorse geotermiche presenti sul proprio territorio;
- le *unità di apprendimento*, che definiscono gli argomenti da sviluppare con gli alunni e le alunne e sono riconducibili a tre temi principali: l'interno della terra, gli elementi chiave per comprendere la geotermia, la conoscenza delle risorse geotermiche presenti sul proprio territorio;
- le *proposte di attività*, che rappresentano al tempo stesso le attività per sviluppare le conoscenze e i prodotti finali da condividere con l'intera comunità scolastica e con le famiglie.

Ciò che differenzia i diversi gradi di scuole sono i contenuti delle tre voci, perché sono declinati tenendo conto delle capacità cognitive/affettive che caratterizzano le differenti età degli studenti e delle studentesse della scuola primaria, secondaria di primo e di secondo grado.

Percorsi per la scuola primaria

Nella tabella 1.2 proponiamo uno schema che può essere usato per strutturare il percorso alla scoperta della geotermia, dedicato alla scuola primaria. Lo schema di lavoro, che a una prima osservazione può sembrare molto generico, è frutto di una scelta strategica che pone al centro delle attività il ruolo chiave degli insegnanti, in qualità di esperti di didattica. Con questo intendiamo sottolineare che lo sviluppo e la realizzazione dei percorsi deve essere frutto di una collaborazione attiva tra ricercatori e insegnanti, che attraverso la loro conoscenza ed esperienza didattica, trasformano le conoscenze scientifiche in percorsi di apprendimento, calati sulle esigenze e sul livello di sviluppo cognitivo/affettivo dei bambini presenti nelle diverse classi. Le unità di apprendimento, che definiscono gli argomenti da sviluppare con gli alunni e le alunne della scuola primaria sono riconducibili a tre temi principali: l'interno della terra, gli elementi chiave per comprendere la geotermia e la conoscenza delle risorse geotermiche presenti sul proprio territorio.

Come è mostrato nello schema in tabella 1.2, le proposte di attività vengono organizzate in due blocchi.

Nel primo vengono inserite attività che hanno a che fare con linguaggi propri della fascia di età che va dai 6 ai 7 anni: la drammatizzazione di racconti e l'ideazione e/o illustrazione di storie.

Le proposte del secondo blocco, dedicato alla fascia di età 8-10 anni, rimandano a percorsi interdisciplinari



con crescenti livelli di complessità.

Come ad esempio la realizzazione di un calendario che racconta, attraverso le immagini, il percorso didattico sulla geotermia, svolto dalle classi.

Oppure la realizzazione di percorsi didattici alla scoperta dei miti e leggende sulla geotermia, che consentono di affrontare il tema con un approccio che connette materie scientifiche ed umanistiche.

Un'altra attività che si può realizzare con la classe è quella che parte dall'esplorazione del territorio, alla scoperta dell'attività geotermica, per arrivare alla realizzazione di una mappa. Questa attività consente di costruire una unità di apprendimento trasversale che coinvolge discipline come scienze, geografia, educazione artistica e altre.

Per arrivare infine, alla realizzazione di un prototipo di gioco da tavolo che racconti il percorso dell'energia geotermica dal centro della Terra alle nostre case.

Percorsi educativi per la scuola primaria

Obiettivi formativi

Promuovere nei bambini:

- l'apprendimento dei concetti chiave legati alla geotermia;
- la conoscenza delle risorse geotermiche presenti sul proprio territorio

Unità di apprendimento

Acquisizione di conoscenze sui seguenti argomenti:

- Come è fatta la Terra
- L'energia geotermica:
 - cos'è,
 - dove la troviamo,
 - come funziona,
 - come possiamo utilizzarla.

Proposte di attività

Primo ciclo (6–7 anni)

- Drammatizzazione di racconti, sull'energia che viene dalla Terra;
- Ideazione ed illustrazione di storie sull'uso quotidiano dell'elettricità;

Secondo ciclo (8–10 anni)

- Realizzazione di un calendario
- Percorso informativo creato da studenti da lasciare e appendere nelle scuole;
- Percorsi didattici alla scoperta dei miti e leggende sulla geotermia;
- Esplorazione del territorio alla scoperta dell'attività geotermica e realizzazione di una mappa
- Realizzazione di un prototipo di gioco da tavolo che racconti il percorso dell'energia geotermica: dal centro della Terra alle nostre case (tipo gioco dell'oca).

Tabella 1.2: schema di lavoro per sviluppare i percorsi nella scuola primaria.





Percorsi per la scuola secondaria di primo grado

Per la costruzione dei percorsi dedicati alla scuola secondaria di primo grado proponiamo di seguire lo schema indicato nella tabella 1.3. Per questa fascia di età gli obiettivi formativi, oltre ai concetti di base sulla geotermia e alla conoscenza delle risorse disponibili sul territorio, sono indirizzati ad aumentare le capacità critiche utili a distinguere tra notizie vere e notizie false. Di conseguenza le unità di apprendimento si arricchiscono anche di elementi di conoscenza per esplorare i rischi e gli impatti ambientali connessi all'utilizzo delle risorse geotermiche.

Percorsi educativi per la scuola secondaria di primo grado

Obiettivi formativi

Favorire nei ragazzi:

- l'apprendimento dei concetti chiave legati alla geotermia;
- la conoscenza delle risorse geotermiche disponibili sul territorio;
- sviluppare capacità utili per riconoscere e *smontare* le fake news;

Unità di apprendimento

Acquisizione di conoscenze sui seguenti temi:

- L'interno della Terra e la geologia dell'Italia
- L'energia geotermica: cos'è dove la troviamo, come funziona, come possiamo utilizzarla.
- Dove viene già utilizzata e chi sono stati i primi ad usarla (esempi italiani e stranieri).
- La situazione energetica italiana e le possibili prospettive di utilizzo delle risorse geotermiche.
- Rischi e impatti ambientali associati all'uso e alla produzione della geotermia.
- Mitigazione dei rischi, normativa e sostenibilità delle risorse geotermiche
- Informazioni corrette e fake news (Laboratori di "fact-checking")

Proposte di attività

- Attività all'esterno sul terreno: scopriamo il calore della Terra;
- Coinvolgimento nella produzione di un racconto a fumetti (graphic novel): le risorse geotermiche attraverso la storia

→



- Prodotti e utilizzi della geotermia nella storia (es. preistoria miti e leggende, le terme nell'antica Roma, la geotermia nel medio evo, ecc...)
- Indagine sulla conoscenza dell'energia geotermica e percezione dei rischi associati, attraverso questionari/interviste ai genitori, ai conoscenti, alle figure istituzionali presenti sul proprio territorio
- Realizzazione di giochi linguistici sul tema della geotermia: cruciverba, anagrammi, rebus, ecc...

Tabella 1.3: schema di lavoro per sviluppare i percorsi nella scuola secondaria di primo grado.

Le attività didattiche proposte per questa fascia di età sono progettate per favorire unità di apprendimento integrate, capaci di collegare tra loro diverse discipline e stimolare curiosità, creatività e partecipazione attiva. Di seguito vengono presentate alcune proposte pratiche, pensate per coinvolgere gli studenti e le studentesse in esperienze dirette, cooperative e divertenti:

- *Attività all'esterno per raccogliere le evidenze del calore della terra nel proprio territorio.* Un'attività all'aperto per scoprire insieme le tracce e le evidenze del calore terrestre nel nostro territorio. All'inizio del percorso educativo: si parte dall'osservazione diretta del fenomeno e poi, in classe, si approfondiscono i concetti scientifici sottostanti. Come attività conclusiva: si può usare per raccogliere e mappare le risorse geotermiche locali, dando un significato concreto a quanto appreso lungo il percorso.
- *Produzione di un racconto a fumetti (graphic novel).* I ragazzi, divisi in piccoli gruppi, inventeranno, scriveranno e illustreranno una graphic novel dedicata alle risorse geotermiche. Tutti i gruppi partiranno da alcuni elementi comuni, legati agli aspetti fisici del fenomeno, che dovranno comparire in ogni storia. A ciascun gruppo verrà assegnato un periodo storico diverso in cui ambientare la propria narrazione, esplorando come l'energia della Terra possa essere vissuta e raccontata in epoche diverse. Al termine, tutti i fumetti potranno essere raccolti in un unico volumetto, dando vita a una piccola collana di racconti illustrati.
- *Indagine sulla conoscenza dell'energia geotermica e percezione dei rischi associati.* Gli studenti e le studentesse, organizzati in piccoli gruppi, condurranno un'indagine per rilevare quanto le persone conoscono l'energia geotermica e come percepiscono i rischi legati al suo utilizzo. Le indagini possono essere realizzate tramite questionari o interviste. Ogni gruppo potrà concentrarsi su un diverso target di popolazione, come genitori, amici, coetanei o figure istituzionali locali. L'attività permette di raccogliere dati reali, confrontare diverse opinioni e comprendere meglio il rapporto tra comunità e risorse geotermiche.
- *Realizzazione di giochi linguistici sul tema della geotermia.* Attraverso cruciverba, anagrammi, rebus e altri giochi linguistici, gli studenti e le studentesse potranno apprendere informazioni sulle risorse geotermiche in modo creativo e divertente. Questa attività permette di consolidare le conoscenze e contemporaneamente fare divulgazione scientifica, stimolando fantasia e curiosità.

Percorsi per scuola secondaria di secondo grado

In tabella 1.4 proponiamo lo schema di lavoro pensato per organizzare i percorsi destinati alle scuole secondarie di secondo grado.

Gli obiettivi formativi, rispetto ai due precedenti ordini di scuola, risultano più articolati. Gli studenti e le studentesse, partendo dall'acquisizione di conoscenze sul tema della geotermia e sulla distribuzione delle



risorse sul territorio italiano, potranno sviluppare capacità critiche per riconoscere le fake news e saranno in grado di acquisire specifiche competenze e capacità per diffondere nel proprio territorio conoscenze corrette sull'utilizzo delle risorse geotermiche.

Le unità di apprendimento, di conseguenza, indicano gli argomenti che sarebbe utile sviluppare con le classi per favorire il raggiungimento degli obiettivi.

Percorsi educativi per la scuola secondaria di secondo grado

Obiettivi formativi

Consentire agli studenti di:

- acquisire conoscenze sui concetti chiave legati alle geotermia;
- acquisire consapevolezza della presenza delle risorse geotermiche disponibili sul proprio territorio;
- sviluppare competenze utili per riconoscere le fake news ;
- acquisire capacità utili per veicolare nel proprio territorio conoscenze corrette sull'uso delle risorse geotermiche;
- la conoscenza delle risorse geotermiche disponibili sul territorio;
- sviluppare capacità utili per riconoscere e *smontare* le fake news;

Unità di apprendimento

Acquisizione di conoscenze sui seguenti temi:

- L'interno della Terra;
- Focus sulla geologia dell'Italia;
- L'energia geotermica: cos'è, dove la troviamo, come funziona, come possiamo utilizzarla;
- Dove viene già utilizzata e chi sono stati i primi ad usarla (esempi italiani e stranieri);
- La situazione energetica del proprio territorio e le possibili prospettive di utilizzo delle risorse geotermiche.
- Rischi e impatti ambientali associati all'uso e alla produzione della geotermia.
- Mitigazione dei rischi, normativa e sostenibilità delle risorse geotermiche
- Contrasto alle fake news e divulgazione delle informazioni corrette
- Percorsi per favorire le decisioni e le scelte partecipate.

Proposte di attività

- Realizzazione di una brochure informativa sulle risorse geotermiche rivolta alla cittadinanza;
- Realizzazione di un articolo scientifico (es. sulla rivista INGV Miscellanea) dedicato alla disseminazione delle conoscenze sulle risorse geotermiche.
- Sviluppo di un percorso informativo costruito e gestito dagli studenti e dalle studentesse, da rendere permanente in una scuola a scelta.

→



- Sviluppo di una mappa interattiva sull'utilizzo dell'energia geotermica in Europa.
- Raccolta dei rumors e fake news sulla geotermia e divulgazione delle informazioni corrette (rumor clinic).
- Organizzazione di eventi/attività strutturati su processi partecipativi, che tengano conto delle opinioni e delle scelte condivise con tutti gli attori coinvolti (cittadini, istituzioni, enti locali)

Tabella 1.4: schema di lavoro per sviluppare i percorsi nella scuola secondaria di secondo grado.

Per le scuole secondarie di secondo grado proponiamo attività che pongono grande attenzione allo sviluppo delle capacità di divulgazione scientifica, attraverso metodologie che favoriscono la partecipazione attiva della comunità. Di seguito vengono presentate alcune proposte di laboratori trasversali, pensate per coinvolgere gli studenti e le studentesse in esperienze pratiche, creative e collaborative:

- *Esperimenti sulla conduzione e convezione del calore.* Laboratori scientifici per osservare il trasferimento di energia termica, affrontando in modo pratico e diretto i fenomeni alla base della geotermia.
- *Escursioni in aree geotermiche.* Percorsi didattici con visite guidate in aree geotermiche, per osservare sul campo le caratteristiche e le potenzialità delle risorse geotermiche, quando possibile.
- *Storytelling geotermico.* Percorsi interdisciplinari che prevedono la creazione di racconti illustrati o video, permettendo agli studenti e alle studentesse di esplorare la geotermia in modo narrativo e creativo.
- *Realizzazione di una brochure informativa sulle risorse geotermiche.* Dopo aver acquisito le conoscenze scientifiche sulla geotermia, gli studenti e le studentesse progettano e realizzano una brochure informativa destinata alla cittadinanza, trasformando il sapere in un prodotto comunicativo concreto.
- *Realizzazione di un articolo scientifico.* In questo caso si tratta di finalizzare il percorso didattico alla scrittura di un articolo scientifico dedicato alla disseminazione delle conoscenze sulle risorse geotermiche, da pubblicare su riviste specialistiche come INGV Miscellanea. Questo percorso consente agli studenti e alle studentesse di sperimentare direttamente le attività delle ricercatrici e dei ricercatori, dalla raccolta e analisi delle informazioni alla stesura di un testo scientifico destinato alla divulgazione.
- *Sviluppo di un percorso informativo.* Un progetto interclasse che coinvolge gli studenti e le studentesse nella progettazione e realizzazione di un percorso informativo permanente sulla geotermia all'interno della scuola, creando un'installazione gestita direttamente dai ragazzi.
- *Sviluppo di una mappa interattiva sull'utilizzo dell'energia geotermica in Europa.* Attività finalizzata alla realizzazione di una mappa interattiva, per avere una visione completa della diffusione e dell'utilizzo delle risorse geotermiche in Europa.
- *Raccolta dei rumors e fake news sulla geotermia e divulgazione delle informazioni corrette.* L'avvento dell'era digitale e dei social media ha impresso una accelerazione alla circolazione delle notizie e informazioni e questo, spesso, ha portato come conseguenza la difficoltà di discernere tra informazione vere e false. E questo vale anche per il tema dell'utilizzo delle risorse geotermiche. L'attività proposta consente agli studenti e alle studentesse strumenti di sviluppare capacità critiche per "contrastare le false notizie, divulgando informazioni corrette".
- *Organizzazione di eventi/attività strutturati su processi partecipativi.* Attività conclusiva in cui gli studenti e le studentesse diventano facilitatori di eventi partecipativi, condividendo con cittadini, istituzioni e enti

locali un quadro completo sulle opportunità offerte dalle risorse geotermiche, applicando quanto appreso durante tutto il percorso educativo.



5 - Conclusione

Questa sezione propone agli insegnanti strumenti pratici e metodologici per progettare percorsi educativi sulla geotermia adattabili ai diversi ordini di scuole. Le attività proposte, basate su un approccio partecipativo e interdisciplinare, mirano a trasformare la conoscenza scientifica in esperienza educativa, stimolando l'interesse e la creatività degli studenti e delle studentesse.

Il valore di questi percorsi non risiede solo nella trasmissione di contenuti, ma nella possibilità di rendere gli studenti e le studentesse protagonisti di un apprendimento attivo, consapevole e connesso al territorio. L'invito è quello di utilizzare quanto proposto come punto di partenza per creare, con la propria classe, esperienze formative significative e durature, in grado di rafforzare una cittadinanza energetica responsabile e sostenibile.

Sezione 2

La struttura del pianeta Terra

A cura di Valeria Misiti e Nunzia Voltattorni

1 - Introduzione

Questa sezione ha l'obiettivo di fornire agli insegnanti una base scientifica solida sui fondamenti della struttura interna della Terra e dell'origine del calore terrestre, presupposti essenziali per comprendere l'energia geotermica. I contenuti qui proposti rappresentano il punto di partenza per accompagnare studenti e studentesse di tutte le età in un viaggio verso la scoperta dell'energia che proviene dal nostro pianeta. La sezione è stata pensata per essere adattata dai docenti ai diversi livelli scolastici e potrà essere integrata con i contenuti delle sezioni successive, che affronteranno gli aspetti applicativi, ambientali e didattici della geotermia.

2 - La struttura della Terra

La Terra può essere approssimata ad una sfera leggermente schiacciata ai poli, con raggio medio pari a 6.371 km circa. Gli studi geologici hanno stimato un'età di circa 4.5 miliardi di anni e la sua struttura interna presenta diversi strati chiamati — dall'interno verso l'esterno — nucleo interno, nucleo esterno, mantello, crosta terrestre. La struttura interna della Terra è stata dedotta grazie allo studio delle onde sismiche che si generano a seguito di grandi terremoti. Le onde sismiche si dividono in due tipi: le P verticali (quelle più veloci, quindi "Prime", si trasmettono anche nei fluidi sebbene vengano rallentate) e le S longitudinali (sono più lente, perciò "Seconde", e non si trasmettono nei fluidi) (figura 2.1). A seguito di un evento sismico, le onde P e le onde S iniziano a propagarsi in tutte le direzioni e possono cambiare la loro velocità durante il loro cammino. Durante il loro viaggio verso l'interno della Terra, la prima variazione di velocità delle onde (aumento di velocità), avviene all'interfaccia tra crosta terrestre e mantello superiore (cosiddetta discontinuità di Mohorovicic). In questo caso passiamo da rocce più leggere (come ad esempio i graniti) a rocce più

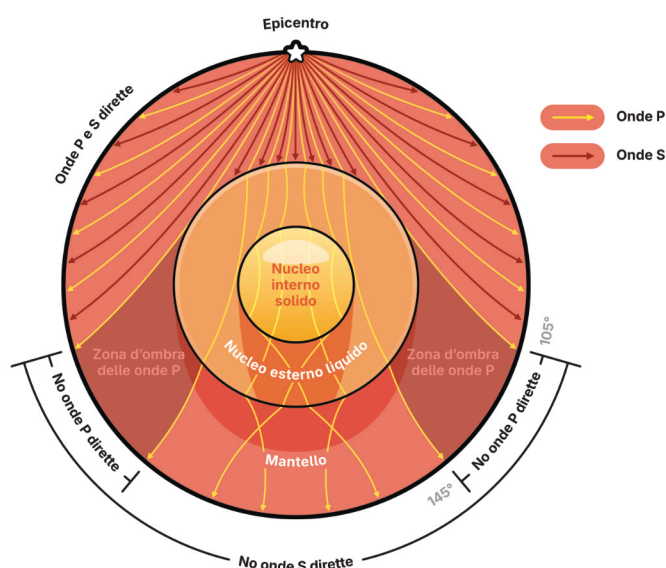


Figura 2.1: struttura interna della Terra e propagazione delle onde sismiche P e S.



dense (come le peridotiti). Alla profondità di circa 2.900 chilometri, le onde P rallentano di colpo mentre le onde S scompaiono. Siamo di fronte ad una seconda discontinuità (discontinuità di Gutenberg) che separa uno strato solido da uno strato liquido: il passaggio dal mantello al nucleo esterno (liquido) che ha una composizione prevalentemente di ferro e nichel. Proseguendo verso l'interno, a circa 5.170 chilometri, le onde P aumentano nuovamente e repentinamente la loro velocità. Questo fa dedurre che esiste un'altra discontinuità (discontinuità di Lehmann) che separa il nucleo esterno dal nucleo interno, che è solido e molto denso. Il passaggio da solido a liquido è dovuto all'aumento di pressione. Per approfondimenti, si suggerisce la seguente lettura "Cosa è un terremoto?" (pubblicazione INGV-Giunti Terremoti e Maremoti <https://ingvterremoti.com/libro-terremotimaremoti/>).

Gli strati della Terra

Grazie allo studio della propagazione delle onde sismiche, possiamo definire che il nostro pianeta è composto da quattro strati: crosta, mantello, nucleo esterno, nucleo interno.

Crosta terrestre

La crosta è lo strato più sottile, esterno e meno pesante del nostro pianeta. È composta da rocce solide separate dal mantello dalla discontinuità di Mohorovicic. Esistono in realtà due tipologie di crosta: una continentale più spessa e meno densa, e una oceanica più sottile e più densa.

- **Crosta continentale:** copre circa il 40% della superficie terrestre e il suo spessore varia tra i 30 e 50 km ma con picchi fino a 70 km in corrispondenza delle catene montuose più elevate. La sua densità è tuttavia minore della sua controparte oceanica e le rocce presenti possono essere di ogni tipo: magmatico (formate dal raffreddamento del magma), sedimentario (formate dall'accumulo e dalla compattazione dei sedimenti) e metamorfico (derivate dalla trasformazione di rocce preesistenti a causa di alte pressioni e temperature). Essendo la porzione di Terra più leggera, costituisce la quasi totalità delle terre emerse. Questo perché la crosta terrestre è più leggera della crosta oceanica e quando le due tipologie di placche si scontrano (tettonica delle placche), la più pesante subduce cioè scivola sotto l'altra a causa della compressione, sprofondando nel mantello. La crosta continentale ha avuto una complessa storia evolutiva dominata da processi di orogenesi (formazione di montagne) che ha portato alla formazione di grandi catene montuose. Le parti più antiche della crosta terrestre sono dette "cratoni" e sono costituite da rocce ignee e metamorfiche in parte ricoperte da rocce sedimentarie di età più recente.
- **Crosta oceanica:** costituisce la porzione più superficiale della Terra nelle aree sommerse degli oceani e rappresenta più del 60% della superficie terrestre. Si forma a partire dalle dorsali oceaniche, dalle quali fuoriesce magma basaltico derivante dalla fusione parziale delle rocce del mantello terrestre. L'eruzione continua di lava basaltica produce una grande quantità di materiale che si solidifica e forma nuova crosta oceanica. Tuttavia, poiché la superficie terrestre complessiva rimane costante, una parte equivalente di crosta viene consumata nelle zone di subduzione dove sprofonda nel mantello e si fonde nuovamente. Per questo motivo, l'età massima raggiungibile da una crosta oceanica è di circa 200 milioni di anni. La crosta oceanica ha uno spessore decisamente più ridotto (tra 5 e 15 km) ma, rispetto a quella continentale, ha una densità maggiore. Le principali rocce che la costituiscono sono magmatiche (gabbri e basalti). Grazie alla sua maggiore densità, la crosta oceanica si trova generalmente sui fondali marini; tuttavia, questa è una semplificazione, poiché porzioni di crosta oceanica possono emergere anche sulla terraferma, dando origine alle cosiddette "ofioliti".

Mantello terrestre

Da un punto di vista volumetrico, il mantello occupa la maggior parte del nostro pianeta – circa l'84% – e ha



una massa pari circa al 68% del totale. A una profondità di circa 2.900 km, la discontinuità di Gutenberg separa il mantello dal nucleo esterno, dove le temperature raggiungono circa 4.000°C. La natura del mantello è stata studiata sia indirettamente (dallo studio di propagazione delle onde sismiche) sia tramite l'analisi di campioni che possono arrivare in superficie e, quindi, essere raccolti e analizzati. In realtà, anche il mantello è costituito da due diverse porzioni, una superiore e una inferiore, separate da una zona di transizione spessa circa 200 km. Il mantello è uno degli involucri che costituiscono la Terra: un involucro solido-plastico che separa la crosta dal nucleo, composto prevalentemente da rocce ricche di ferro e magnesio.

Molto importante notare che a causa della differenza di temperatura fra la superficie terrestre e il nucleo esterno, nel mantello avvengono dei movimenti che sono chiamati moti convettivi. La porzione di mantello più vicino al nucleo caldo viene riscaldata, si espande, diventa meno denso e più leggero, quindi sale. Il materiale più freddo e denso prende il suo posto, scende e viene a sua volta riscaldato, creando una circolazione continua che distribuisce il calore. La convezione del mantello è un processo caotico e si pensa sia il motore dello spostamento delle placche tettoniche (porzioni della crosta terrestre che galleggiano sul mantello).

Nucleo terrestre

Il nucleo (interno ed esterno) ha un raggio di circa 3.470 km e si estende dai 2.900 km di profondità fino al centro della Terra. Nonostante abbia un volume pari solo a un settimo di quello dell'intero pianeta, la sua massa è circa il 31% del totale a causa della sua composizione a base di ferro e nichel. Come abbiamo accennato in precedenza, il nucleo è diviso in due diversi strati: uno interno solido e uno esterno liquido.

- Nucleo interno: è costituito principalmente da ferro. Le temperature raggiungono valori estremamente elevati, tra i 5.000°C e i 6.000°C, ma le enormi pressioni presenti impediscono la fusione, mantenendo il materiale allo stato solido.
- Nucleo esterno: a 5.170 km di profondità si verifica il passaggio al nucleo esterno. Qui, oltre a ferro e nichel, sono presenti anche elementi più leggeri che si ritiene possano essere ossigeno e zolfo. La sua natura liquida consente il movimento di grandi masse di materiale, generando il campo magnetico terrestre, grazie al quale possiamo orientarci con le bussole.

Classificazione reologica

Esiste un secondo tipo di classificazione del pianeta Terra che non si basa sulla composizione e sulla struttura, quanto sulla reologia, cioè il comportamento meccanico degli strati (figura 2.2) che possono essere suddivisi secondo il seguente modello:

Litosfera

Circa 100 km di spessore, corrisponde approssimativamente alla crosta terrestre e a una porzione superficiale del mantello. Il suo comportamento è prevalentemente fragile – quindi tende a spezzarsi. La litosfera è lo strato più esterno e rigido della Terra. È suddivisa in placche tettoniche che si muovono e interagiscono sopra la sottostante astenosfera. Questi movimenti sono responsabili di importanti fenomeni geologici, come terremoti, eruzioni vulcaniche e formazione di catene montuose.

Astenosfera

Si estende dai 100 ai 700 km circa sotto la superficie terrestre. Si trova sotto la litosfera e, a differenza di quest'ultima, ha un comportamento prevalentemente duttile. Questo significa che, anziché spezzarsi, tende a piegarsi e a deformarsi, quasi come fosse della plastilina. Grazie a questa proprietà, l'astenosfera può essere considerata il "nastro trasportatore" che permette alle placche di spostarsi. Ciò che rende possibile



il movimento delle placche è la differenza di viscosità tra litosfera e astenosfera. L'astenosfera, anche se solida, ha una viscosità relativamente più bassa della litosfera e permette lo scorrimento di quest'ultima.

Mesosfera

È lo strato del mantello terrestre che si trova sotto l'astenosfera e sopra il nucleo esterno. Ecco le caratteristiche principali. Si estende indicativamente da circa 700 km fino a 2.900 km sotto la superficie terrestre. A differenza dell'astenosfera più duttile, la mesosfera è più rigida e solida, pur essendo ancora in grado di deformarsi molto lentamente sotto pressioni e temperature elevate. La Mesosfera funge da strato di transizione tra la litosfera/astenosfera e il nucleo esterno, contribuendo alla trasmissione di calore e al movimento convettivo del mantello che influenza la tettonica delle placche. In pratica, la mesosfera è il mantello profondo più solido e stabile, rispetto agli strati superiori più plastici.

Il mantello litosferico, l'astenosfera e la mesosfera condividono tutti la stessa composizione (sono cioè costituiti tutti dalla stessa tipologia di roccia - le peridotiti), ma le loro proprietà meccaniche sono significativamente diverse a causa delle diverse condizioni di pressione e temperatura a cui sono sottoposti.

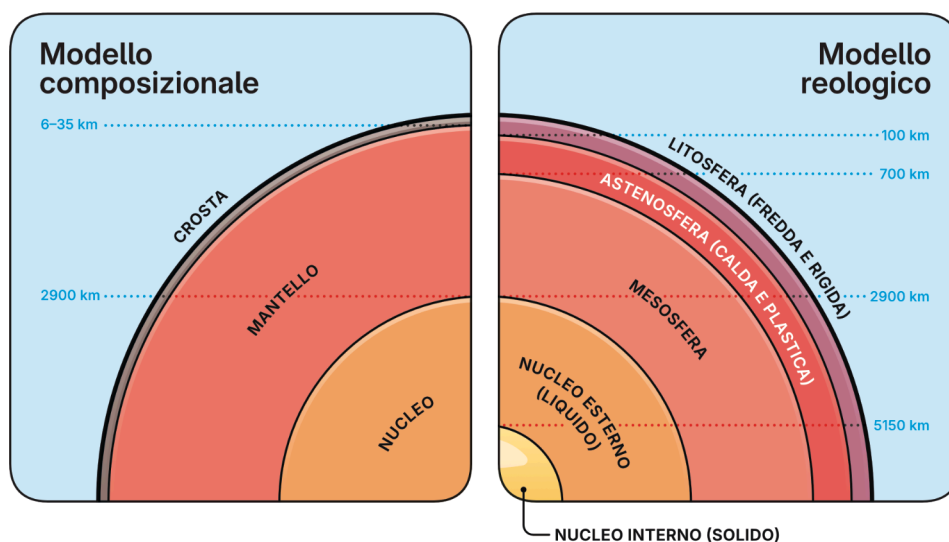


Figura 2.2: schema semplificato del modello composizionale e reologico del pianeta Terra.

3 - Le fonti di calore terrestre

La Terra è un pianeta caratterizzato da un'elevata temperatura interna e rilascia costantemente circa 44 TW (terawatt) di calore. Questa energia termica proviene principalmente da due fonti: il decadimento naturale degli elementi radioattivi presenti nelle rocce (come uranio, torio e potassio) e il calore primordiale residuo, accumulato durante la formazione del pianeta circa 4.5 miliardi di anni fa. Tra queste, il decadimento radioattivo rappresenta il principale meccanismo di produzione di calore all'interno della crosta terrestre. Ma vediamo nel dettaglio:

Decadimento radioattivo

Gli isotopi radioattivi naturali (radionuclidi), come uranio-238, torio-232 e potassio-40, si trovano in abbondanza nelle rocce del mantello e della crosta terrestre. Sono isotopi instabili a causa di un rapporto non equilibrato tra neutroni e protoni e, per questo motivo, decadono spontaneamente trasformandosi, nel tempo, in nuclei stabili. Durante questo processo, rilasciano energia sotto forma di radiazioni ionizzanti (par-



ticelle alfa, beta e raggi gamma). L'energia delle radiazioni viene convertita in energia termica che riscalda il materiale circostante (figura 2.3). È un processo lento ma continuo che garantisce un costante apporto energetico all'interno del pianeta rappresentando la principale sorgente di calore nella crosta terrestre. Infatti, si stima che, su scala globale, il decadimento radioattivo contribuisca per una quota significativa (circa il 70%) al flusso di calore terrestre, mentre la restante parte è costituita da calore primordiale residuo.

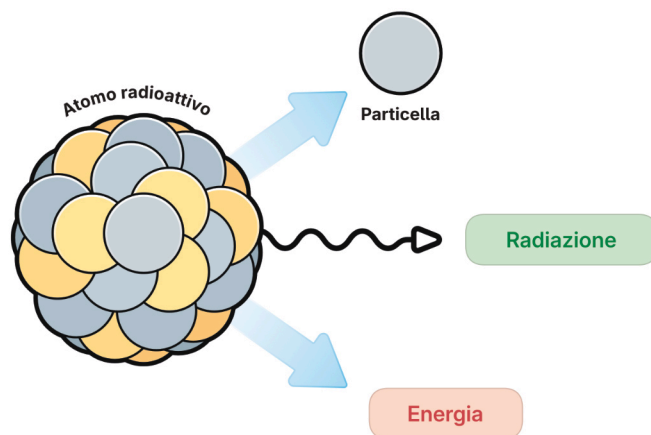


Figura 2.3: decadimento radioattivo di un elemento ed emissione di energia.

Calore primordiale

Questo è il calore residuo della formazione del nostro pianeta, avvenuta circa 4,5 miliardi di anni fa. Durante l'accrescimento planetario (durante, cioè, il processo di formazione dei pianeti che avviene quando particelle di polvere e gas si aggregano gradualmente, formando corpi sempre più grandi), piccoli corpi rocciosi (planetesimi) si sono scontrati e fusi, liberando enormi quantità di energia cinetica trasformata in calore. Parte di questo calore è stato imprigionato nelle profondità della Terra ed è ancora oggi presente, in particolare nel nucleo. Il calore emesso dalla Terra è maggiore nelle aree oceaniche e minore in quelle continentali. In particolare, possiamo trovare flussi di calore elevati ai limiti delle placche tettoniche dove sorgono vulcani e si origina la gran parte dei terremoti. Il calore emesso dalla crosta terrestre viene espresso in quantità di milliwatt per ogni metro quadro (mW/m^2). La quantità media di calore emessa dalla crosta terrestre è di circa 90 mW/m^2 (figura 2.4).

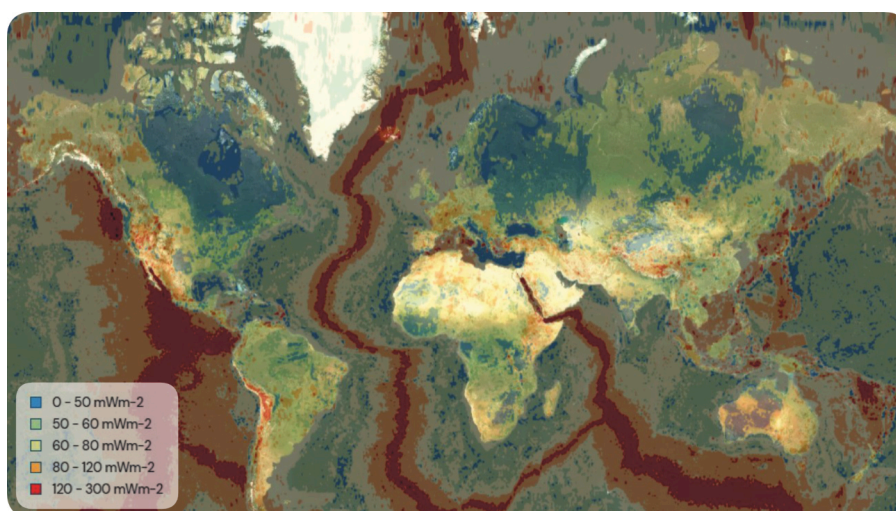


Figura 2.4: distribuzione del flusso di calore terrestre (<https://www.ihfc-iugg.org>).

Il calore generato all'interno della Terra non resta confinato nel suo interno, ma si propaga lentamente verso la superficie attraverso tre principali modalità (figura 2.5):

- **Conduzione:** è il trasferimento di calore attraverso materiali solidi senza spostamento macroscopico della materia. Nella litosfera, questo è il meccanismo dominante, con le rocce che trasmettono lentamente il calore verso la superficie.
- **Convezione:** nel mantello terrestre, sebbene il materiale sia solido, le elevate temperature e pressioni lo rendono plastico. Ciò permette un lento ma continuo movimento del materiale, generando correnti convettive che trasportano il calore dalle profondità verso l'alto e lo riportano verso il basso una volta raffreddato.
- **Advezione:** è il trasporto di calore (o di sostanze) tramite un fluido in movimento. Un esempio quotidiano è il trasporto di inquinanti in un fiume da parte dell'acqua. Nel contesto terrestre, il calore può muoversi per advezione nelle aree tettonicamente attive, dove le acque provenienti dalle precipitazioni atmosferiche si infiltrano e circolano in profondità. In questi casi, il flusso advettivo può rappresentare una forma dominante di trasferimento di calore.

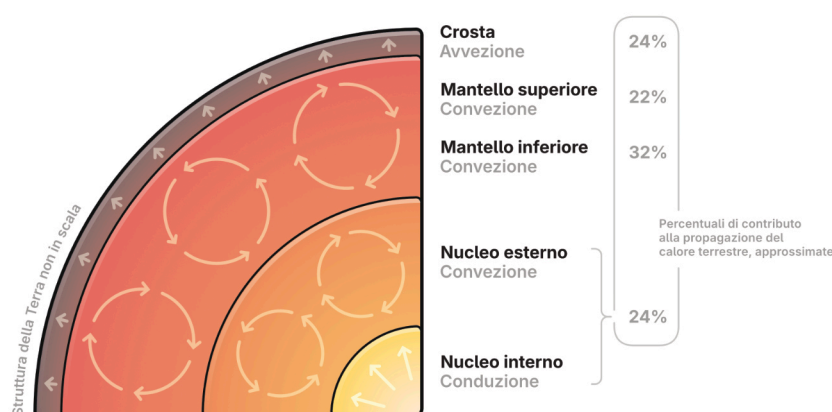


Figura 2.5: processi di trasferimento di calore all'interno della Terra e percentuali di contributo alla propagazione del calore terrestre. Nucleo interno e crosta sono dominati da processi di conduzione, mentre nucleo esterno e mantello da processi di convezione.

Il calore prodotto all'interno della Terra, sia per decadimento radioattivo che per calore primordiale, pertanto non rimane fermo, ma si muove lentamente verso l'esterno. Lungo questo percorso, può dar luogo alla formazione di sistemi geotermici, ovvero zone della crosta terrestre in cui, grazie a condizioni geologiche particolari, il calore può essere concentrato, accumulato e in parte trasportato da fluidi (acqua, vapore o salamoie). Quando questi fluidi caldi si trovano a profondità raggiungibili con le attuali tecnologie, possono essere estratti attraverso perforazioni e utilizzati come fonte di energia. A seconda della temperatura e profondità del serbatoio, questa energia può essere usata direttamente (riscaldamento, termalismo, agricoltura) oppure per la produzione di energia elettrica tramite impianti geotermoelettrici.

Le manifestazioni naturali come fumarole, sorgenti termali, geyser e polle gorgoglianti, spesso presenti in aree vulcaniche o tettonicamente attive, rappresentano gli indizi visibili in superficie della presenza di un sistema geotermico attivo nel sottosuolo.

4 - Evoluzione geologica dell'Italia e la geotermia

L'Italia, da un punto di vista geologico, è situata in una delle aree più complesse e attive dell'intero continente europeo, in corrispondenza del margine convergente tra la placca africana e quella euroasiatica. Tutto ha inizio durante il Giurassico (circa 200 milioni di anni fa) quando la Pangea cominciò a frammentarsi: i primi blocchi a separarsi furono l'Africa e l'America centro-settentrionale. L'Africa si spostò rispetto all'America

verso sud-est e tra i due blocchi si aprì l'Oceano Atlantico centrale. Contemporaneamente alla nascita dell'Atlantico centrale si aprì un piccolo oceano, denominato Oceano Ligure-Piemontese, interposto tra la placca europea e il promontorio della placca africana, denominato Adria.

Nel Cretaceo superiore, intorno a 86-88 milioni di anni fa, la placca africana si separò dal Sudamerica e iniziò l'apertura dell'Oceano Atlantico meridionale. La placca africana cominciò a muoversi verso nord, invece che verso sud-est, subendo una specie di rotazione antioraria. In seguito a questo movimento, la placca africana si avvicinò progressivamente a quella europea e l'Oceano Ligure-Piemontese si ridusse gradualmente, finendo in subduzione sotto la placca africana. L'avvicinamento tra la placca africana e quella europea perdurò per 50-60 milioni di anni, fino a che le due placche si unirono causando la formazione di una lunga e imponente catena montuosa: le Alpi.

Durante l'Oligocene, intorno a 28-30 milioni di anni fa, si distaccarono la Corsica e la Sardegna dalle regioni di Francia e Spagna a cui erano contigue. La piccola placca che costituiva il blocco sardo-corso ruotò in senso antiorario e raggiunse la posizione attuale nel Miocene (16-18 milioni di anni fa). Lo spostamento del blocco sardo-corso si accompagnò all'apertura di un piccolo oceano, il bacino Algero-Provenzale. Il blocco sardo-corso spostandosi verso est andò a collidere con il promontorio di Adria; per questa ragione si formò una serie di accavallamenti della crosta che costituirono gli Appennini ancestrali.

Nel Miocene, intorno a 8 milioni di anni fa, iniziò ad aprirsi un nuovo bacino oceanico che si sta tuttora espandendo: il Mar Tirreno. L'espansione verso est del Tirreno, causò lo spostamento della futura penisola italiana verso est. Questo movimento di compressione causò l'accavallamento di grandi porzioni rocciose in corrispondenza degli Appennini ancestrali. Essi, quindi, si accrebbero e subirono uno spostamento verso est. Durante questo movimento assunsero la posizione attuale anche la Calabria e la parte settentrionale della Sicilia, staccandosi dal blocco corso-sardo a cui erano adiacenti. Gli Appennini si sollevarono e, nelle depressioni adiacenti ad essi, si accumularono i sedimenti derivati dall'erosione delle Alpi e degli stessi Appennini. In questo modo si formò la Pianura Padana.

Attualmente le Alpi sono inattive, tranne che nell'area del Friuli, in cui sono in atto spinte tettoniche compressive, responsabili dei terremoti registrati in queste aree. Gli Appennini, dalla Romagna alla Lucania, sono ancora in movimento verso est. Ecco perché la fascia appenninica è interessata da intensa attività sismica. Il Mar Tirreno si sta ancora espandendo verso sud-est, per questa ragione sono presenti al suo interno grandi vulcani sottomarini e nelle aree tirreniche della Toscana e della Campania si verificano assottigliamenti della crosta associati a fenomeni vulcanici. Sotto la Calabria è in atto la subduzione della litosfera africana che provoca intensi terremoti e il vulcanismo delle Eolie.

Il nostro territorio, quindi, è molto variegato dal punto di vista geologico, poiché coesistono rocce antichissime e formazioni giovani (vedi tabella 2.1), con condizioni tettoniche in continuo cambiamento.

Giurassico

~200 milioni di anni fa

- Frammentazione della Pangea: Africa e America centro-settentrionale si separano.
- Apertura dell'Oceano Atlantico centrale.
- Nascita del piccolo Oceano Ligure-Piemontese tra la placca europea e il promontorio africano (Adria).

Cretaceo superiore

~86-88 milioni di anni fa

- Apertura Atlantico meridionale
- L'Africa ruota in senso antiorario e si muove verso nord avvicinandosi alla placca europea.

→



	• L'Oceano Ligure-Piemontese va in subduzione sotto la placca africana. • Formazione delle Alpi grazie alla collisione delle placche africana ed europea.
Oligocene ~28–30 milioni di anni fa	• Corsica e Sardegna si distaccano dalla Francia/Spagna. • Rotazione antioraria del blocco sardo-corso. • Apertura del bacino Algero-Provenzale. • Collisione del blocco sardo-corso con Adria → formazione degli Appennini ancestrali.
Miocene ~16–8 milioni di anni fa	• Apertura del Mar Tirreno. • Spostamento verso est della futura penisola italiana. • Accavallamento degli Appennini ancestrali → formazione catena appenninica. • La Calabria e parte settentrionale della Sicilia si staccano dal blocco sardo-corso. • Accumulo dei sedimenti nelle depressioni → formazione della Pianura Padana

Tabella 2.1: evoluzione geologica della penisola italiana.

Dalle Alpi agli Appennini

Riassumendo, le Alpi derivano dalla subduzione della placca europea verso sud-est sotto l'Adriatico, mentre gli Appennini dalla subduzione della placca adriatica verso ovest sotto la placca europea (figura 2.6).

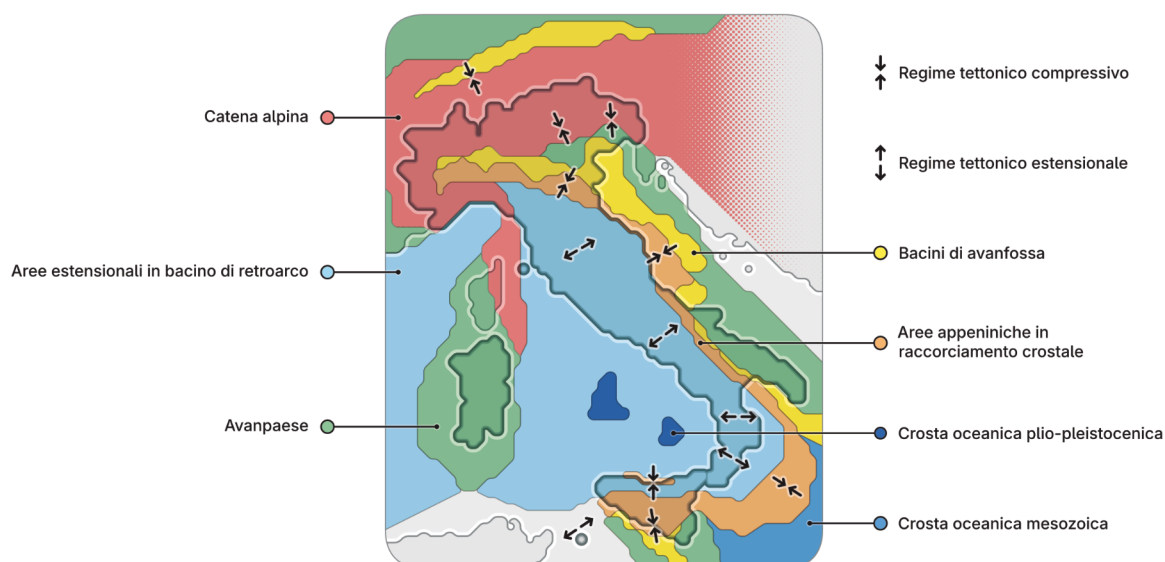


Figura 2.6: carta tettonica semplificata dell'Italia, che mostra i principali contesti tettonici e geodinamici della regione (adattata da Carminati e Doglioni, 2012).

Differenze principali:

- Alpi: la loro formazione risale a circa 65 milioni di anni fa. Si tratta di una catena montuosa compatta con strutture profonde e vette che raggiungono quasi i 5.000 metri di altitudine. La subduzione ha coinvolto l'intera crosta di entrambe le placche dando origine, per l'appunto, ad una catena montuosa compatta ed elevata.
- Appennini: sono una catena più giovane, iniziata circa 20-25 milioni di anni fa, e meno elevata rispetto alle Alpi. La subduzione ha interessato principalmente la crosta superiore della placca inferiore e la struttura è in parte ancora in evoluzione. Durante questo processo, la placca in subduzione è arretrata rispetto alla placca superiore, causando un'estensione verso il Tirreno e portando all'attuale formazione di tutto il bacino tirrenico. Le subduzioni che arretrano come quella degli Appennini, tendono a generare "bacini di retroarco" che possono ospitare anche sistemi vulcanici.

Il vulcanismo italiano

Il vulcanismo in Italia è legato, in termini generali, alla vicinanza del limite convergente tra la placca africana, che si muove verso nord, e la placca euroasiatica. L'interazione di tipo collisionale tra queste due placche provoca principalmente la subduzione della placca crostale ionica a sud sotto l'arco calabro e la sua progressiva fusione nel mantello. Questo processo favorisce la risalita di magmi attraverso la crosta fino alla superficie. Lungo il margine tirrenico, dalla Toscana meridionale alla Sicilia, si sviluppa un arco magmatico-vulcanico legato alla presenza di una litosfera più sottile e all'attività di formazione degli Appennini (figura 2.7). Questa zona è caratterizzata da:

- Anomalie termiche (gradiente geotermico elevato);
- Vulcani attivi come Vesuvio, Campi Flegrei, Ischia, Etna, Stromboli e Vulcano;
- Manifestazioni geotermiche come sorgenti termali, fumarole e polle gorgoglianti. Proprio lungo questo margine geologicamente attivo si sviluppano i principali campi geotermici italiani, come quello di Larderello-Travale-Radicondoli e Monte Amiata in Toscana, tra i più utilizzati al mondo per la produzione di energia geotermoelettrica (vedi sezione 3).

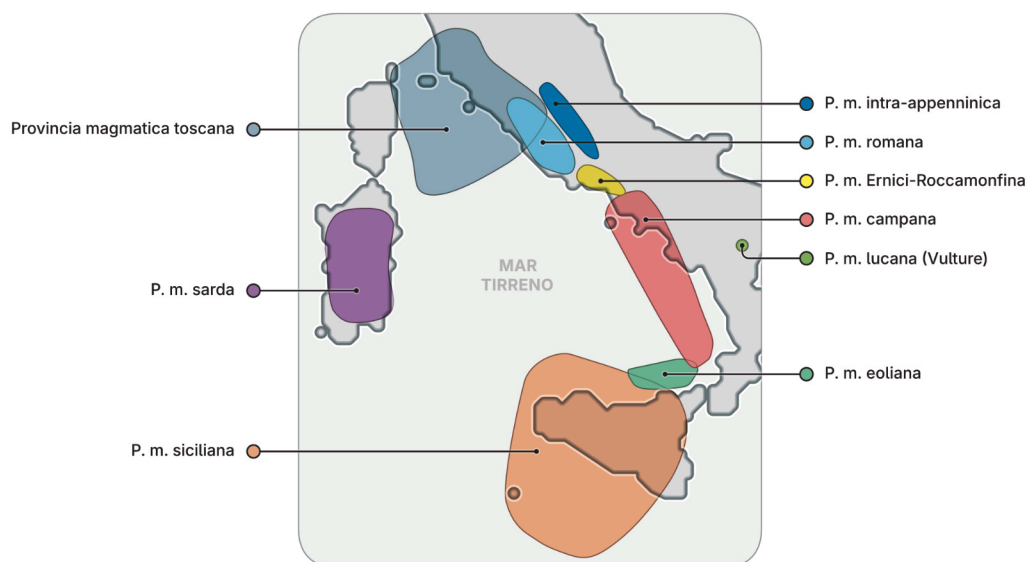


Figura 2.7: distribuzione delle province magmatiche (p. m.) in Italia. Colori diversi indicano le varie province magmatiche. L'età del vulcanismo diminuisce da nord (da 8.5 milioni di anni) a sud (attivi oggi) (modificata da Peccerillo and Frezzotti, 2014).

Altre importanti aree geotermiche italiane, oltre la Toscana, sono:

- Lazio: aree con potenziale medio-alto, in parte legate alla presenza di diversi distretti vulcanici come quello Vulsino, Vicano, Sabatino e dei Colli Albani.
- Campania: aree con potenziale medio-alto, in parte legate alla presenza di vulcani attivi come Vesuvio, Campi Flegrei e Ischia.
- Sicilia: grazie alla sua complessa geologia, soprattutto nella zona etnea, Isole Eolie e Pantelleria, la regione presenta risorse geotermiche significative, oggi in fase di studio e valorizzazione.



Sezione 3

Principi della geotermia, utilizzi ed esempi in Italia e nel mondo

A cura di Monia Procesi e Barbara Cantucci Marini

1 - Introduzione

In questa sezione si risponderà ad alcuni quesiti fondamentali, come: che cos'è l'energia geotermica? Dove troviamo le risorse geotermiche? Quali sono gli utilizzi delle risorse geotermiche? Dove vengono oggi coltivate risorse geotermiche?

2 - Che cos'è l'energia geotermica? Definizione e origine

Con geotermia si intende quella disciplina scientifica che si occupa di indagare le fonti di calore terrestre e in particolare di individuare e caratterizzare i sistemi geologici che presentano peculiari proprietà termiche tanto da renderli potenzialmente idonei all'estrazione di energia termica e/o produzione di energia geotermoelettrica. Con geotermia si intende anche il ramo tecnologico che permette di accedere a tali risorse per investigarle direttamente e coltivarle.

L'etimologia greca della parola geotermia significa: *geō*, Terra, e *thermós*, caldo. L'energia geotermica è quindi l'energia contenuta nel calore terrestre, che dal centro della Terra arriva fino alla superficie. La temperatura nella crosta terrestre infatti aumenta progressivamente secondo un gradiente geotermico che in media è di 30°C ogni 1.000 metri di profondità. In alcune zone con particolari condizioni geologiche, considerate anomale, tale gradiente è più alto della media, arrivando anche a circa 150°C ogni 1.000 m (figura 3.1).

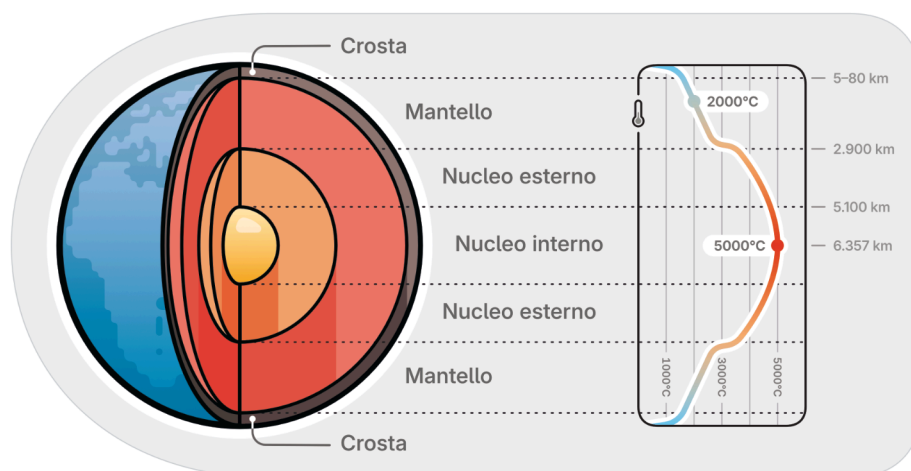


Figura 3.1: distribuzione della temperatura all'interno della Terra

L'energia geotermica è legata al calore proveniente dall'interno della Terra. In particolare il calore terrestre è legato a due principali sorgenti: il decadimento radioattivo degli elementi presenti all'interno del pianeta come uranio, torio e potassio; il calore primordiale residuale legato al processo di accrezione planetaria e conseguente differenziazione interna gravitazionale in nucleo, mantello e crosta terrestre. A scala locale e



in particolari settori della crosta terrestre, le temperature possono essere particolarmente elevate anche per il generarsi di processi di fusione delle rocce e conseguente formazione di camere magmatiche e vulcani.

Approfondimento

L'energia geotermica fa parte delle energie rinnovabili insieme a solare-fotovoltaico, solare a concentrazione, eolico, idroelettrico e biomassa. E' una fonte energetica affidabile e continua che non risente degli eventi meteorologici e del ciclo giorno-notte, è quindi presente h24. Questo fa sì che tra le rinnovabili è la forma di energia con il più alto fattore di capacità, ossia di operatività giornaliera degli impianti, che per l'energia geotermica è attualmente stimato a l'85% (figura 3.2).

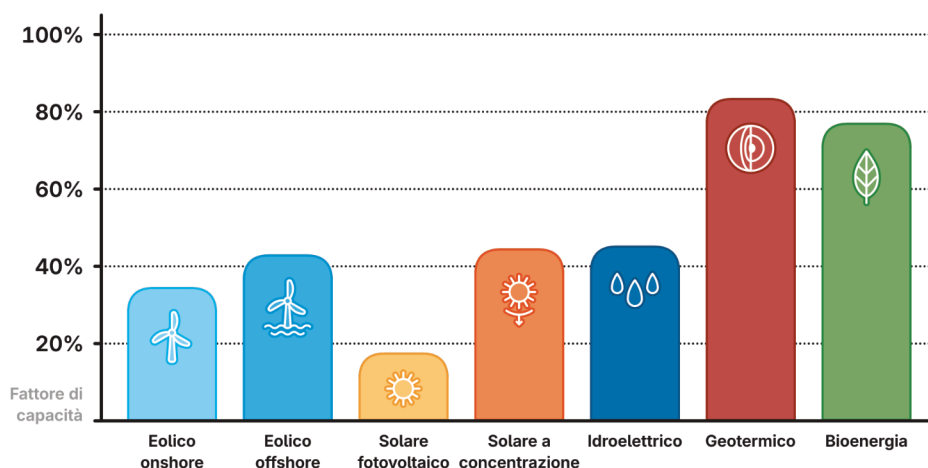


Figura 3.2: fattore di capacità medio annuo per diverse fonti rinnovabili (adattata da IRENA, 2021)

3 - Dove troviamo le risorse geotermiche?

La distribuzione sul globo terrestre dell'energia geotermica ma più in generale dei sistemi geologici da cui è possibile ricavarla (sistemi geotermici o risorsa geotermica) è strettamente legata all'assetto geologico e geodinamico del pianeta. Le zone di maggiore attività geotermica e quindi con elevato flusso di calore terrestre, si concentrano lungo i margini delle placche tettoniche, dove la crosta terrestre è più sottile, favorendo il rilascio di calore dal mantello terrestre e il generarsi di fenomeni come vulcanismo e sismicità. Esiste quindi una forte correlazione tra il flusso di calore, tettonica a placche e distribuzione dei sistemi geotermici, i quali possono trovarsi ai confini di placche sia divergenti, convergenti che trasformativi (figura 3.3).

I margini di placca più ricchi in sistemi geotermici sono l'Anello di Fuoco del Pacifico, una vasta regione circolare caratterizzata da intensa attività vulcanica e sismica che interessa per l'appunto i margini dell'Oceano Pacifico e le dorsali oceaniche, fratture sottomarine di cui la più famosa è la dorsale medio-atlantica. Per fare alcuni esempi, paesi come l'Islanda, l'Italia (specialmente il margine Tirrenico), Turchia, Nuova Zelanda, Giappone, Indonesia e l'ovest degli Stati Uniti, beneficiano di risorse geotermiche significative grazie alla loro posizione geologicamente attiva legata alla presenza di margini di placca; divergenti nel caso dell'Islanda e convergenti nel caso dell'Italia.

Ma come è possibile produrre energia geotermica dal calore terrestre? La risposta è principalmente nei fluidi e nel vapore che si originano nella crosta terrestre in aree particolarmente calde. Per comprendere meglio questo processo, è utile osservare la figura 3.4, che rappresenta in modo semplificato la struttura di un sistema geotermico convenzionale. In un sistema di questo tipo, una fonte di calore — come un corpo mag-

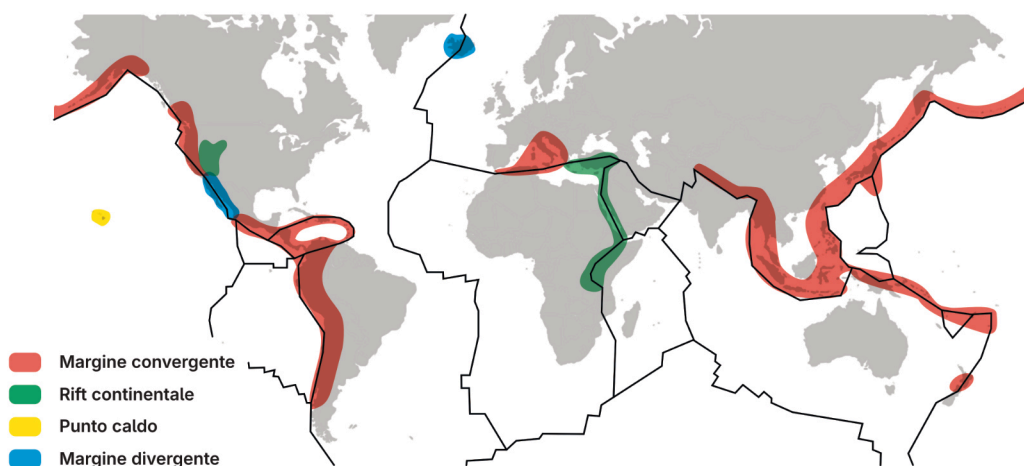


Figura 3.3: le fasce colorate (rosso, verde, giallo, blu) rappresentano le aree in cui sono presenti i sistemi geotermici ad oggi conosciuti. Le differenti colorazioni sono relative al diverso tipo di margine di placca. In giallo sono rappresentati i punti caldi (Hawaii) (adattata da Eleders & Moore, 2016)

matico situato a migliaia di chilometri di profondità — riscalda le rocce circostanti, ricche di acqua e vapore, formando il cosiddetto serbatoio o reservoir geotermico. Al di sopra di questo serbatoio si trovano strati di rocce impermeabili che impediscono al calore di disperdersi verso la superficie. Infine, un meccanismo naturale di ricarica (piogge) consente il continuo apporto di acqua nel serbatoio geotermico, garantendo il mantenimento del sistema e la possibilità di utilizzarlo in modo sostenibile per la produzione di energia.

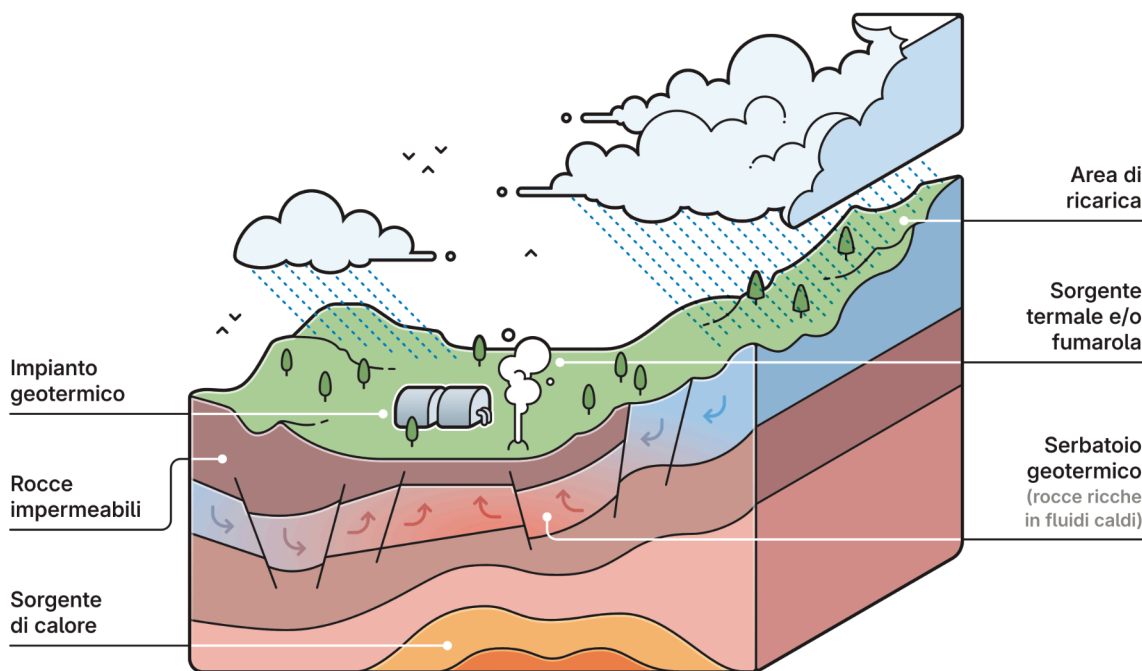


Figura 3.4: schema semplificato di un sistema geotermico

L'acqua presente nelle rocce situate a migliaia di metri di profondità all'interno della crosta terrestre, può raggiungere lo stato di vapore a seguito delle elevate temperature. Il vapore può risalire da queste rocce ricche in acqua e gas (serbatoio profondo o reservoir geotermico) e arrivare in superficie tramite pozzi pro-

fondi creati dall'essere umano oppure spontaneamente, per esempio attraverso fratture nel terreno, generando in questo caso spettacolari manifestazioni come le fumarole.

Le aree geotermiche sono spesso caratterizzate anche dalla presenza di geyser, sorgenti termali, polle gorgoglianti, depositi di travertino e depositi di zolfo dal caratteristico colore bianco-giallo (figura 3.5).



Figura 3.5: da sinistra, fumarole con depositi di zolfo, geyser nel parco naturale di Yellowstone (USA), sorgenti termali di Pamukkale (Turchia) e depositi di travertino.

Fumarole

Sono emissioni di gas costituito per la maggior parte da vapore acqueo e altre specie gassose come anidride carbonica (CO_2) e altri gas vulcanici, ad esempio cloruro di idrogeno gassoso (HCl), fluoruro di idrogeno gassoso (HF) e anidride solforosa (SO_2), e/o gas di origine idrotermale come solfuro di idrogeno (H_2S) e metano (CH_4). La fuoriuscita avviene attraverso fessure profonde, a temperature che possono variare dai 100 ai 900°C, e talvolta con pressioni molto elevate, fino a 20 atmosfere. I caratteristici “fumi” visibili sopra le fumarole si formano quando i gas caldi, entrando in contatto con l’aria più fredda, si condensano, rendendo visibile il vapore. Le fumarole si trovano spesso in prossimità dei crateri o sui fianchi dei vulcani attivi, ma possono comparire anche in zone dove l’attività vulcanica è cessata, purché nel sottosuolo sia ancora presente calore residuo. A causa della loro composizione chimica molto acida (pH compreso tra 1 e 2), queste emissioni alterano profondamente il terreno circostante, che assume spesso colorazioni giallastre dovute ai depositi di zolfo.

Geyser

Si tratta di eventi idrotermali che si verificano in presenza di un grande serbatoio sotterraneo di acqua molto calda che, periodicamente, viene espulsa in maniera piuttosto esplosiva grazie a vapore in pressione che dal sottosuolo risale verso la superficie. L’acqua, viene quindi eruttata, solitamente a intervalli regolari come potenti getti (figura 3.6). La durata dei getti può variare da pochi secondi a diversi minuti ed i getti possono arrivare fino a 60 metri di altezza. Sono eventi rari al mondo che caratterizzano però l’Islanda e il Parco Nazionale di Yellowstone (nel Wyoming, Stati Uniti).

Sorgenti termali

Sono punti in cui acqua calda, con temperatura superiore ai 20 °C, emerge spontaneamente in superficie risalendo spesso da profondità elevate. Da secoli vengono utilizzate per scopi curativi e ricreativi. L’Italia è particolarmente ricca di sorgenti termali e vanta una lunga tradizione in ambito balneologico. Ne sono un esempio le suggestive sorgenti termali di Saturnia e dei Bagni di S. Filippo in Toscana, oppure le sorgenti del Bullicame nel Lazio. Nelle isole Eolie è presente una delle costruzioni termali più antiche del Mediterraneo e

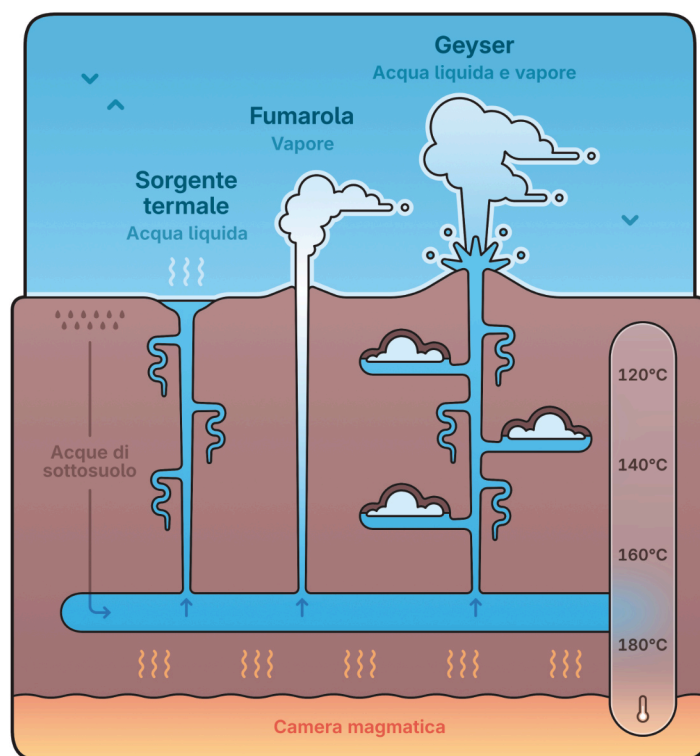


Figura 3.6: spiegazione semplificata di sorgente termale, fumarola e geyser. Per il geyser vengono messe in evidenza le camere in cui viene immagazzinata l'acqua calda e il condotto da cui acqua e vapore eruttano periodicamente.

si trova presso le Terme di San Calogero a Lipari, dove l'acqua sgorga a circa 48 °C (figura 3.7). Secondo gli studi archeologici, l'attuale edificio in stile liberty risale probabilmente al 1872 e rimase in attività fino alla metà degli anni Settanta.

Polle gorgoglianti

Rappresentano un'altra tipica manifestazione delle aree geotermiche vulcaniche e idrotermali. Si formano quando i gas (ricchi principalmente in anidride carbonica) risalendo dal sottosuolo incontrano uno specchio d'acqua — come una pozza, un fosso o un tratto di mare — dando origine alle caratteristiche bolle di gorgogliamento in superficie.



Figura 3.7: Terme di S. Calogero

Le risorse geotermiche vengono classificate in funzione della loro temperatura in risorse di entalpia bassa, media e alta. Per entalpia (H) si intende il contenuto termico totale di un sistema, cioè l'energia complessiva che il sistema può scambiare con l'ambiente circostante.

$$H = U + pV$$

U = energia interna del sistema

p = pressione del sistema

V = volume del sistema

In un sistema geotermico l'energia interna dipende generalmente dalla temperatura quindi si può parlare con una buona approssimazione anche di risorse di bassa, media e alta temperatura. Diversi sono i range di temperatura (T) che vengono individuati a livello globale, in Italia, la classificazione solitamente segue i valori di seguito riportati:

- $T \leq 100^\circ \rightarrow$ Bassa entalpia (o temperatura)
- $100 < T \leq 150^\circ \text{C} \rightarrow$ Media entalpia
- $T > 150^\circ \text{C} \rightarrow$ Alta entalpia

Approfondimento: classificazione dei sistemi geotermici

La classificazione dei sistemi geotermici può essere suddivisa principalmente in due categorie: convenzionali e non convenzionali. I sistemi geotermici convenzionali includono principalmente i sistemi idrotermali a media e alta entalpia, dove l'acqua calda e/o il vapore sono presenti nelle rocce sotterranee (serbatoio geotermico) e possono essere estratti per generare elettricità. In particolare, i sistemi geotermici convenzionali sono costituiti da quattro elementi principali: una sorgente di calore, rocce permeabili ricche in acque e/o vapore, al di sopra rocce impermeabili che permettono di conservare il calore, un sistema idrogeologico che permetta al serbatoio geotermico di essere ricaricato in modo naturale, ossia rifornito di acqua (figura 3.4). I sistemi geotermici non convenzionali sono quelli che si differenziano per uno o più elementi da quelli convenzionali. In questa categoria rientrano:

- **Engineered Geothermal Systems (EGS):** sistemi geotermici che naturalmente non hanno un serbatoio geotermico molto permeabile e ricco in acqua e vapore, viene quindi migliorato artificialmente dall'essere umano attraverso delle stimolazioni, che possono essere idrauliche (iniettando acqua in pressione e creando fratture) oppure chimiche (si iniettano acidi che possono dissolvere la roccia e migliorare la permeabilità).
- **Sistemi magmatici:** volumi di roccia con temperature molto alte comprese tra 600°C e 1.400°C dovute alla presenza di corpi magmatici posti a profondità relativamente bassa. Potenzialmente hanno un'efficienza molto alta ma non sono mai stati utilizzati per produrre energia, poiché è ancora necessario risolvere problemi tecnologici legati alle altissime temperature. Sono attualmente molto studiati a fini di ricerca scientifica e tecnologica.
- **Sistemi con fluidi supercritici:** hanno una struttura simile ai sistemi convenzionali ma i fluidi contenuti nel serbatoio geotermico hanno temperature e pressioni così elevate da risultare allo stato supercritico (374°C - 218atm). Solitamente questi sistemi hanno corpi magmatici parzialmente fusi e superficiali. I fluidi supercritici hanno un'altissima efficienza energetica ma non sono mai stati utilizzati. Sono studiati a fini di ricerca in Italia, Islanda, Giappone e Nuova Zelanda.
- **Sistemi a salamoia calda:** sono sistemi idrotermali che nel tempo hanno sviluppato molti mine-



rali argillosi secondari tanto da sigillarlo (fenomeno di self-sealing). In questi sistemi l'acqua contenuta nel serbatoio geotermico è divenuta sempre più salina per effetto della elevata temperatura, raggiungendo valori di una vera e propria salamoia con contenuto totale di sali disciolti (TDS-total dissolved salt) superiore a 10 g/l.

- **Sistemi geopressurizzati:** contengono fluidi geotermici generalmente molto salini, con temperature medio-alte elevate e idrocarburi gassosi disciolti (principalmente metano). Sistemi coprodotti: serbatoi di idrocarburi gassosi e liquidi contenenti sufficienti quantità di acqua idrotermale da permettere la cogenerazione di energia elettrica dal calore geotermico e dagli idrocarburi.

4 - Utilizzi della risorsa geotermica

Le risorse geotermiche di bassa temperatura ($\leq 100^{\circ}\text{C}$) sono generalmente impiegate negli usi termici-diretti, come, oltre la classica balneologia, anche il riscaldamento e raffrescamento di ambienti tramite sonde geotermiche, l'allevamento ittico, la floricoltura, la pastorizzazione del latte e produzione di formaggi, la birrificazione, l'essiccazione di cibi e la produzione della carta; mentre il calore delle risorse di media e alta temperatura ($\geq 150^{\circ}\text{C}$) è generalmente utilizzato in modo indiretto per la produzione di energia geotermoelettrica. Nella figura 3.8 vengono sinteticamente riassunti alcuni di questi utilizzi, ed è utile osservare come siano fortemente legati alla temperatura della risorsa geotermica.

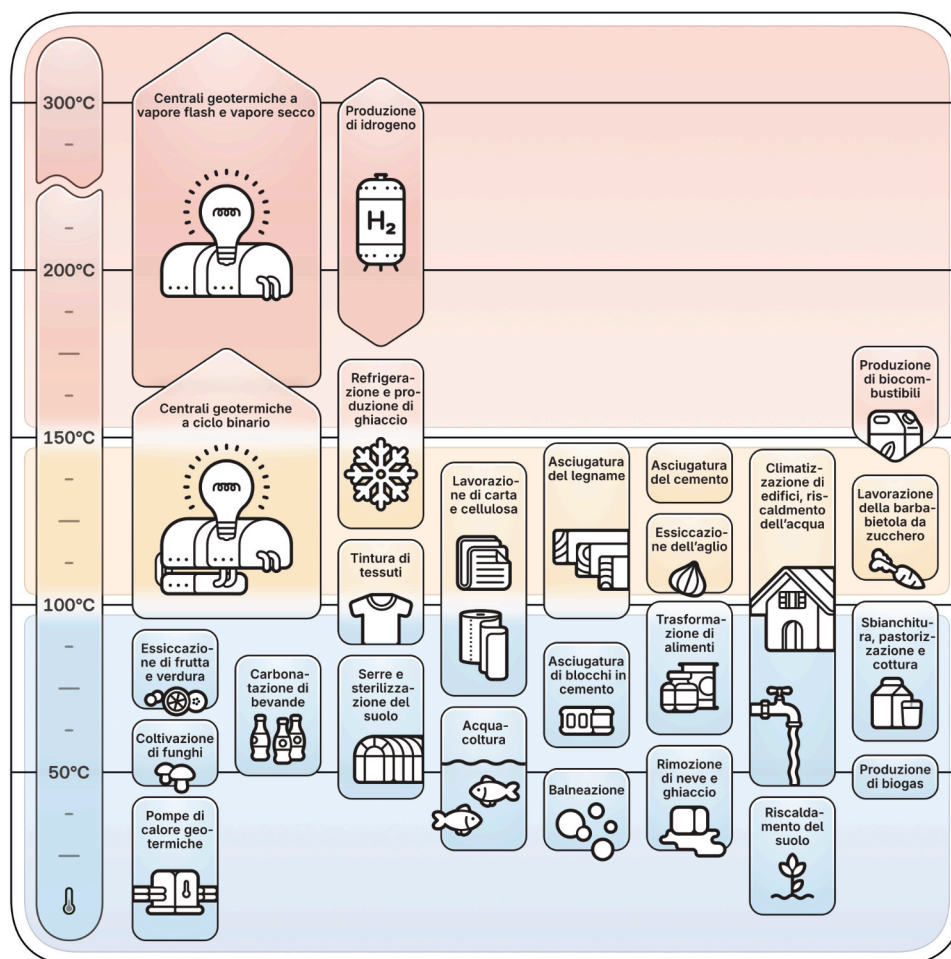


Figura 3.8: utilizzi delle risorse geotermiche in funzione della temperatura (adattata da IRENA, 2021)

Solitamente le risorse utilizzate per usi termici-diretti si trovano generalmente a profondità comprese tra alcune decine e alcune centinaia di metri, mentre quelle utili alla produzione elettrica sono ospitate a profondità dell'ordine del chilometro. Quindi, possiamo distinguere due tipologie di usi del calore terrestre, quello indiretto e quello diretto. La scelta del tipo di impiego dipende principalmente dalla temperatura (o entalpia) del sistema geotermico e dalla profondità a cui esso si trova. E' importante sottolineare che con il progredire dell'innovazione tecnologica anche zone con basse o moderate temperature del sottosuolo possono diventare appetibili per la produzione di energia geotermoelettrica.

🔍 Approfondimento

Nel sottosuolo italiano, alle profondità di 1.000-2.000-3.000 metri, ci sono numerose aree con temperature interessanti (ossia superiori ai 100°C) sia per utilizzi diretti sia per quelli indiretti, come la produzione di energia elettrica (figura 3.9). Queste aree, nei colori dal giallo al rosso, si trovano lungo il margine peri-tirrenico e corrispondono alle zone dove oggi troviamo sorgenti termali molto suggestive (es. Saturnia, Bagni di San Filippo, Bullicame) e che furono caratterizzate, a partire da centinaia di migliaia di anni fa, da numerosi fenomeni vulcanici, che andando verso sud si manifestano ancora attivamente (es. Vesuvio, Campi Flegrei, Ischia, Etna e Isole Eolie). L'energia geotermica è stata inconsapevolmente utilizzata dall'essere umano fin dalla Preistoria, come l'utilizzo del calore per cucinare e il godersi i benefici delle acque termali. Ma è dal XIX secolo che si ha una coltivazione dell'energia geotermica per utilizzo industriale, e successivamente per la produzione di energia elettrica.

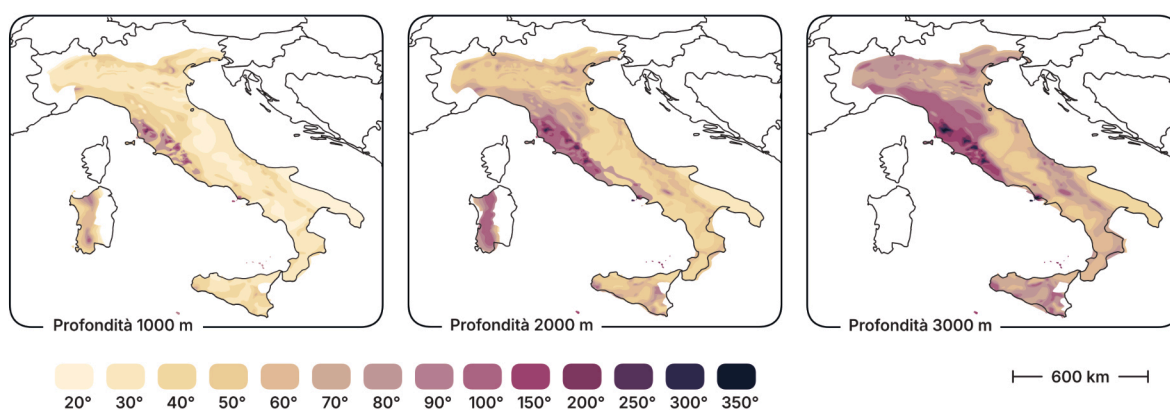


Figura 3.9: temperature del sottosuolo a 1.000, 2.000, e 3.000 metri di profondità (adattato da Procesi et al., 2013).

Gli usi indiretti della risorsa geotermica: la produzione geotermoelettrica

La produzione di energia elettrica da risorse geotermiche convenzionali è legata alla presenza di fluidi caldi (acqua e vapore) all'interno del serbatoio geotermico (figura 3.4) posto a migliaia di metri di profondità all'interno della crosta terrestre. Il fluido caldo, generalmente costituito da acqua calda e in minima parte vapore, può risalire in superficie grazie a pozzi profondi perforati dall'essere umano (circa 1.000-5.000 metri di profondità). Arrivando in superficie, nella centrale geotermoelettrica, verrà convogliato in turbine generando energia meccanica che grazie agli alternatori verrà poi trasformata in energia elettrica (figure 3.10, 3.11, 3.12). I serbatoi geotermici estremamente ricchi di vapore, con temperature superiori ai 220°C, sono noti come sistemi a vapore dominante. Essi consentono la produzione di grandi quantità di energia, ma sono poco diffusi a livello mondiale. In Italia, un esempio significativo è rappresentato dal sistema geotermico di

Larderello, in Toscana. Tuttavia, tra i 100 e i 220°C, si possono trovare molte risorse geotermiche, definite a liquido dominante, dove il fluido nel serbatoio (reservoir geotermico) è quasi totalmente acqua calda e in minima parte vapore.

Le centrali geotermoelettriche si distinguono in tre principali tipologie, la cui scelta dipende dalle caratteristiche geologiche e termiche della risorsa geotermica presente:

Centrali a vapore secco (dry steam)

Le centrali a vapore secco utilizzano fluidi geotermici che sono in gran parte vapore già all'interno del serbatoio geotermico. Possono essere quindi sviluppate per utilizzare sistemi geotermici vapore dominanti, solitamente caratterizzati da temperature superiori ai 220°C. Questi sistemi sono molto rari al mondo e di conseguenza questo tipo di tecnologia non è quella più diffusa. Nelle centrali *dry steam* il vapore arriva dal serbatoio geotermico direttamente in turbina, che aziona un generatore che produrrà elettricità (figura 3.10). L'energia elettrica viene poi trasportata a un trasformatore, che ne innalzerà la tensione per poi immetterla nella rete di distribuzione. Il vapore, superata la turbina, condenserà passando allo stato liquido. L'acqua che si genera verrà reiniettata nel serbatoio geotermico tramite pozzi e si trasformerà di nuovo in vapore. La reimmissione permette di mantenere in equilibrio il sistema grazie alla restituzione di parte del fluido estratto, permettendo allo stesso tempo di prolungare l'efficienza della risorsa geotermica. Le centrali a vapore secco sono le prime ad essere utilizzate nell'ambito della produzione geotermoelettrica. Il primo utilizzo in assoluto è avvenuto a Larderello, in Toscana, nel 1904.

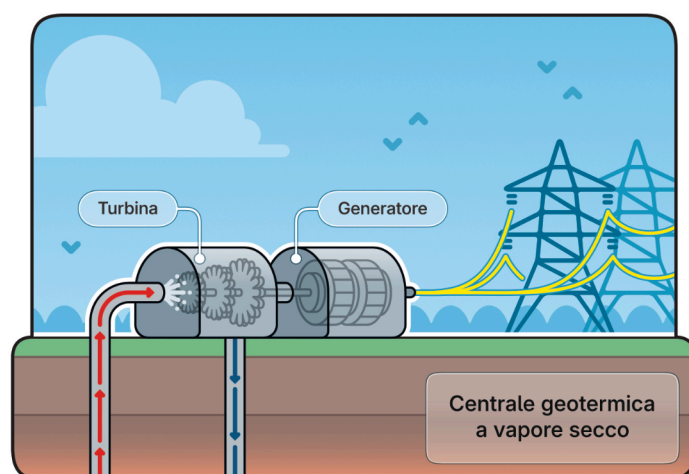


Figura 3.10

Centrali a vapore flash (flash steam)

Sono il tipo più comune di centrali geotermiche oggi in funzione. I fluidi geotermici (temperatura superiore a 150-170 °C), portati in superficie attraverso pozzi, si spostano dal serbatoio geotermico situato a qualche chilometro di profondità e caratterizzato da elevate pressioni fino alla superficie terrestre. La diminuzione di pressione (depressurizzazione) fa sì che il fluido si trasformi rapidamente, "flashando", in vapore (figura 3.11). Il vapore aziona quindi una turbina, che azionerà poi un generatore, seguendo il procedimento illustrato in precedenza (singolo flash). Se il fluido geotermico arriva in superficie a temperature particolarmente elevate, può essere sottoposto per due volte allo stesso processo (doppio flash).

Centrali a ciclo binario

Le centrali geotermiche a ciclo binario possono essere sviluppate impiegando risorse geotermiche a media

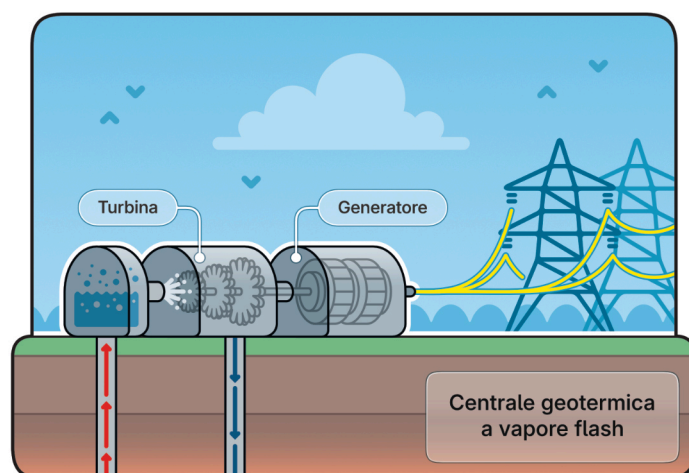


Figura 3.11

temperatura, generalmente tra 100 e 150°C, il che le rende una tecnologia importante per diffondere la produzione di elettricità geotermica in un maggior numero di località. Le centrali geotermiche a ciclo binario si distinguono dalle tecnologie prima illustrate perché i fluidi geotermici non entrano mai in contatto con le turbine della centrale. I fluidi geotermici passano attraverso uno scambiatore di calore in cui è presente con un fluido secondario, o "binario" (figura 3.12). Questo fluido binario (solitamente isobutano o isopentano) ha un punto di ebollizione molto più basso dell'acqua e il calore del fluido geotermico è sufficiente per portarlo allo stato di vapore, che a sua volta, come visto in precedenza, azionerà le turbine, fa girare i generatori e crea elettricità.

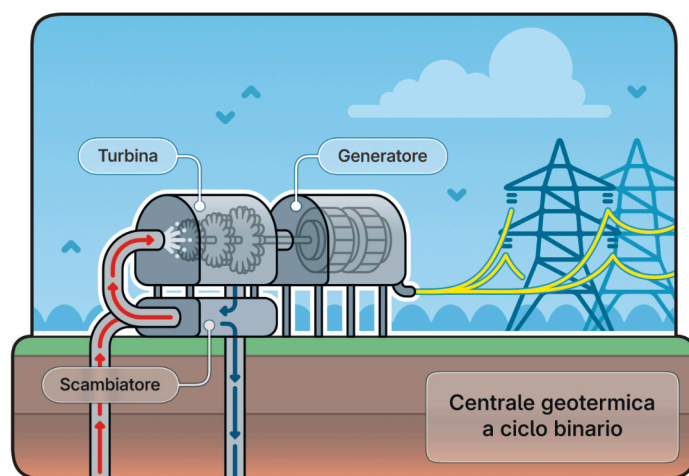


Figura 3.12

🔍 Approfondimento

I gas incondensabili presenti nel vapore del sottosuolo vengono dispersi nell'atmosfera solo dopo precisi trattamenti per abbattere i principali inquinanti, quali idrogeno solforato e mercurio (impianti di Abbattimento Mercurio e Idrogeno Solforato, AMIS).

Gli usi diretti della risorsa geotermica: qualche informazione in più

Con usi diretti della risorsa geotermica si intendono tutti quegli utilizzi dove si impiega direttamente il calore terrestre per uno o più processi utili alla vita dell'uomo. Come descritto in precedenza (paragrafo 4), generalmente sono le risorse con temperature entro i 100°C ad essere maggiormente impiegate per questo tipo



di usi. Di seguito vengono illustrati alcuni esempi più nel dettaglio:

Impianti termali

È uno degli usi diretti più antichi del calore geotermico, diffuso in tutto il mondo e specialmente in Italia. L'acqua calda viene prelevata direttamente dal sottosuolo o da sorgenti termali e convogliata negli impianti termali. In altri casi, come in Islanda, le acque di fine processo di una centrale geotermoelettrica dopo aver alimentato una rete di teleriscaldamento, sono raccolte nella Blue Lagoon, una piscina termale che rappresenta una delle attrazioni turistiche più visitate del paese, grazie sia alle sue proprietà medicamentose, che al caratteristico colore azzurrino delle sue acque. Una piscina simile alla Blue Lagoon, con fluidi geotermici, è presente anche in Kenya, ad Olkariaù.

Riscaldamento e raffrescamento di ambienti con pompe di calore geotermiche

Una pompa di calore geotermica è un sistema che utilizza l'energia termica immagazzinata nel terreno per riscaldare o raffreddare un ambiente. Il suo funzionamento si basa sul principio di assorbimento di calore dal sottosuolo o rilascio, rispettivamente quando la temperatura dell'aria è inferiore (inverno) o superiore (estate) rispetto alla temperatura del sottosuolo (a profondità inferiori di 200-250 m, generalmente tra 50 e 100 m), la quale non subisce variazioni stagionali al di sotto di 10-15 metri di profondità (figura 3.13).

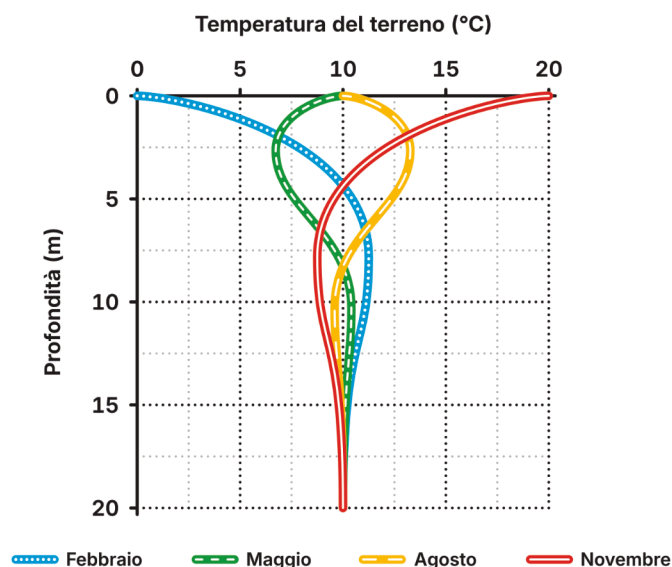


Figura 3.13: variazione della temperatura nel sottosuolo in funzione della profondità.

Il terreno è quindi utilizzato come mezzo di dispersione di calore per i cicli frigoriferi e come sorgente di calore per i cicli di riscaldamento, e la pompa di calore geotermica ha il compito di spostare questo calore dal sottosuolo all'edificio e viceversa avvalendosi di uno scambiatore (sonda geotermica o sonda di geo-scambio).

Gli impianti con pompe di calore geotermiche sono sostanzialmente di due tipi, a ciclo aperto o chiuso, a seconda che vi sia o meno prelievo d'acqua, sia essa di falda o superficiale (laghi, fiumi, mari). Nei sistemi aperti l'acqua di falda viene pompata in superficie tramite pozzi e portata a contatto con la serpentina dell'evaporatore (fase di riscaldamento) inserita nella pompa di calore. Nei sistemi a ciclo chiuso le sonde geotermiche utilizzano il terreno come fonte di calore quando operano in funzione di riscaldamento, in tal caso, un fluido (abituale acqua o una miscela acqua-anticongelante) è il vettore che trasferisce il calore

dal terreno all'evaporatore della pompa di calore (figura 3.14). Quando invece il sistema opera in modalità di raffrescamento, trasferisce il calore dalla pompa di calore al terreno. La scelta del sistema di scambio più opportuno, aperto o chiuso, deve essere operata sulla base di numerosi fattori, tra cui i più importanti sono: l'assetto geologico e idrogeologico dell'area interessata dall'installazione; l'estensione superficiale dell'area coinvolta (le sonde geotermiche orizzontali, ad esempio, hanno bisogno di ampie superfici); la prossimità di grossi bacini idrici, fiumi, miniere abbandonate o altre cavità contenenti acqua.

Un dispositivo con pompa di calore geotermica, prevede una riduzione di circa il 70% di emissioni di gas serra in atmosfera rispetto a un tradizionale impianto a caldaia; inoltre, a lungo termine, comporta un considerevole risparmio a livello economico (S. Abate et al., 2014).

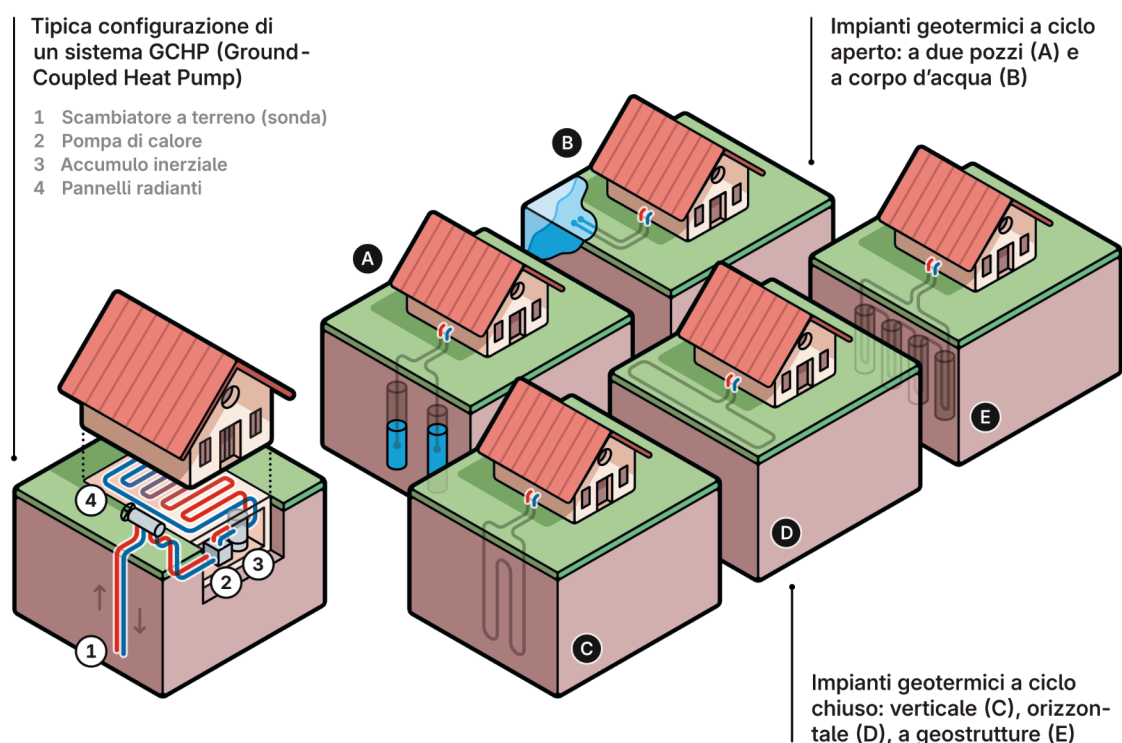


Figura 3.14: rappresentazione delle diverse tipologie di impianti geotermici.

Teleriscaldamento e raffrescamento

Si tratta di un sistema per trasportare a distanza il calore e che permette di utilizzare i fluidi geotermici presenti nel sottosuolo a basse temperature (tra 80°C e 100°C) per scaldare direttamente l'acqua, da fare poi circolare nei radiatori e nei termoconvettori degli edifici di interi quartieri. Con lo stesso principio del teleriscaldamento, ma inverso, il calore geotermico viene impiegato anche per la climatizzazione, raffreddando gli ambienti mediante l'assorbimento del calore interno attraverso gruppi frigoriferi (o chiller) ad assorbimento. Questo è possibile grazie all'impiego di due fluidi di lavoro: un refrigerante, che circola evaporando (assorbendo calore) e condensando (cedendo calore), e un fluido secondario meno volatile, detto assorbente.

Usi agricoli

La geotermia in agricoltura può essere utilizzata per riscaldare serre, in questo modo è possibile ottenere prodotti agricoli in condizioni stabili tutto l'anno, indipendentemente dalle condizioni climatiche. Il fluido geotermico è utilizzato anche per irrigare e/o riscaldare il terreno stabilizzando la temperatura del suolo attorno ai 20-30°C così da prolungare la stagione di crescita delle coltivazioni. Inoltre può essere utilizzato per

incrementare la produzione di alghe di origine tropicale o subtropicale, quali ad esempio la spirulina (*Arthrospira platensis*): un cianobatterio che cresce vigorosamente in condizioni di forte luminosità, temperature attorno ai 35°C ed in mezzi di coltura alcalini.

Acquacoltura

Il fluido geotermico è utilizzato per l'allevamento di organismi acquatici, principalmente pesci, crostacei e molluschi al fine di aumentare in maniera semplice e a prezzi contenuti il tasso di produzione di specie autoctone, nonché allevare di esotiche. Rappresenta una possibilità di utilizzo del calore del sottosuolo piuttosto diffusa in tutto il mondo ed è in particolare espansione in Francia, Grecia, Ungheria, Islanda, Nuova Zelanda e Stati Uniti;

Applicazioni industriali

- Essiccazione (con fluidi inferiori ai 150°C) di varie tipologie di prodotti di origine vegetale (pomodoro, tabacco, mais, legumi, frutta, riso, peperoncini, aglio, cotone, piretro, ecc.) e animale (carne e pesce). Trattamento del latte (pastorizzazione): con fluidi inferiori ai 100°C il calore è impiegato per la pastorizzazione. Esempi di applicazioni sono in Romania, dove il calore è impiegato per la pastorizzazione e successivamente recuperato per preriscaldare il processo di produzione della polvere di latte e in Kenya. In alcuni caseifici toscani i fluidi geotermici coprono sono usati per la pastorizzazione, produzione di ricotta e stufatura della cagliata.
- Agroalimentare: distillazione, decongelamento, sbucciatura, sbollentatura e sterilizzazione, oltre che nei processi produttivi e per controllare la stagionatura, maturazione e invecchiamento di prodotti come birra, salumi e vino.
- Desalinizzazione: in Francia e nel sud della Tunisia impianti riescono a desalinizzare le acque attraverso la loro semplice evaporazione e condensazione. Questo tipo di applicazioni è particolarmente utile per coltivazioni in serra, in aree desertiche o semidesertiche.
- Settore chimico: produzione di borati e acido borico, essiccazione della diatomite, recupero di anidride carbonica e metano (CO₂ e CH₄) dai fluidi endogeni, a valle di un impianto geotermoelettrico.

Approfondimento

I paesi che maggiormente utilizzano la geotermica per usi diretti sono Cina, USA, Giappone, Islanda e Germania. Nel resto del mondo lo sviluppo di queste tecnologie è lento, dovuto principalmente alla concorrenza dei combustibili fossili. L'applicazione più diffusa è sicuramente il teleriscaldamento, che a partire dal 2005 ha visto un significativo incremento. Il 50% degli impianti di teleriscaldamento del nostro paese sono concentrati in quattro regioni (Toscana, Lombardia, Emilia-Romagna e Piemonte), il record per la rete più estesa a livello nazionale spetta al teleriscaldamento di Torino. Le città più virtuose sono Ferrara e Brescia, dove negli anni '70 venne avviato un progetto innovativo per riscaldare gli edifici, e oggi oltre il 70% degli edifici civili e industriali vengono riscaldati attraverso teleriscaldamento (<https://www.enelgreenpower.com/it/learning-hub/energie-rinnovabili/e-nergia-geotermica/teleriscaldamento>).

I diversi utilizzi della risorsa geotermica possono essere integrati in un sistema continuo e sequenziale, definito "a cascata". Per uso a cascata si intende l'impiego successivo del calore geotermico a differenti livelli di temperatura, in modo da massimizzare l'efficienza energetica complessiva della risorsa.

Ad esempio, un fluido geotermico ad alta temperatura può essere inizialmente utilizzato per la produzione di energia elettrica; successivamente, il fluido residuo, a temperatura più bassa, può essere impiegato per il



riscaldamento urbano di quartieri o piccole comunità, oppure per processi produttivi quali la pastorizzazione del latte, la birrificazione o l'essiccazione di prodotti alimentari. Infine, le temperature ancora più moderate possono essere impiegate in attività del settore terziario, come il riscaldamento di serre o l'acquacoltura (figura 3.15). L'adozione di sistemi a cascata consente di utilizzare pienamente il potenziale termico della risorsa geotermica, migliorandone il rendimento energetico complessivo e contribuendo alla sua sostenibilità nel lungo periodo.

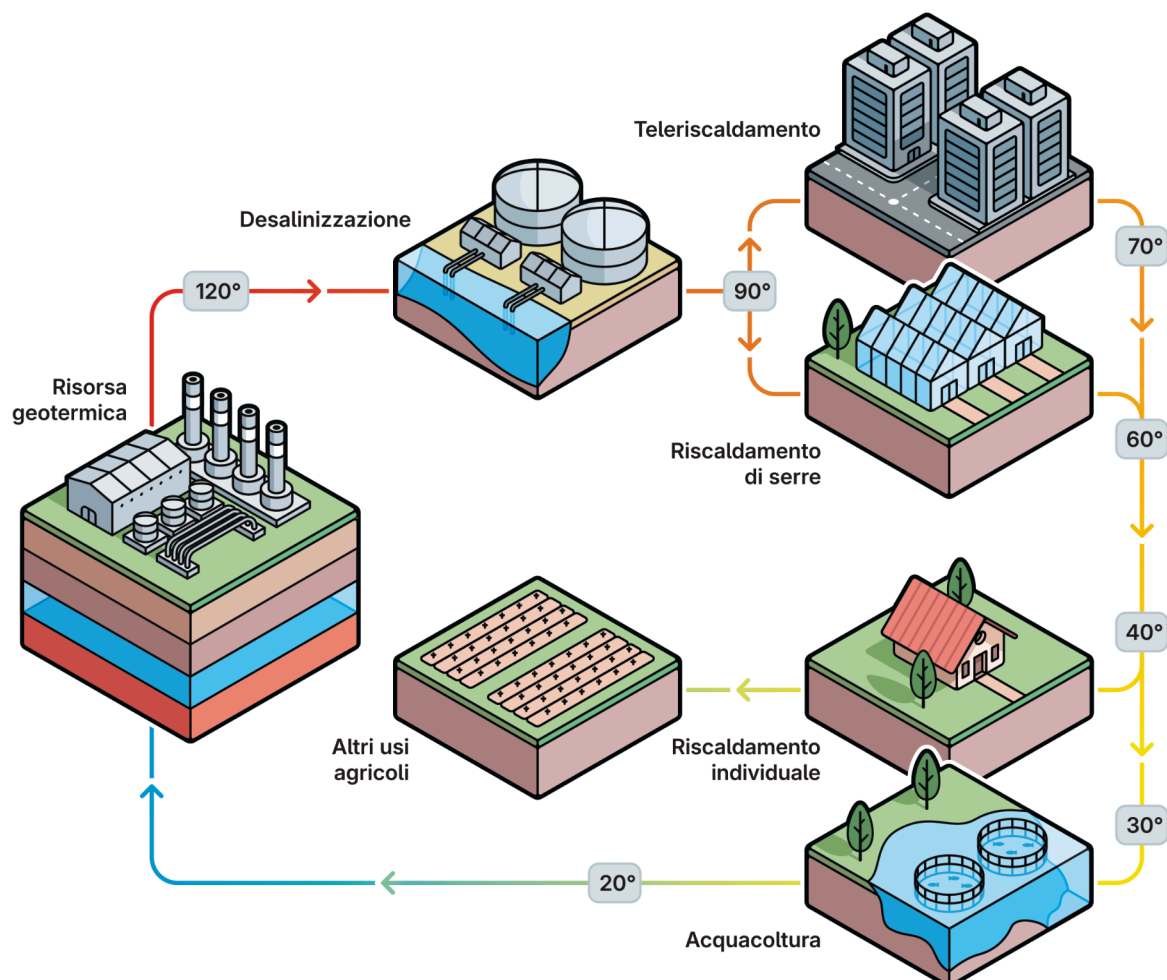


Figura 3.15: l'utilizzo delle risorse geotermiche a livelli a cascata si riferisce a una strategia di gestione e utilizzo sequenziale del calore geotermico che consente di massimizzare l'efficienza energetica impiegando il calore rilasciato a diversi livelli di temperatura. Questo processo coinvolge diverse tecnologie, ciascuna delle quali opera a differenti temperature di esercizio, e permette di usare al massimo l'energia disponibile. Questa configurazione ottimizza l'uso della risorsa geotermica, minimizzando gli sprechi e aumentando il rendimento energetico complessivo.

5 - In quali Paesi viene prodotta energia geotermoelettrica: esempi in Italia e nel mondo

Cenni storici

Il primato dell'uso della geotermia per finalità energetiche è tutto italiano e risale all'inizio del Novecento, in provincia di Pisa, a Larderello, dove è stato costruito il primo impianto geotermico della storia. Nella realtà, sin dalla preistoria gli uomini hanno utilizzato i prodotti vulcanici e utilizzato il calore per trattare il cibo e

godersi i benefici dei bagni termali. Sappiamo che gli Etruschi, le cui città sorgevano in prossimità delle aree geotermiche del Centro Italia, utilizzavano alabastro, travertini, ossidi di ferro, fanghi termali come merce di scambio. I resti più antichi del complesso termale etrusco di Sasso Pisano, in Toscana, risalgono al III secolo a.C. I romani hanno poi ereditato e amplificato la passione per le terme con la costruzione di imponenti edifici termali in tutte le città. In questo periodo storico cresce l'interesse geotermico per la Toscana e la sua Valle del Diavolo, così chiamata per la presenza di soffioni boraciferi e geyser. Le *Aquas Volaternas* e le *Aque Populanie* – oggi Larderello e Sasso Pisano – compaiono come importanti siti termali nella *Tabula Peutingeriana*, celebre carta stradale dell'Impero Romano. La caduta dell'impero Romano porta ad un declino dell'utilizzo termale e le aree geotermiche sono associate ad ambienti infernali.

La balneoterapia e l'uso di minerali idrotermali e altri sottoprodotti cominciano ad avere una nuova fioritura in Italia nel Rinascimento toscano. La regione boracifera passa sotto il dominio dei Medici a seguito della così detta Guerra delle Allumiere tra i Comuni di Firenze e Volterra. Viene scoperto l'acido borico - che verrà poi largamente utilizzato in farmacia, soprattutto per le malattie degli occhi - nelle manifestazioni geotermiche toscane di Monterondo Marittimo e Castelnuovo Val di Cecina. Diventa di fondamentale importanza ottimizzare i processi di estrazione.

Ottocento: l'ingegnere e imprenditore francese François Jacques de Larderel sviluppa una tecnica per la raccolta del vapore emesso dai lagoni (le fessure del suolo da cui sgorgano acqua bollente ed emanazioni dal sottosuolo), con l'uso del "lagone coperto" (figura 3.16). Una cupola semisferica in muratura posta sopra il lagone capta il vapore e ne permette l'uso come fonte di calore: alimenterà le caldaie necessarie a estrarre l'acido borico dai fanghi naturali. A dare manforte alle idee di de Larderel arriva l'ingegnere italiano Vincenzo Manteri. È lui che promuove le prime perforazioni per reperire il vapore dal sottosuolo. L'uso industriale dell'energia geotermica valica i confini italiani. A Boise, negli Stati Uniti, viene inaugurato il primo sistema di riscaldamento urbano. A Larderello Piero Ginori Conti, direttore generale dal 1894, accende le prime cinque lampadine alimentate a geotermico, grazie a una macchina composta da un motore alternato accoppiato a una dinamo. Nel 1913, nasce in Italia la prima centrale geotermica del mondo: Larderello 1.



Figura 3.16: il "lagone coperto" di F. J. de Larderel in un'incisione da "Album des diverses localités formant les établissements industriels d'acide boracique fondés en Toscane (1818) par le Comte de Larderel".

Novecento: l'esempio italiano viene seguito da altre nazioni. Viene perforato il primo pozzo geotermico in Giappone, a Beppu, nel 1921 seguiranno gli Stati Uniti con The Geysers in California. Verso il 1928 l'Islanda comincia a utilizzare i fluidi dei propri sistemi geotermici, soprattutto acqua calda, per il riscaldamento degli edifici. Viene inaugurata la centrale Larderello 2. Durante la Seconda Guerra Mondiale tutti gli impianti della Regione Boracifera vengono distrutti. Dopo la ricostruzione, la terza centrale di Larderello diventa la più potente del mondo. La potenza installata raggiunge i 127.650 kW. La geotermia si espande. Un primo impianto geotermico entra in esercizio in Nuova Zelanda, l'anno successivo ne arriverà uno in Messico e a seguire in molti altri Paesi. Negli anni '60 l'Unione Sovietica presenta il modello di centrale a ciclo binario (vedi paragrafo 4). Questa tecnologia permette la generazione di energia elettrica da fonti a temperatura più bassa e agevola la diffusione del geotermico, anche se con un rendimento minore.

Dove si usano risorse geotermiche per produrre energia geotermoelettrica?

Sono 29 le nazioni, distribuite su tutti i cinque continenti, in cui l'energia elettrica viene prodotta coltivando la geotermia. Nel 2020, la potenza installata nel mondo per la generazione elettrica era di circa 16.000 MWe con una produzione lorda di circa 95.000 GWh/a. Nella tabella 3.1 è possibile vedere i 10 leader mondiali in questo settore dove l'Italia ricopre l'ottava posizione, mentre a livello europeo è seconda dietro la Turchia.

Nazione	MWe installati nel 2020	Nazione	MWe installati nel 2020
1. Stati Uniti	3.700	6. Messico	1.105
2. Indonesia	2.289	7. Nuova Zelanda	1.064
3. Filippine	1.918	8. Italia	916
4. Turchia	1.549	9. Giappone	550
5. Kenya	1.193	10. Islanda	755

Tabella 3.1: leader mondiali produttori di energia geotermoelettrica (adattata da Hutterer 2020).

Attualmente, in Italia, si produce energia geotermoelettrica esclusivamente nella Regione Toscana, nei campi di Larderello-Travale e in quelli Bagnore e Piancastagnaio vicino il Monte Amiata. In queste aree sono presenti 37 impianti di generazione con una capacità installata totale di circa 916 MWe e una produzione lorda di energia elettrica pari a 6.105 GWh/anno. L'energia geotermica prodotta copre il 2% del fabbisogno energetico nazionale e fornisce più del 30% dell'elettricità necessaria alla Regione Toscana (Hutterer, 2021). In Toscana, l'energia geotermica fornisce riscaldamento a circa 10.000 famiglie, 30 ettari di serre, e numerose industrie che operano nel campo agricolo-alimentare, floricoltura e artigianato e lavorazione del cuoio. I 16 comuni (Abbadia San Salvatore, Arcidosso, Castel del Piano, Castelnuovo Val di Cecina, Chiusdino, Montecatini Val di Cecina, Monterotondo Marittimo, Monteverdi Marittimo, Montieri, Piancastagnaio, Pomarance, Radiconfani, Radicondoli, Roccalbegna, San Casciano dei Bagni, Santa Fiora) che ospitano le otto concessioni geotermiche gestite da ENEL Green Power, percepiscono un contributo annuo in denaro in funzione dell'energia elettrica prodotta (<https://www.regione.toscana.it/-/la-geotermia-in-toscana-i-comuni-geotermici>). Per quanto riguarda gli usi diretti sono diffusi non solo in Toscana, ma anche, e soprattutto, nel nord della penisola, con impianti locali di riscaldamento/raffrescamento a sonde geotermiche e alcuni esempi di tele-riscaldamento.

Tra gli anni '50 e '90 in Italia fu condotta una profonda esplorazione geotermica da parte della Joint-Venture ENEL-AGIP, soprattutto nel Lazio, Campania e Sicilia con le isole di Vulcano e Pantelleria. Purtroppo questa fase esplorativa non portò a risultati interessanti per gli standard dell'epoca che prevedevano il reperimento di risorse con efficienze molto elevate dove poter installare impianti di notevole capacità (grandi dimensioni).



Oggi la visione è mutata e si è compresa l'utilità di sviluppo anche di piccoli impianti che possono soddisfare la domanda energetica locale.

Nonostante le buone potenzialità geotermiche del sottosuolo italiano, la crescita del settore negli anni è molto lenta. Un incremento delle attività, secondo una stima al 2030 prodotta dall'Unione Geotermica Italiana, potrebbe portare a un raddoppio rispetto all'attuale potenza installata, con circa 2.000 MWe e una produzione lorda di circa 12TWh/a (<https://www.unionegeotermica.it/la-geotermia-in-italia>). Oltre la Toscana, in Italia ci sono molte altre zone con abbondanti sistemi geotermici potenzialmente idonei alla produzione. In Veneto è nota la zona dei Colli Euganei vicino a Padova; in Friuli-Venezia Giulia, la zona intorno alla città di Grado; il Lazio settentrionale; la Campania, soprattutto nei dintorni di Napoli tra i campi Flegrei e l'isola di Ischia, la Sicilia ad Alcamo, Sciacca, Isole Eolie e Pantelleria, l'ovest della Sardegna e infine l'Emilia Romagna.

Tra i paesi europei, Italia e Islanda si distinguono, subito dopo la Turchia, per la maggiore potenza geotermica installata. Grazie alla sua posizione, ubicata in corrispondenza della dorsale medio-atlantica, l'Islanda ha un enorme potenziale geotermico con una capacità installata di oltre 700 megawatt, che riesce a impiegare molto bene producendo oltre il 90% della sua elettricità in impianti geotermici. La Turchia ha invece una potenza installata di circa 1.500 megawatt, con un'energia prodotta di 7,7 terawattora e una crescita esponenziale avvenuta negli ultimi 10 anni. Il resto dell'Europa presenta invece valori di capacità installata molto esigui e a titolo di esempio citiamo la Germania con 43MW, Portogallo 33MW, Francia 20MW, Croazia circa 17 MW e Austria, Belgio e Ungheria con una potenza installata complessiva inferiore a 6MW.

A livello mondiale, gli Stati Uniti sono il paese leader nella produzione di energia geotermica, con una capacità installata di 3.700 MW, seguiti da Indonesia, Filippine, Kenya, Messico e Nuova Zelanda. In questi Paesi, la presenza di impianti geotermici è significativa, contribuendo in modo concreto alla produzione di energia rinnovabile.

Per avere una panoramica globale della distribuzione degli impianti geotermoelettrici nel mondo, è possibile consultare il sito web di Think Geo Energy (figura 3.17), che fornisce informazioni dettagliate anche sui piccoli impianti, comprese la capacità installata e la tecnologia adottata.

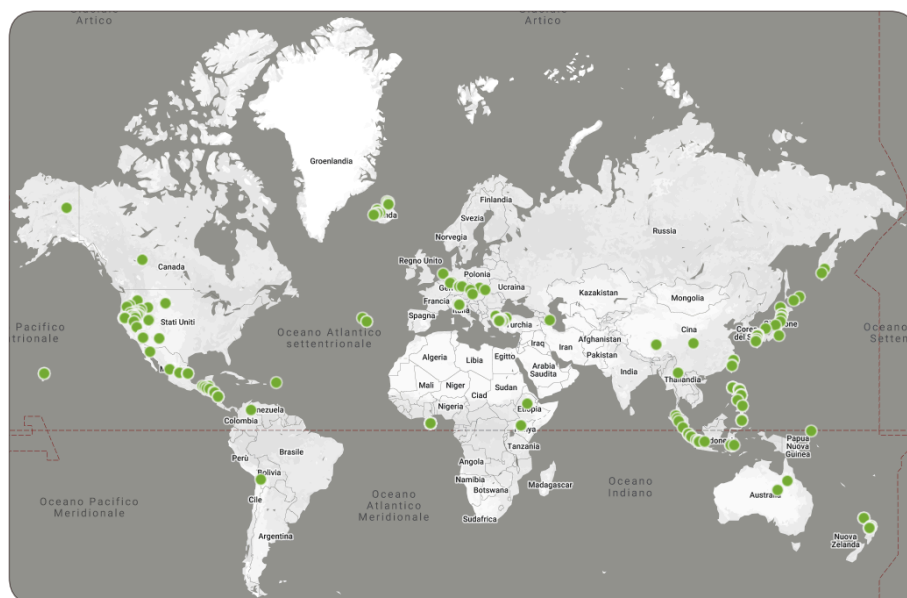


Figura 3.17: distribuzione globale degli impianti geotermici utili alla produzione di energia elettrica (da <https://www.thinkgeoenergy.com/map>)



Sezione 4

Rischi e impatti ambientali associati all'utilizzo della geotermia

A cura di Roberta Maffucci e Monia Procesi

1 - Introduzione

L'energia geotermica svolge un ruolo significativo nella transizione energetica verso fonti rinnovabili e sostenibili, offrendo notevoli vantaggi ambientali rispetto ai combustibili fossili. Tuttavia, per completezza di informazione e conoscenza, è fondamentale considerare anche i potenziali impatti ambientali legati al suo utilizzo. Attraverso l'adozione di tecnologie avanzate e misure di mitigazione adeguate, questi effetti possono essere prevenuti, eliminati o ridotti al minimo, garantendo così un utilizzo sostenibile delle risorse geotermiche e tutelando sia l'ambiente sia la salute umana.

Nella seguente sezione verranno quindi forniti chiarimenti su:

- Le strategie di utilizzo per garantire la sostenibilità della risorsa geotermica.
- I rischi e gli impatti ambientali potenzialmente associati al suo uso, misure di mitigazione da adottare e normative in merito.
- Confronto con altre fonti energetiche, sia fossili che rinnovabili, e vantaggi che ne derivano dal suo utilizzo dal punto di vista ambientale ed energetico.
- Come riconoscere ed evitare le notizie false: esempi di fake news.

2 - Strategie di utilizzo per garantire la sostenibilità della risorsa geotermica

L'energia geotermica è una forma di energia pulita e rinnovabile, caratterizzata da numerosi vantaggi. Questa forma di energia utilizza il calore naturale proveniente dall'interno della Terra, una risorsa disponibile con continuità e inesauribile sulla scala dei tempi umani per produrre sia energia elettrica che termica. Rispetto alle fonti di energia tradizionali come i combustibili fossili, la geotermia ha l'enorme vantaggio di essere una fonte rinnovabile, a basso impatto ambientale e con emissioni di gas serra molto ridotte. Inoltre, la sua affidabilità e disponibilità costante la rendono un'opzione particolarmente attrattiva, a differenza di altre energie rinnovabili come il solare e l'eolico, che sono dipendenti dalle condizioni meteorologiche o dal ciclo giorno/notte.

Negli ultimi decenni, l'utilizzo dell'energia geotermica è cresciuto in modo significativo. A seconda del tipo di risorsa da cui viene estratto il calore – e quindi della temperatura della sorgente (figura 4.1) – questa forma di energia può essere impiegata in diversi modi, come illustrato in dettaglio nella sezione 3. Tuttavia, per garantirne la disponibilità anche alle generazioni future e per mantenere un equilibrio di sostenibilità ambientale, sociale ed economica, è fondamentale adottare pratiche di utilizzo responsabile e sostenibile.

Approfondimento: che cosa si intende per sostenibilità?

La sostenibilità consiste nell'utilizzo efficiente e rispettoso delle risorse, come gli habitat naturali, le materie prime, l'energia e il lavoro umano, in modo da garantirne la conservazione a lungo termine senza esaurirle. Questo concetto si fonda sull'idea fondamentale del rispetto verso le generazioni future, motivo per cui la sostenibilità è spesso definita come "capacità di affrontare il futuro" o "giustizia intergenerazionale". La definizione universalmente riconosciuta di sostenibilità risale al 1987



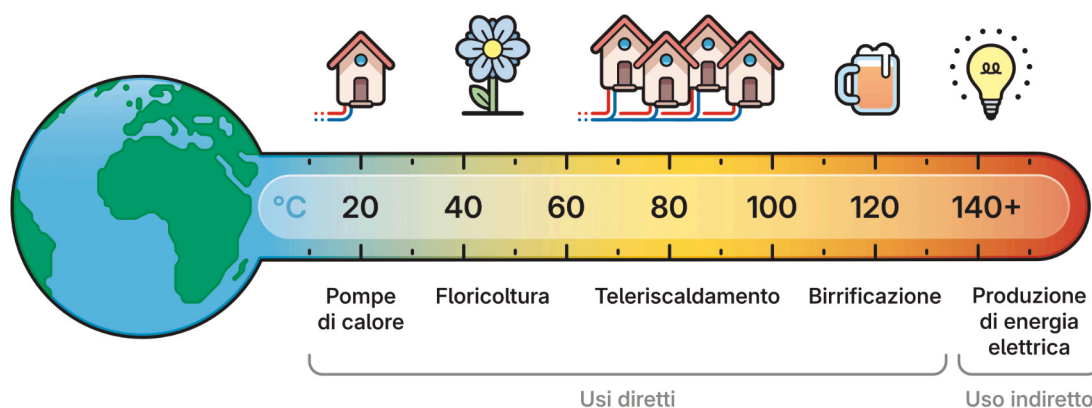


Figura 4.1: utilizzi delle risorse geotermiche in funzione della temperatura.

e si trova nel cosiddetto Rapporto Brundtland, intitolato "Our Common Future" (World Commission on Environment and Development, 1987). In esso, la sostenibilità viene descritta come la condizione di uno sviluppo capace di "assicurare il soddisfacimento dei bisogni della generazione presente senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare i propri". Il messaggio principale, alla base della cosiddetta nozione tridimensionale presentata nel rapporto, è che la sostenibilità implica un benessere ambientale, sociale ed economico costante, e preferibilmente crescente, nonché la prospettiva di lasciare alle generazioni future una qualità della vita non inferiore a quella attuale. In questo contesto, l'energia geotermica può essere considerata una risorsa sostenibile, poiché consente di soddisfare le esigenze energetiche attuali senza compromettere l'ambiente e preservando al tempo stesso l'equilibrio tra i sistemi ambientale, economico e sociale. In tal modo, essa garantisce anche alle generazioni future la possibilità di beneficiarne.

Nell'ambito della geotermia, grazie alla varietà delle tecnologie e delle applicazioni messe a punto negli ultimi anni, è possibile utilizzare la risorsa geotermica in modi altamente efficienti e versatili, in modo da impiegare pienamente il potenziale termico e garantire la sostenibilità della risorsa. Tra le soluzioni più innovative ed efficaci rientrano la cogenerazione, ovvero la produzione combinata di elettricità e calore, e l'impiego "a cascata" delle risorse geotermiche, che permette di valersi del calore residuo in diversi passaggi e per vari usi.

Tutte queste caratteristiche, ovvero il basso impatto ambientale, la rinnovabilità e l'affidabilità, fanno sì che la geotermia abbia un ruolo sempre più rilevante nella transizione energetica globale (figura 4.2).

Le tecnologie geotermiche possono essere progettate non solo per modulare la produzione di energia in base alla domanda, migliorando così la flessibilità e la gestione delle risorse energetiche, ma anche per integrarsi con altre fonti rinnovabili. In questo modo è possibile creare sistemi energetici ibridi capaci di ottimizzare la produzione e garantire un approvvigionamento stabile e continuo.

Nel contesto geopolitico attuale, la geotermia rappresenta un'opportunità concreta e strategica per i Paesi che intendono soddisfare le proprie esigenze energetiche utilizzando risorse locali. Ciò consente di ridurre la dipendenza dalle importazioni di combustibili fossili, spesso soggette a forti fluttuazioni di prezzo e a interruzioni delle forniture dovute a instabilità geopolitiche, promuovendo al contempo l'autosufficienza energetica. Questo aspetto assume un'importanza particolare per le piccole comunità isolate. Se a livello nazionale la geotermia può costituire una fonte integrativa, in contesti di dimensioni ridotte — come le isole — essa può diventare una fonte primaria e sostitutiva, offrendo autonomia energetica e contribuendo non solo alla tutela



Figura 4.2: principali vantaggi nell'utilizzo della risorsa geotermica: generazione costante di elettricità, possibilità di riutilizzo della risorsa e bassa emissione di CO₂.

degli ecosistemi insulari, spesso fragili e di elevato valore naturale, ma anche al rafforzamento di un'economia locale più resiliente e sostenibile.

Un esempio significativo proviene dalle Azzorre, dove l'energia geotermica svolge un ruolo chiave nel soddisfare il fabbisogno energetico locale. Sull'isola di São Miguel, in particolare, questa fonte rinnovabile copre circa il 42% del consumo elettrico, dimostrando come sia possibile ridurre in modo sostanziale la dipendenza dai combustibili fossili anche in contesti insulari e geograficamente isolati (fonte: *European Federation of Geologists*).

🕒 **Approfondimento: il primo impianto ibrido al mondo, la centrale di Stillwater in Nevada**

La centrale di Stillwater in Nevada (figura 4.3) rappresenta un ottimo esempio di cogenerazione elettrica grazie alla coesistenza di geotermia e solare. In particolare, l'impianto integra un sistema geotermico a ciclo binario con impianti solari fotovoltaici e termodinamici. Avviata nel 2009 con una potenza installata di 33 MW, l'impianto ha ampliato la propria produzione nel 2015 con l'aggiunta di 2 MW da solare termico (Fonte: Enel Green Power). Combinando diverse tecnologie di generazione di energia, è stato possibile aumentare la disponibilità di risorse energetiche rinnovabili e ridurre l'intermittenza. In particolare, durante le ore diurne, quando la richiesta di energia è più elevata, la



Figura 4.3: Centrale di Stillwater in Nevada: primo impianto ibrido rinnovabile al mondo in cui si combina il geotermico con il solare.

complementarità tra le diverse fonti rinnovabili consente di garantire una fornitura più stabile ed efficiente. L'impianto ibrido di Stillwater è stato insignito del premio Geothermal Energy Association Honors nel settore "Progresso tecnologico" per ben quattro anni consecutivi, dal 2012 al 2015.

3 - Rischi e impatti ambientali associati all'utilizzo della geotermia

Come per tutte le fonti rinnovabili e non, l'utilizzo dell'energia geotermica ha dei rischi associati e produce un impatto sull'ambiente. Tuttavia, grazie all'applicazione di adeguate misure di mitigazione basate su un'attenta gestione della risorsa e sull'uso di moderne tecnologie, questi effetti possono essere ridotti al minimo o annullati (Giamberini et al., 2016).

Nelle sezioni che seguono, verranno approfonditi i potenziali impatti prodotti dalla geotermia sui diversi elementi naturali (come aria, acqua, suolo) e sull'ambiente antropizzato (impatto visivo, rumore e gestione dei rifiuti), e quali soluzioni di mitigazione vengono adottate per proteggerli. Verranno innanzitutto distinti gli effetti ambientali legati ai grandi impianti geotermici, che producono energia elettrica, da quelli dei piccoli impianti locali che utilizzano temperature al di sotto dei 150°C. È importante inoltre sapere che il tipo e l'entità del possibile impatto ambientale mutano a seconda della fase in cui il progetto geotermico si trova (figura 4.4). Gli impatti sull'ambiente tendono infatti a essere più evidenti ma temporanei durante le fasi iniziali, come l'esplorazione e la costruzione. Una volta che l'impianto entra in funzione a regime, l'impatto ambientale si riduce al minimo, tanto da raggiungere livelli di trascurabilità, soprattutto grazie all'adozione di tecnologie moderne e a pratiche gestionali attente a garantire la sostenibilità.



Figura 4.4: fasi di sviluppo di un progetto geotermico per usi indiretti (modificata da Calcagno et al., 2010).

🔍 **Approfondimento: definizioni fondamentali — rischi e impatti ambientali**

Il rischio può essere definito come la probabilità che un certo evento possa causare danni o avere conseguenze negative. Nel contesto della geotermia, questi rischi potrebbero includere, ad esempio, fenomeni come sismicità indotta o subsidenza legati all'estrazione e all'immissione nel sottosuolo del fluido geotermico, che tuttavia possono essere attentamente monitorati e gestiti con tecniche avanzate. D'altra parte, l'impatto ambientale si riferisce alle conseguenze effettive che

una certa attività, come l'estrazione di fluidi geotermici, può avere sull'ambiente circostante. Questo include l'effetto sui sistemi naturali, come acqua, aria e suolo, nonché sugli ecosistemi e sulla biodiversità. Nell'ambito della geotermia, gli impatti ambientali possono variare a seconda del tipo di impianto e della tecnologia utilizzata e possono includere alterazioni della qualità delle acque e dell'aria, nonché modifiche del paesaggio.

Effetti ambientali collegati alle centrali geotermoelettriche (usi indiretti)

a - Aria: emissioni di gas in atmosfera

I fluidi geotermici utilizzati per produrre energia elettrica contengono naturalmente, oltre alla frazione di vapore, anche una frazione di gas non condensabili che vengono rilasciati in atmosfera tramite le torri di raffreddamento. La quantità e la concentrazione dei gas emessi dagli impianti variano a seconda del tipo di serbatoio geotermico, della tecnologia della centrale e della sua potenza. Studi recenti (Lenzi et al., 2021; Sbrana et al., 2021) hanno dimostrato che la quantità di gas non condensabili emessa dagli impianti geotermici situati in aree idrotermali è equivalente a quella che verrebbe rilasciata naturalmente dal sistema. Ciò indica che tali emissioni non costituiscono un'aggiunta al bilancio atmosferico locale, piuttosto una sostituzione delle emissioni naturali.

I principali gas incondensabili includono:

- Anidride Carbonica (CO_2): È il componente principale della frazione gassosa emessa dagli impianti geotermici (spesso oltre il 90%). Nonostante ciò il fattore di emissione geotermico medio per la CO_2 è inferiore di un ordine di grandezza rispetto a quello delle centrali elettriche a gas naturale (circa 450 g/kWh). Questo dimostra che in media la geotermia emette meno gas serra rispetto alle fonti fossili (Fridriksson et al., 2017).
- Acido Solfidrico (H_2S): dopo la CO_2 è il gas incondensabile più abbondante. Ha un caratteristico odore di uova marce ed è naturalmente presente nelle emissioni idrotermali e vulcaniche, e nei fluidi geotermici. Per mitigarne l'impatto, le centrali geotermiche in Italia sono dotate di sistemi di abbattimento specifici (AMIS) che ne riducono drasticamente i livelli, garantendo il rispetto delle normative nazionali.
- Metano (CH_4): è un gas serra, secondo solo alla CO_2 per quantità ma con un elevato potenziale di riscaldamento sul breve periodo. Tale gas può essere rilasciato spontaneamente dal terreno anche in assenza di un utilizzo non industriale del fluido geotermico. Viene infatti prodotto nei sistemi geotermici, sia per decomposizione termica della materia organica, sia per reazioni inorganiche catalizzate da elevate temperature (Etiope et al., 2007).
- Mercurio (Hg): è un elemento metallico molto volatile, i vapori possono diffondersi per alcuni chilometri e legarsi al particolato fine. È presente naturalmente nei fluidi geotermici in basse concentrazioni, ma la sua emissione in atmosfera può essere legata anche alle attività estrattive. È un elemento tossico ed è consigliabile garantire livelli inferiori rispetto al livello minimo di rischio (200ng/m³ secondo USA ATSDR - Agency for Toxic Substances and Disease Registry). Per mitigarne l'impatto, le centrali geotermiche in Italia sono dotate di sistemi di abbattimento specifici (AMIS) che ne riducono drasticamente i livelli.
- Ammoniaca (NH_3): è un gas minore emesso dagli impianti geotermici. Il suo impatto è dovuto, come per altri elementi (arsenico e boro), al fatto che agisce da precursore del particolato atmosferico (PM) ovvero reagisce in atmosfera con altri elementi per formare particelle fini di sali di ammonio, contribuendo così all'inquinamento dell'aria.



⬇ **Misure di mitigazione**

Per ridurre e controllare le emissioni di gas non condensabili e di microinquinanti in atmosfera derivanti dall'utilizzo dei fluidi geotermici, vengono applicate diverse misure di mitigazione tecnologiche e gestionali, finalizzate a minimizzare l'impatto ambientale degli impianti. Su tutte le centrali geotermiche italiane sono installati Sistemi AMIS (Abbattimento Mercurio e Idrogeno Solforato) che garantiscono l'abbattimento >95–99% di H_2S e Hg tramite ossidazione catalitica e adsorbimento su carbone attivo. Grazie a questo sistema, si riduce drasticamente anche il caratteristico odore di zolfo, favorendo una migliore integrazione degli impianti con il territorio circostante. Inoltre sono previste attività di monitoraggio degli inquinanti in atmosfera provenienti da impianti geotermoelettrici da parte dell'Operatore con la supervisione dell'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale (ARPA). Il monitoraggio deve assicurare adeguata copertura del territorio e, in particolare, delle maggiori aree popolate attraverso un adeguato numero di punti di campionamento. Esistono inoltre anche soluzioni tecnologiche di frontiera utili alla riduzione delle emissioni in atmosfera di anidride carbonica e derivanti dagli impianti geotermici, tra queste ci sono i sistemi di Cattura e Stoccaggio (CCS), che prevedono l'immagazzinamento permanente del gas in formazioni geologiche profonde. L'Islanda è uno dei Paesi più all'avanguardia nella sperimentazione di questa tecnologia applicata alla geotermia e il progetto Carbfix ne è un esempio.

🕒 **Approfondimento: il progetto Carbfix di CCS in Islanda**

L'Islanda possiede la più alta percentuale di energia da fonti rinnovabili in tutta Europa: oltre l'86% della sua elettricità trae origine da fonti rinnovabili e circa il 66% di questa proviene dalle sue risorse geotermiche. Questo Paese è all'avanguardia anche nel campo dello stoccaggio della CO_2 . Uno dei progetti più innovativi è il CarbFix che ha come obiettivo la trasformazione della CO_2 catturata dagli impianti geotermici in minerali solidi. Il processo inizia con la cattura della CO_2 emessa dalle centrali geotermiche, che viene poi disciolta in acqua e iniettata nel sottosuolo in formazioni rocciose ricche di basalto. A contatto con il basalto, la CO_2 disciolta reagisce chimicamente formando minerali carbonatici solidi (figura 4.5). Questo processo avviene in pochi anni, permettendo una conversione relativamente rapida della CO_2 in forma solida e stabile. L'obiettivo del progetto è quello di realizzare tecnologie avanzate per creare impianti geotermoelettrici a impatto zero.

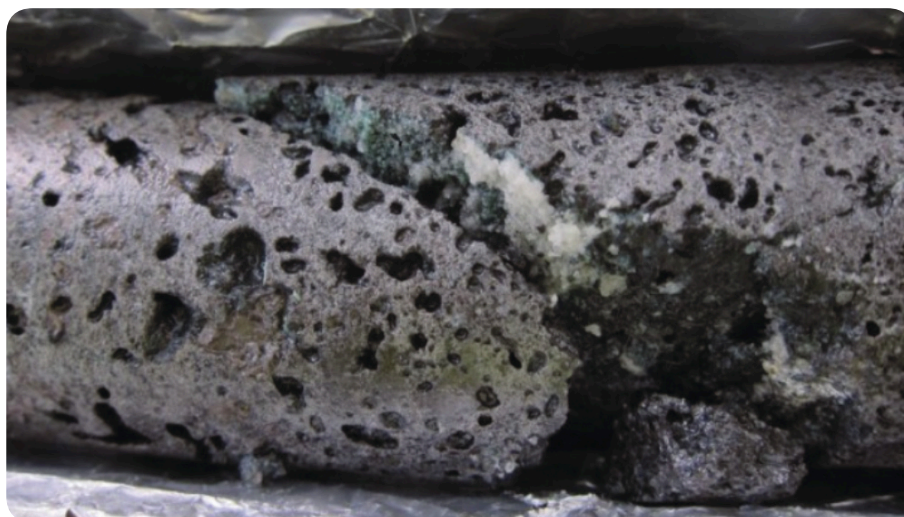


Figura 4.5: roccia di basalto contenente il carbonato di calcio (parte bianca) formatosi dopo l'iniezione nel sottosuolo della soluzione di CO_2 e acqua.

b - Acqua: impatto sulle risorse idriche

Il potenziale impatto della geotermia sui corpi idrici, sia superficiali che sotterranei, può essere legato sia alla naturale circolazione dei fluidi geotermici sia alle attività connesse all'utilizzo della risorsa.

In particolare, l'attenzione è rivolta alla possibile alterazione della qualità delle acque in presenza di concentrazioni elevate di elementi e composti chimici naturalmente contenuti nei fluidi geotermici, quali arsenico, mercurio, boro, zolfo, litio, fluoro e altri metalli in tracce.

Un'adeguata gestione dei fluidi geotermici, attraverso un corretto sistema di reimmissione nel sottosuolo consente di minimizzare il rischio di interazioni con le falde acquifere o con i corpi idrici superficiali.

Oltre agli aspetti qualitativi, la geotermia può potenzialmente incidere sul bilancio idrico locale, sebbene in misura generalmente inferiore rispetto ad altre fonti energetiche (Clark et al., 2010). I maggiori utilizzi d'acqua si registrano durante la perforazione dei pozzi e nel funzionamento delle torri di raffreddamento. In aree dove la risorsa idrica è limitata, risulta quindi importante adottare strategie di uso efficiente e sostenibile dell'acqua, privilegiando il riciclo e il riutilizzo delle acque di processo.

Misure di mitigazione

Le strategie per minimizzare l'impatto sulle risorse idriche si concentrano su reimmissione dei fluidi e monitoraggio regolare della qualità delle acque e delle pressioni idriche. In particolare, la reimmissione controllata dei fluidi geotermici dopo il loro utilizzo, nella stessa falda di provenienza, è una misura chiave per contribuire alla sostenibilità della risorsa. Questo processo evita la dispersione di sostanze chimiche e minerali contaminanti nell'ambiente e prolunga la vita operativa della risorsa geotermica. Inoltre, il monitoraggio costante della qualità e delle pressioni delle acque sotterranee e superficiali nelle aree adiacenti agli impianti permette di rilevare e affrontare tempestivamente qualsiasi segno di contaminazione.

c - Suolo: subsidenza

La subsidenza consiste in un lento e progressivo abbassamento del suolo che può essere provocato sia da cause naturali, come movimenti tettonici ed eruzioni vulcaniche, sia da attività antropiche. Tra le cause più comuni di subsidenza antropogenica c'è l'estrazione di fluidi dal sottosuolo, tra cui i fluidi geotermici. Nelle aree geotermiche, ma più in generale in tutti quei sistemi in cui c'è estrazione di materiale (es. campi petroliferi e gas, emungimenti intensi di acqua), la pressione nel sottosuolo diminuisce e il terreno soprastante può compattarsi e abbassarsi creando fenomeni di subsidenza. Per prevenire questi rischi, specialmente in zone abitate, vengono condotte approfondite valutazioni ambientali e monitoraggi delle deformazioni del suolo al fine di controllare il fenomeno e operare in piena sicurezza.

Misure di mitigazione

Per prevenire e mitigare il fenomeno della subsidenza vengono adottate diverse azioni che coprono tutte le fasi dell'attività geotermica. Durante l'esercizio dell'impianto geotermico, la misura più efficace nei confronti della subsidenza è reimmettere i fluidi all'interno del sistema geotermico di provenienza. Dopo il loro utilizzo, infatti, i fluidi vengono reimmessi nel sottosuolo, nello stesso serbatoio geotermico, per mantenere stabile la pressione e ridurre il rischio di abbassamenti del terreno. A ciò si aggiunge il controllo del tasso di estrazione per evitare una riduzione eccessiva e rapida della pressione nel serbatoio geotermico, poiché un abbassamento significativo della pressione potrebbe aumentare il rischio di subsidenza. Nella fase operativa dell'impianto, tali azioni vengono inoltre supportate da un monitoraggio continuo dei livelli del suolo e della pressione del serbatoio. Il monitoraggio delle deformazioni del suolo si avvale di metodologie geodetiche avanzate che utiliz-

zano i satelliti, come il GPS che rileva variazioni tra punti fissi al suolo, e l'InSAR (Interferometria Radar ad Apertura Sintetica) che confronta immagini radar satellitari acquisite in momenti diversi per rilevare e monitorare i movimenti della superficie terrestre con una precisione millimetrica, anche su ampie porzioni di territorio.

Approfondimento: la Rete Integrata Nazionale GPS (RING) dell'INGV

L'INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia) monitora le deformazioni del suolo tramite una rete GPS nazionale chiamata RING, attiva dal 2004 e composta da oltre 200 stazioni distribuite in Italia, Grecia e Malta. Il principale obiettivo della rete RING è monitorare le deformazioni del suolo in aree non vulcaniche, al fine di migliorare la comprensione dei movimenti tettonici e delle dinamiche della crosta terrestre. Il monitoraggio consente di rilevare anche fenomeni legati alle attività estrattive, come subsidenza, frane e smottamenti. Queste informazioni sono cruciali per la prevenzione dei rischi e per la corretta gestione del territorio, specialmente in un'area sismicamente attiva come l'Italia. <https://www.ingv.it/monitoraggio-e-infrastrutture/reti-di-monitoraggio/l-ingv-e-le-sue-reti/la-rete-integrata-nazionale-gps-ring>

d - Suolo: sismicità indotta

Con il termine sismicità indotta si intende l'attività sismica che viene generata (indotta) o innescata dalle attività umane connesse all'utilizzo del sottosuolo. Si differenzia dalla sismicità naturale, in quanto quest'ultima è esclusivamente dovuta ai processi naturali di deformazione tettonica della crosta terrestre.

L'iniezione in pressione di fluidi nel sottosuolo è uno dei meccanismi più comuni alla base della sismicità indotta. In un'area di iniezione dove sono presenti pozzi profondi, i fluidi penetrano all'interno delle rocce che si trovano vicino al fondo del pozzo e migrano lungo le zone di maggiore permeabilità generando piccole scosse di norma non percepibili dall'uomo (microsismicità, con magnitudo inferiore a 2). Tra le cause fisiche che possono generare terremoti ci sono diversi fattori: l'aumento della pressione dei fluidi presenti nelle rocce, le variazioni di volume nella crosta terrestre, i cambiamenti di temperatura che fanno dilatare o contrarre i materiali, e anche alcune reazioni chimiche. Inoltre, se in zona sono presenti faglie preesistenti, i cambiamenti nelle condizioni del sottosuolo determinati dall'iniezione dei fluidi possono alterare l'equilibrio delle faglie e favorire l'innescio di terremoti (Kraft et al., 2020, figura 4.6).

In Italia, l'iniezione dei fluidi nel sottosuolo è consentita solo a pressioni molto basse e viene affiancata all'installazione di una rete di monitoraggio sismico per analizzare e controllare l'occorrenza di eventuali eventi sismici. Eventi sismici di maggiore intensità (magnitudo >2.5) sono connessi a particolari tipologie di risorse geotermiche ed utilizzo, come ad esempio gli Enhanced Geothermal Systems (EGS), sistemi geotermici "non convenzionali" che vengono migliorati artificialmente dall'uomo producendo fratturazione attraverso stimolazioni esterne (idraulica o chimica, Calò et al., 2014). In Italia tale pratica non è consentita e l'iniezione di fluidi nel sottosuolo è limitata alla reimmissione (non in pressione) dei fluidi geotermici reflui. I campi geotermici toscani sono infatti sistemi "convenzionali" (quindi non EGS), poiché utilizzano la circolazione idrotermale naturalmente presente nelle rocce serbatoio senza la necessità di effettuare fratturazione artificiale.

Misure di mitigazione

Le misure di mitigazione per la sismicità indotta si basano su studi preliminari e monitoraggi volti a ridurre il rischio sismico legato alle attività geotermiche. Le "Buone Pratiche" internazionali prevedono, già in fase esplorativa, la raccolta di dati geologici, geofisici e geochimici per comprendere la struttura del sistema geotermico e il contesto sismotettonico dell'area. Queste informazioni sono fondamentali per costruire modelli numerici in grado di simulare la risposta del sottosuolo alle operazioni



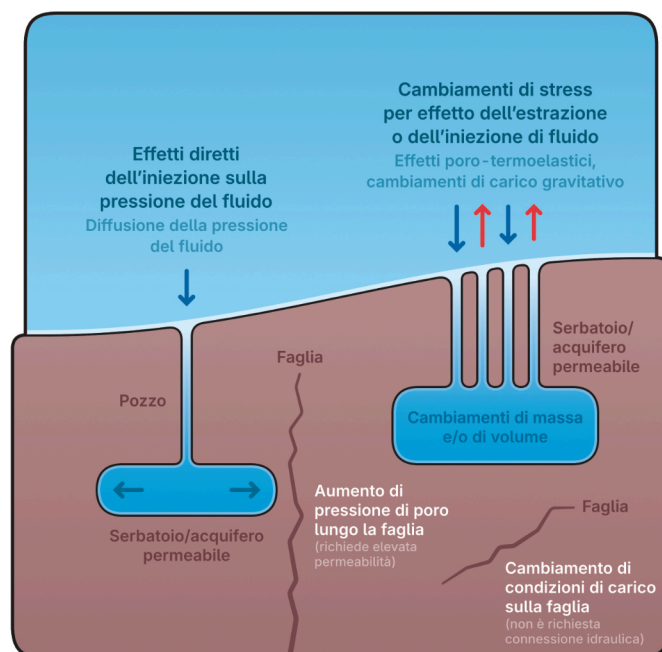


Figura 4.6: illustrazione schematica dei meccanismi di risposta di rocce e faglie a seguito di attività antropiche come estrazione e reimmissione di fluidi nel sottosuolo (da Ellsworth, 2013). Questi processi possono modificare pressione, volume o temperatura nel sottosuolo e, in presenza di faglie già esistenti, alterarne l'equilibrio favorendo l'innesco di terremoti (Kraft et al., 2020).

di estrazione e iniezione, e per stimare il rischio sismico associato. Una pianificazione territoriale accurata consente inoltre, di evitare l'installazione di impianti in zone a elevata sismicità naturale o vicine a faglie attive. Durante la fase operativa dell'impianto vengono installate reti di monitoraggio sismico e geodetico, che permettono di controllare in tempo reale la microsismicità, le deformazioni del suolo e le variazioni di pressione nei serbatoi geotermici, e di adottare azioni tempestive in caso di eventuali eventi sismici indotti.

🕒 **Approfondimento: il Centro per il Monitoraggio delle attività di sottosuolo (CMS) dell'INGV**

Dal 2017, l'INGV è stato incaricato dal Ministero dello Sviluppo Economico (oggi MASE) come Struttura Preposta al Monitoraggio (SPM) delle aree italiane soggette a sfruttamento di georisorse. All'interno dell'INGV, opera il Centro per il Monitoraggio delle attività di Sottosuolo (CMS) che raccoglie, analizza e interpreta dati su sismicità, deformazioni del suolo e pressioni di poro nelle aree interessate da attività antropiche per impiego di georisorse (quali idrocarburi, reimmissione di acque di scarto, stoccaggio di gas naturale, geotermia, sequestro di anidride carbonica, estrazioni minerarie, invasi artificiali) o legate ad altri rischi antropogenici. L'obiettivo del monitoraggio è quello di rilevare eventuali variazioni nei parametri osservati, verificarne la correlazione con le attività umane e, se necessario, attivare azioni di mitigazione per riportare la situazione a condizioni di sicurezza, tutelando persone, impianti e territorio. Per gestire situazioni potenzialmente critiche, viene utilizzato un sistema decisionale a "semaforo", che prevede soglie prestabilite di allerta: se superate, scattano misure di controllo o sospensione delle attività in base alla gravità dell'evento (Indirizzi e Linee Guida per il monitoraggio delle attività di sottosuolo, ILG 2014). Attualmente, tutti i campi geotermici della Toscana sono sottoposti a monitoraggio da parte dell'INGV, che svolge un ruolo fondamentale nel garantire un uso sicuro e responsabile delle risorse del sottosuolo.

e - Ambiente antropizzato: impatto visivo e uso del suolo

Le infrastrutture delle centrali geotermiche possono avere impatti visivi e territoriali che variano sensibilmente nelle diverse fasi di sviluppo di un progetto geotermico. Inizialmente, durante la fase di esplorazione, i disturbi sul territorio sono generalmente temporanei e di entità contenuta, e includono attività come la rimozione localizzata della vegetazione, l'adeguamento delle strade di accesso e la presenza di mezzi pesanti e apparecchiature in movimento. Durante l'operatività dell'impianto invece, gli elementi più visibili e permanenti sono rappresentati dalle strutture industriali. Oggi però la tendenza è quella di decentralizzare la produzione grazie alla costruzione di impianti piccoli e modulari, capaci di fondersi appieno con l'ambiente circostante. Questo approccio non solo riduce l'impatto visivo, ma sfrutta anche il vantaggio intrinseco della geotermia, ovvero un ridotto uso di suolo se paragonato ad altre fonti rinnovabili come il solare o l'eolico.

Misure di mitigazione

Gli studi ambientali rappresentano il punto di partenza fondamentale per la realizzazione di un impianto geotermico in quanto consentono di definire un'adeguata scelta progettuale e urbanistica finalizzata a integrare armoniosamente l'impianto nel paesaggio circostante. Per ridurre l'impatto visivo, si preferiscono siti già coperti da vegetazione ad alto fusto o, nei contesti più spogli, si attuano interventi di rimboschimento con specie locali, così da rispettare l'equilibrio ecologico. Anche l'infrastruttura tecnica viene progettata per ridurre al minimo l'impatto sul territorio: condotte e linee elettriche vengono interrate dove possibile, mentre in alternativa si studiano percorsi che evitino interferenze con l'ambiente e le infrastrutture esistenti. Le tubazioni, inoltre, vengono verniciate con colori naturali per integrarsi meglio nel paesaggio.

Infine, per limitare il consumo di suolo, si punta a ottimizzare gli spazi concentrando in aree ridotte le principali strutture dell'impianto in modo da contenere l'impatto complessivo sull'ambiente.

f - Ambiente antropizzato: rumore

L'inquinamento acustico generato dagli impianti geotermici è un problema essenzialmente temporaneo e confinato alle immediate vicinanze del sito. Il rumore più intenso si manifesta tipicamente durante la fase iniziale, quella di esplorazione e costruzione della centrale. In questo periodo le fonti di disturbo acustico provengono dal traffico dei veicoli pesanti, dai macchinari usati per la movimentazione del terreno, dai gruppi elettrogeni, dalle betoniere e soprattutto dalle operazioni di perforazione e di test dei pozzi. Anche in fase operativa, attività simili possono rendersi necessarie, ma solo occasionalmente per la manutenzione straordinaria o il rinnovo dei pozzi. Sebbene fastidiose, queste emissioni acustiche rappresentano un disturbo di breve durata che cessa non appena l'attività esplorativa e la costruzione della centrale terminano.

Durante la successiva fase di produzione di energia, il rumore si stabilizza ed è associato al funzionamento continuo degli strumenti meccanici ed elettrici dell'impianto, come trasformatori, generatori, torri di raffreddamento, turbine, condensatori, pompe, ventilatori, tubazioni e incluse le parti dell'impianto di reimmissione. L'area di esposizione al rumore si mantiene comunque limitata intorno all'impianto.

Misure di mitigazione

Per minimizzare i disagi causati dal rumore sia alla popolazione che all'ambiente, vengono adottate misure specifiche durante tutte le fasi di vita di un impianto geotermico, dalla costruzione fino al funzionamento a pieno regime. Le principali soluzioni includono l'installazione di barriere acustiche, l'utilizzo di tecnologie a bassa emissione sonora e l'installazione di sistemi di monitoraggio acustico attorno all'impianto in grado di rilevare in tempo reale eventuali superamenti delle soglie previste



dalla normativa, permettendo un intervento tempestivo in caso di anomalie. Oltre agli aspetti tecnologici, si interviene anche sull'organizzazione del lavoro. Le attività più rumorose vengono infatti pianificate in fasce orarie che arrecano il minore disturbo possibile alla popolazione locale. Infine, nella fase di progettazione, si tiene conto della distanza dagli insediamenti umani e da luoghi particolarmente sensibili, come scuole, ospedali o aree protette, così da ridurre l'impatto acustico percepito e garantire una migliore convivenza tra impianto e territorio.

g - Ambiente antropizzato: gestione dei rifiuti

Come ogni impianto industriale, anche le centrali geotermiche generano rifiuti sia durante la costruzione che nel corso dell'attività produttiva. I rifiuti più significativi si producono durante la perforazione dei pozzi, quando vengono prodotti fanghi di perforazione, terre e rocce di scavo. I fanghi, che sono miscele di acqua, argille e additivi chimici, vengono in parte recuperati e riutilizzati. A questi materiali si aggiungono poi rifiuti solidi come imballaggi, legname e piccole quantità di rifiuti assimilabili agli urbani legati alla presenza del personale. Nella successiva fase operativa dell'impianto si producono rifiuti come oli esausti, componenti meccanici usurati e prodotti chimici, oltre ai consueti rifiuti legati alla gestione quotidiana. Tutti questi materiali vengono gestiti secondo le normative ambientali vigenti, con l'obiettivo di ridurre l'impatto sul territorio.

⬇ Misure di mitigazione

La gestione dei rifiuti prevede innanzitutto una fase di separazione e classificazione in cui i rifiuti speciali vengono separati da quelli assimilabili agli urbani, facilitando così il loro corretto trattamento e smaltimento presso centri idonei. Tra i vari tipi di rifiuti prodotti, particolare attenzione è rivolta ai fanghi di perforazione, i quali vengono sottoposti a un processo di separazione e disidratazione per rimuovere la componente liquida. Questo trattamento riduce enormemente il volume complessivo e trasforma il fango in un materiale solido e stabile, più sicuro e facile da trasportare e smaltire. Le terre e rocce di scavo vengono invece gestite separatamente. Se le analisi ne confermano la natura non pericolosa, possono essere riutilizzate per il ripristino morfologico del sito o come materiale in altri cantieri, promuovendo così l'economia circolare. Durante la fase operativa, i rifiuti come oli esausti, batterie e componenti meccanici usurati vengono raccolti e inviati a circuiti di riciclo e smaltimento specializzati, come avviene in qualsiasi altra struttura industriale.

Effetti ambientali collegati alle piccole utilizzazioni locali (usi diretti)

Gli usi diretti delle risorse geotermiche hanno impatti ambientali estremamente ridotti e grazie alla loro natura poco invasiva, sono adatti anche a installazioni in aree sensibili dal punto di vista naturale o paesaggistico. Rispetto agli impianti geotermici destinati alla produzione di energia elettrica, le potenziali criticità di questi sistemi sono estremamente limitate e localizzate all'area immediatamente interessata dall'intervento. I potenziali impatti da considerare sono:

a - Emissioni in atmosfera

I sistemi geotermici utilizzati per le piccole utilizzazioni (es. impianti per riscaldamento/affrescamento) non producono inquinanti gassosi. È stato inoltre dimostrato che questi sistemi possono avere una funzione "regolatrice", contribuendo in alcuni contesti a ridurre significativamente l'emissione di sostanze climalteranti. Lo studio di Wood et al. (2010) dimostra che l'adozione di questi sistemi aiuta a ridurre direttamente le emissioni di gas serra grazie a un minore consumo energetico rispetto ai metodi tradizionali per garantire lo stesso comfort termico.



b - Impatti sulle acque

Si potrebbero verificare durante la realizzazione e la successiva attività dei pozzi, se non gestiti correttamente. È quindi essenziale adottare misure di protezione per preservare l'integrità degli acquiferi. Tra le principali strategie per tutelare le risorse idriche vi sono: prove di tenuta delle sonde, uso di fluidi non inquinanti, impermeabilizzazione adeguata e divieto di perforare oltre la base degli acquiferi superficiali. Queste misure consentono di ridurre al minimo i rischi per le acque sotterranee, garantendo che l'utilizzo della geotermia sia compatibile con la protezione delle risorse idriche, in particolare nelle zone più vulnerabili.

c - Impatti visivi

Gran parte dell'impianto è sotterranea, quindi le modifiche al paesaggio sono minime. Durante la fase di costruzione, l'intervento può provocare disturbi temporanei al terreno, ma una volta completato, il suolo può essere ripristinato facilmente riportando il paesaggio al suo aspetto originario.

d - Rumore

Rappresenta un impatto temporaneo, limitato al periodo di tempo in cui vengono eseguiti i lavori di scavo. Tuttavia, può essere anche causato durante la fase di esercizio dell'impianto dalla pompa di calore. In zone sensibili, come aree residenziali, scuole o ospedali, possono essere adottate soluzioni come barriere fonoassorbenti o involucri insonorizzati per ridurre l'impatto acustico.

e - Gestione dei rifiuti solidi

Vengono prodotti durante la costruzione dell'impianto. In tal caso, l'applicazione di buone pratiche, come il riutilizzo dei materiali e lo smaltimento sicuro, consente di gestire in modo sostenibile i rifiuti, minimizzando l'impatto sull'ambiente e sul paesaggio circostante.

NORMATIVE DI RIFERIMENTO		
Categoria di impatto	Principali riferimenti normativi	Aspetti trattati
ARIA	D.Lgs. 152/2006 Parte V; Direttiva Europea 2010/75/UE (IED Industrial Emissions Directive); Legge Regionale Toscana n.38/2004	Emissioni atmosferiche, limiti, monitoraggio
ACQUA	D.Lgs. 152/2006 Parte III Direttiva 2000/60/CE Linee guida MISE-MATTM 2016	Tutela delle acque superficiali e sotterranee con particolare attenzione alla reimmissione dei fluidi geotermici estratti per evitarne la dispersione e garantire il mantenimento della risorsa

→



SUOLO	D.Lgs. 152/2006 Parte IV	Bonifica, protezione da contaminazioni
	D.Lgs. 152/2006 Parte IV; D.Lgs. 116/2020 (Pacchetto Economia Circolare)	Gestione, smaltimento e recupero dei rifiuti industriali e speciali
	D.Lgs 22/2010; Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018); Linee guida MISE (Dialuce et al., 2014)	Monitoraggio e mitigazione dei fenomeni di subsidenza e sismicità indotta
PAESAGGIO	Legge 42/2004 (Codice dei beni culturali e del paesaggio); Normativa regionale	Tutela del paesaggio, dei vincoli paesaggistici e culturali
RUMORE	L. 447/1995 (Legge quadro sull'inquinamento acustico)	Controllo e limiti di emissione acustica

Tabella 4.1: schema delle normative di riferimento

4 - Confronto con altre fonti energetiche

In questo paragrafo confrontiamo la geotermia con altre fonti energetiche quali combustibili fossili, energia nucleare ed energie rinnovabili, in termini di impatto ambientale, sicurezza e disponibilità. Vengono riportati inoltre i vantaggi nell'utilizzo dell'energia geotermica rispetto alla fonte energetica analizzata.

Combustibili Fossili

I combustibili fossili, detti anche idrocarburi (quali petrolio, carbone e gas naturale), sono oggi la fonte di energia più utilizzata al mondo. Questi combustibili derivano dalla decomposizione di materiale organico che si è accumulato all'interno della crosta terrestre. Il processo di formazione dei combustibili fossili richiede milioni di anni, durante i quali la materia organica, sepolta sotto strati di sedimenti, è sottoposta a elevate pressioni e temperature. L'estrazione dei combustibili fossili avviene mediante tecniche diverse a seconda del tipo di risorsa e della sua ubicazione geologica. Una volta estratti, questi materiali vengono poi trasportati e sottoposti a vari processi di trasformazione per produrre energia. Nonostante la loro ampia diffusione e importanza economica, l'uso dei combustibili fossili comporta significativi impatti ambientali. La combustione di questi materiali rilascia infatti grandi quantità di gas serra contribuendo al riscaldamento globale e ai cambiamenti climatici. Inoltre, l'estrazione e il trasporto di combustibili fossili possono avere impatti negativi sugli ecosistemi locali, causando inquinamento dell'aria e dell'acqua e alterando fortemente il paesaggio.



Vantaggi nell'utilizzo dell'energia geotermica

Il vantaggio principale nell'utilizzo dell'energia geotermica rispetto ai combustibili fossili risiede nella bassa emissione di gas serra. Possibili emissioni di gas possono essere gestite con opportune tecno-



logie attualmente in uso, come il sistema AMIS. L'assenza di combustioni, inoltre, scongiura il rischio di incendi e l'ormai lunga esperienza maturata per gli impianti geotermoelettrici ne garantisce un'ottima affidabilità. Le risorse geotermiche sono praticamente inesauribili nel lungo termine, mentre le fonti fossili sono soggette ad esaurimento e l'estrazione diventa sempre più difficile e costosa. I combustibili fossili portano con sé inoltre, numerose problematiche legate alla geopolitica e alla volatilità dei prezzi (figura 4.7). Molti Paesi fornitori di combustibili fossili sono soggetti infatti a instabilità politica, conflitti e cambiamenti di regime, che possono interrompere le forniture. I prezzi dei combustibili fossili possono inoltre essere estremamente volatili, influenzati da eventi geopolitici, economici e naturali. Questa volatilità può causare incertezza economica e finanziaria per i Paesi importatori e in particolare, l'aumento dei prezzi può avere un impatto significativo sull'economia di un Paese, aumentando i costi energetici per i consumatori e le imprese. La geotermia utilizza invece il calore naturalmente presente all'interno della Terra. Questo tipo di energia rinnovabile rappresenta un'opportunità unica per ogni Paese di utilizzare le risorse territoriali per soddisfare le proprie esigenze di approvvigionamento energetico, promuovendo l'indipendenza energetica e la sostenibilità.

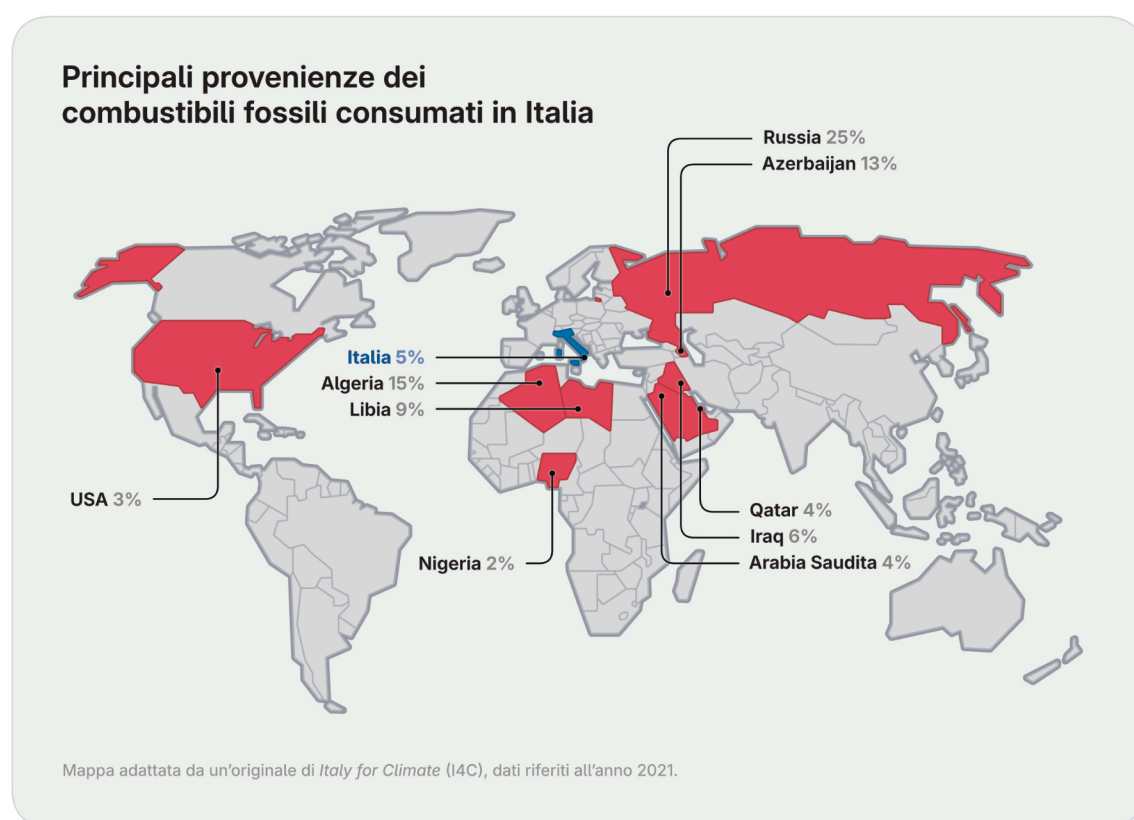


Figura 4.7: principali Paesi fornitori di combustibili fossili per l'Italia (fonte report *Italy for Climate*).

Energia Nucleare

L'energia nucleare, o energia atomica, è l'energia liberata dalle reazioni nucleari e dal decadimento radioattivo sotto forma di energia elettromagnetica e cinetica. Questa energia è sfruttata da diverse tecnologie nucleari e ha un'importanza particolare nel settore energetico. Ci si riferisce comunemente all'energia nucleare come a quella rilasciata in modo controllato nelle centrali nucleari per la produzione di energia elettrica attraverso il metodo della fissione nucleare, una reazione in cui il nucleo di un atomo pesante viene bombardato da neutroni, provocando la sua divisione in nuclei più piccoli. Il materiale più comunemente

utilizzato per la fissione è l'uranio-235 (^{235}U), un isotopo dell'uranio che si trova in natura in piccole quantità. L'energia nucleare offre diversi vantaggi rispetto alle fonti energetiche tradizionali, come i combustibili fossili. Innanzitutto, a parità di energia prodotta, la massa di combustibile nucleare è tipicamente 10 milioni di volte inferiore a quella di un combustibile fossile. Inoltre, le centrali nucleari non emettono gas serra durante il loro funzionamento, rendendole una fonte di energia a basso impatto ambientale in termini di emissioni di CO_2 . Questa fonte energetica, attualmente non più utilizzata in Italia, presenta però dei problemi di sicurezza, come il rischio di incidenti nucleari e la gestione dei rifiuti radioattivi, che la rendono una fonte controversa (figura 4.8).

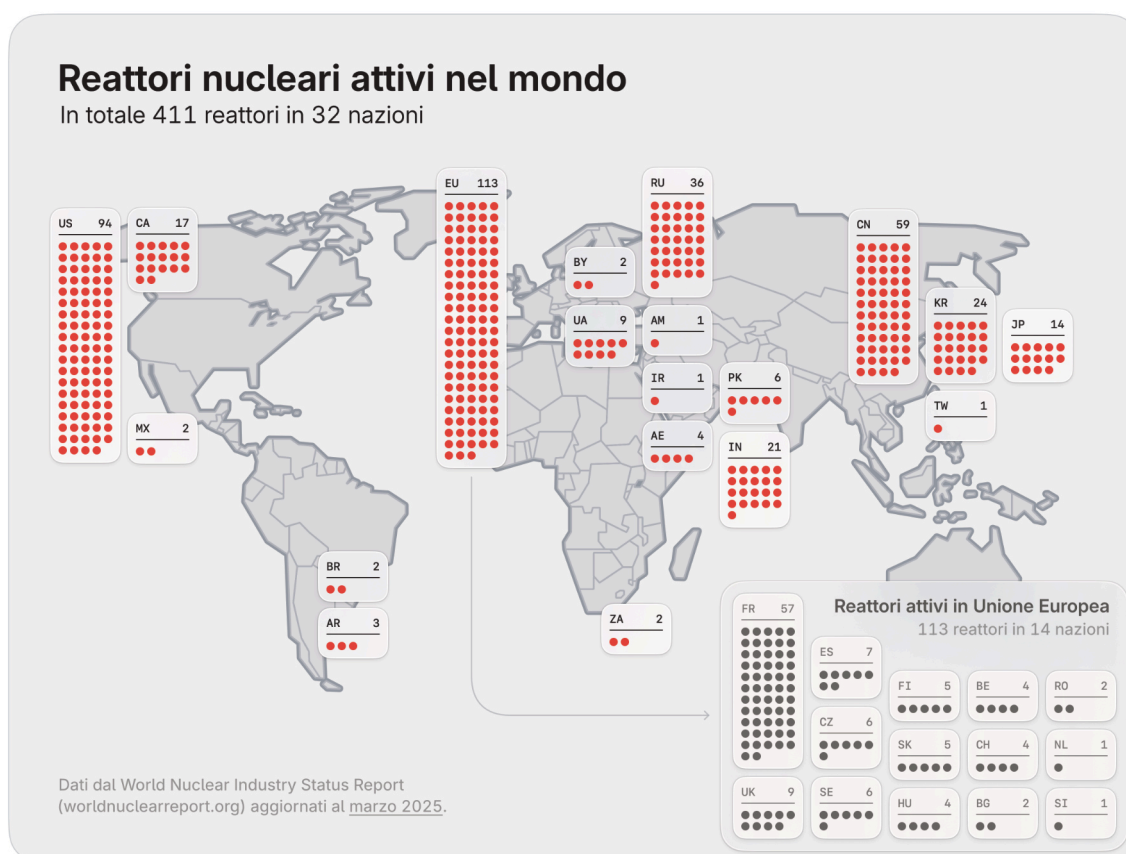


Figura 4.8: distribuzione globale dei reattori nucleari in funzione (411). Gli USA sono il paese con il numero maggiore (94) seguiti da Cina (59) e Francia (57). In Europa, sono presenti in totale 113 reattori (World Nuclear Industry Status Report, 2025).

👍 Vantaggi nell'utilizzo dell'energia geotermica

Come nel confronto con i combustibili fossili, un grande vantaggio nell'utilizzo della risorsa geotermica rispetto al nucleare risiede nell'accessibilità della risorsa a scala locale da parte di ogni singolo Paese e dunque nella sua promozione all'indipendenza energetica. Per le centrali nucleari va invece considerata la dipendenza dai Paesi fornitori di uranio (Kazakistan, Canada, Australia, Namibia e Uzbekistan), il combustibile principale utilizzato per la fissione nucleare. Questi paesi detengono la maggior parte delle riserve globali e dominano l'estrazione e l'esportazione di uranio. Come per i combustibili fossili, la dipendenza da un numero limitato di paesi fornitori è soggetta a rischi geopolitici. Eventuali instabilità politiche, economiche o sociali nei paesi produttori possono influenzare infatti la disponibilità di uranio sul mercato internazionale. Inoltre, eventuali restrizioni alle esporta-



zioni o cambiamenti nelle politiche interne di questi paesi possono avere impatti significativi sulle forniture globali.

L'energia nucleare presenta inoltre delle sfide significative per quanto riguarda la gestione dei rifiuti radioattivi poiché questi rifiuti rimangono pericolosi per migliaia di anni e richiedono soluzioni sicure per il loro stoccaggio a lungo termine. Di contro, gli impianti geotermici producono sia rifiuti liquidi che solidi, che però possono essere gestiti facilmente. Infatti, essendo i rifiuti evacuati e riciclati o trattati, le conseguenze dirette sugli esseri umani, sugli ecosistemi e sull'atmosfera sono quasi inesistenti.

Energie rinnovabili

Le energie rinnovabili quali solare, eolico e idroelettrico sono fonti di energia che si rigenerano naturalmente e sono praticamente inesauribili nel lungo termine. Sono considerate più sostenibili e meno impattanti sull'ambiente rispetto ai combustibili fossili.

🔍 **Approfondimento: oltre alla geotermia, quali sono le energie rinnovabili più utilizzate in Italia?**

L'Italia è un paese all'avanguardia nella produzione di energia green e infatti è il terzo produttore di rinnovabili in Europa. Più di un terzo dell'energia elettrica prodotta nel paese proviene da fonti green. Le principali fonti di energia rinnovabile utilizzate in Italia sono l'idroelettrico, seguito dal solare fotovoltaico, l'eolico, le bioenergie e il geotermico (figura 4.9).

- **Energia Idroelettrica** — È la fonte rinnovabile più utilizzata in Italia. Il nostro paese utilizza i numerosi fiumi e laghi per generare energia elettrica attraverso impianti idroelettrici.

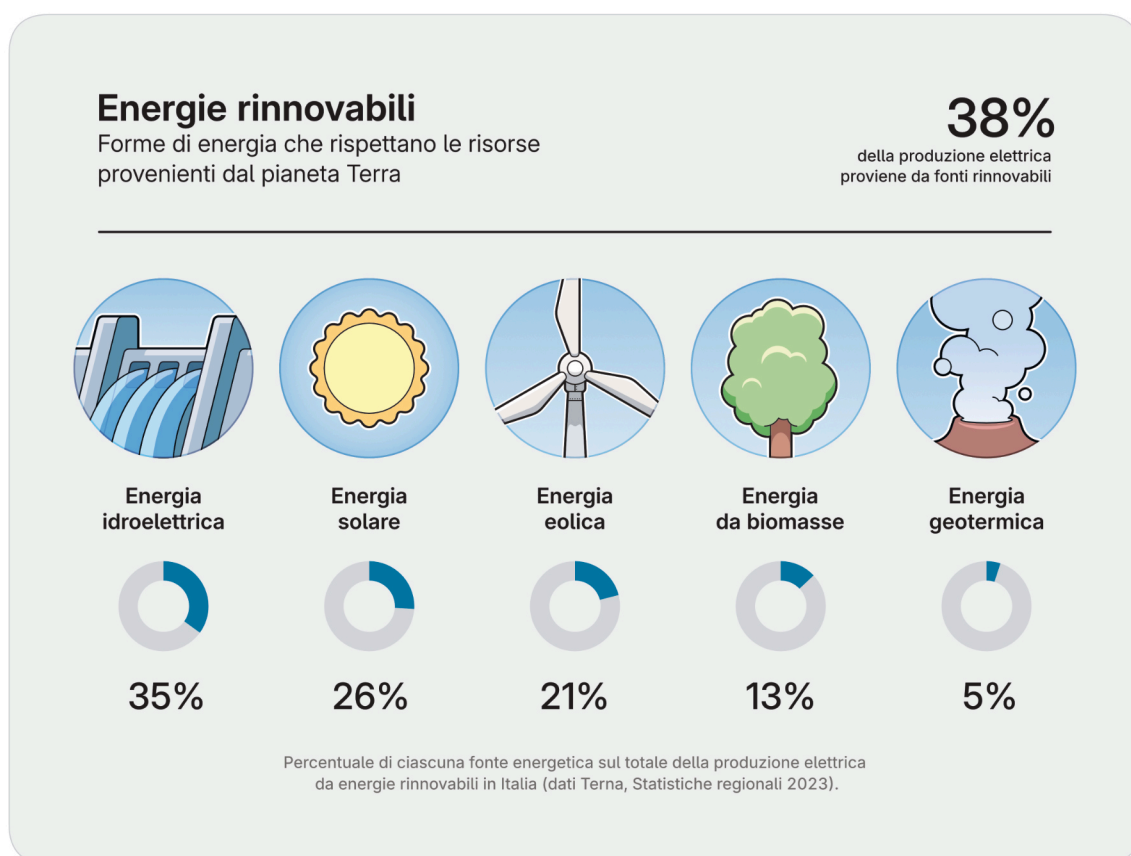


Figura 4.9: energie rinnovabili utilizzate in Italia: vantaggi e percentuale di utilizzo.

- **Energia solare** — Impiega la luce del Sole per generare elettricità (fotovoltaico) o per generare calore (solare termico). Nel primo caso vengono utilizzate celle solari montate su pannelli per convertire la luce solare direttamente in elettricità. Nel secondo caso invece, viene utilizzato il calore del sole per riscaldare un fluido che può essere usato direttamente per riscaldare edifici o per produrre elettricità.
- **Energia Eolica** — Utilizza la forza del vento per la produzione di energia. Grazie al movimento delle pale eoliche, che hanno un funzionamento simile a quello dei mulini a vento, si produce energia dal vento che viene poi trasformata in corrente elettrica.
- **Bioenergie** — Rappresentano una forma di energia proveniente dalle biomasse e in particolare da rifiuti agricoli, forestali e industriali, nonché scarti alimentari. Vengono impiegati per produrre elettricità, calore utilizzabile nei processi di produzione industriale e domestico, e come carburanti per i trasporti.

L'energia geotermica condivide molti dei propri vantaggi con la maggior parte delle altre energie rinnovabili, anche se presenta alcune caratteristiche che la differenziano e la rendono anche più vantaggiosa, in particolare per quanto riguarda l'uso del suolo e l'impatto visivo.

Vantaggi nell'utilizzo dell'energia geotermica

Uno dei grandi vantaggi della geotermia rispetto alle altre energie rinnovabili risiede nella sua disponibilità costante: la geotermia fornisce infatti energia continua e affidabile, indipendentemente dalle condizioni meteorologiche e dall'alternanza tra il giorno e la notte. Questo è un vantaggio rispetto al solare, che dipende dalla luce solare, e all'eolico, che dipende dal vento. A differenza della maestosità delle pale eoliche e delle estese aree occupate dai pannelli fotovoltaici, il geotermico richiede un limitato uso del suolo con occupazione di spazi modesti. Sia per installazioni domestiche che per impianti su larga scala, la maggior parte dei componenti (inclusi gli scambiatori di calore e tubazioni) è interrata, lasciando poco visibile in superficie. In ambito domestico, la pompa di calore ha le dimensioni di un elettrodomestico, mentre nei grandi impianti le strutture più imponenti sono le torri di raffreddamento e l'edificio sala macchine. Sebbene in alcuni casi questi impianti possano avere un certo impatto visivo sul paesaggio, le più recenti soluzioni architettoniche riducono anche questo difetto. In Toscana, ad esempio, durante eventi culturali, le torri di raffreddamento della centrale geotermica di Larderello sono state valorizzate attraverso interventi architettonici che le hanno convertite in opere d'arte luminose (figura 4.10).

Un altro grande vantaggio della geotermia rispetto alle altre fonti rinnovabili risiede nella sua capacità di riscaldare e raffreddare gli ambienti, rendendola una fonte di energia estremamente versatile ed efficiente.

Tra le caratteristiche che rendono il geotermico una fonte rinnovabile particolarmente vantaggiosa a livello di sistema paese c'è inoltre l'occupazione indotta, ovvero la creazione di posti lavorativi. Rispetto a eolico e fotovoltaico, presenta tradizionalmente un coefficiente occupazionale più elevato, soprattutto nelle fasi di perforazione, costruzione e gestione (GSE, 2016).

I principali vantaggi della geotermia rispetto a altre fonti energetiche possono quindi essere così riassunti:

- **Emissioni di gas serra limitate:** le emissioni di gas serra della geotermia sono molto inferiori a quelle dei combustibili fossili.
- **Disponibilità costante:** la geotermia è una fonte di energia affidabile e disponibile tutto l'anno non sensibile alle stagioni o agli eventi meteo anche avversi.



- **Risorsa rinnovabile e inesauribile:** la geotermia è una fonte di energia rinnovabile e inesauribile alla scala dei tempi umani.
- **Limitato uso del suolo:** l'uso di suolo degli impianti geotermici è più basso rispetto ai parchi eolici o ai campi fotovoltaici.
- **Energia silenziosa:** sia nel caso degli impianti a uso domestico sia nel caso delle grandi centrali, il geotermico produce un rumore trascurabile e impercettibile.
- **Accessibilità della risorsa a livello locale:** la geotermia rappresenta una valida opportunità per ogni Paese per autosostenersi a livello di approvvigionamento energetico, promuovendo così l'indipendenza energetica.



Figura 4.10: esempio di valorizzazione e di integrazione paesaggistica delle infrastrutture geotermiche. Proiezione sulle tre grandi torri di raffreddamento della centrale di Larderello, di tre raffigurazioni rappresentanti rispettivamente Inferno, Purgatorio e Paradiso, ottenute dai dipinti realizzati dal pittore Vieri Panerai, in occasione del Festival delle Colline Geotermiche.

5 - Esempi di fake news

La geotermia è spesso oggetto di disinformazione e fake news. Di seguito sono elencati alcuni dei miti più comuni associati a questa fonte energetica che è possibile sfatare sulla base dei dati scientifici analizzati nelle precedenti sezioni.

- **Alto livello di inquinamento:** è un mito che la geotermia sia altamente inquinante come i combustibili fossili. In realtà, la geotermia ha un profilo di emissione molto più basso e viene considerata una fonte di energia pulita e sostenibile. È stato inoltre dimostrato che le emissioni degli impianti geotermici italiani sono sostitutive di emissioni naturali normalmente diffuse al suolo.
- **Pericolosità per la salute umana:** non ci sono prove che la geotermia comporti rischi significativi per la salute umana. Le eventuali emissioni di gas come l' H_2S (acido solfidrico) sono controllate e monitorate con rigorosi protocolli di sicurezza e tecnologie di abbattimento.
- **Terremoti indotti:** anche se la geotermia può essere associata a piccoli eventi sismici, è importante sottolineare che non è comune che provochi terremoti significativi e tale possibilità è limitata a situazioni

particolari. La maggior parte degli eventi sismici indotti dalla geotermia sono legati a sistemi geotermici EGS, ossia migliorati artificialmente dall'uomo per migliorare la circolazione del fluido all'interno del serbatoio. La loro magnitudo è generalmente molto bassa (<2) e sono inoltre molto localizzati nei dintorni della zona di reimmissione dei fluidi e con bassissima probabilità che possano provocare danni. Esistono inoltre enti preposti al monitoraggio sismico che hanno il compito di rilevare e comunicare tempestivamente alle autorità competenti eventuali valori di sismicità al di sopra di una certa soglia limite in modo che possano essere valutate misure di sospensione o riduzione delle attività di produzione.

- **Esaurimento delle risorse:** un altro mito è che la geotermia sia una risorsa limitata e che possa esaurirsi rapidamente. In realtà, se gestita correttamente, la geotermia è una fonte di energia rinnovabile e sostenibile, il calore terrestre è una risorsa inesauribile che si rigenera naturalmente nel tempo.
- **Rumore provocato dalle centrali:** quando è in funzione, una centrale geotermica produce un rumore impercettibile e trascurabile.
- **La presenza di centrali geotermiche ostacola il turismo:** in realtà è l'esatto opposto. In Toscana, la presenza degli impianti geotermici ha dato un significativo impulso allo sviluppo turistico dell'area, valorizzando i paesaggi circostanti. L'UNESCO ha riconosciuto l'importanza di questa integrazione approvando l'ampliamento del Geoparco delle Colline Metallifere, uno dei primi parchi tematici istituiti in Italia che copre un'area di 1.087 km² coinvolgendo dieci comuni. Il Geoparco include infrastrutture geotermiche come il pozzo dimostrativo, il Museo della Geotermia di Larderello e il Parco delle Fumarole di Sasso Pisano (figura 4.11). Queste attrazioni non solo evidenziano il patrimonio geologico e naturale della regione, ma dimostrano anche come le tecnologie geotermiche possano convivere armoniosamente con l'ambiente circostante, offrendo ai turisti un'esperienza unica che unisce la bellezza naturale con l'innovazione tecnologica.



Figura 4.11: Geoparco delle Colline Metallifere, entrato a far parte dei Geoparchi Unesco nel 2010. All'interno del parco sono presenti diversi siti di interesse storico, archeologico, paesaggistico ed è possibile fare trekking, visite guidate, attività ludiche, e partecipare a manifestazioni di intrattenimento culturale e iniziative didattiche (da <https://www.enel.com/it/azienda/storie/articles/2025/07/turismo-geotermico-toscana-modello-sostenibile>).

Bibliografia

Abate, S., F. Botteghi, G. Caiozzi, G. Desiderio, G. Di Bella, A. Donato, G. Lombardo, A. Manzella, A. Santilano, and A. Sapienza. VIGOR: Applicazioni geotermiche per uno sviluppo sostenibile. Produzione di calore ed energia elettrica. Progetto VIGOR – Valutazione del Potenziale Geotermico delle Regioni della Convergenza, POI Energie Rinnovabili e Risparmio Energetico 2007-2013. Pisa: CNR-IGG, 2014. ISBN 9788879580120.

Calcagno, P., A. Genter, E. Huenges, M. Kaltschmitt, C. Karytsas, T. Kohl, P. Ledru, A. Manzella, S. Thorsvall, and J.D. van Wees. 2010. "The ENGINE Coordination Action (Enhanced Geothermal Innovative Network for Europe)." In Proceedings of the World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, April 25-29, 2010.

Calò, M., C. Dorbath, and M. Frogneux. 2014. "Injection Tests at the EGS Reservoir of Soultz-sous-Forêts. Seismic Response of the GPK4 Stimulations." *Geothermics* 52: 50-58.

Clark, C.E., C.B. Harto, J.L. Sullivan, and M.Q. Wang. 2010. Water Use in the Development and Operation of Geothermal Power Plants. Argonne National Laboratory Report. http://www1.eere.energy.gov/geothermal/pdfs/geothermal_water_use_draft.pdf.

Dialuce, G., C. Chiarabba, D. Di Bucci, C. Doglioni, P. Gasparini, R. Lanari, E. Priolo, and A. Zollo. 2014. Indirizzi e linee guida per il monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro nell'ambito delle attività antropiche. GdL MISE, Roma. https://unmig.mise.gov.it/unmig/agenda/upload/85_238.pdf.

Ellsworth, W.L. 2013. "Injection-Induced Earthquakes." *Science* 341: 1225942. <https://doi.org/10.1126/science.1225942>.

Etioppe, G., T. Fridriksson, F. Italiano, W. Winiwarter, and J. Theloke. 2007. "Natural Emissions of Methane from Geothermal and Volcanic Sources in Europe." *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 165: 76-86.

Fridriksson, T., A.M. Merino, A.Y. Orucu, and P. Audinet. 2017. "Greenhouse Gas Emissions from Geothermal Power Production." In Proceedings, 42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, February 13-15, 2017. SGP-TR-212.

Giamberini, M.S., A. Donato, A. Manzella, A. Pellizzone, D. Scrocca, D.E. Bruno, I. Nardini, S. Botteghi, and V.F. Uricchio. 2016. "Rischi ambientali connessi all'utilizzo della risorsa geotermica: cause e buone pratiche per la loro minimizzazione." In Progetto Atlante Geotermico del Mezzogiorno, edited by Adele Manzella. CNR per il Mezzogiorno, CNR-IGG. ISBN: 9788879580304.

Gestore dei Servizi Energetici. (2016). La valutazione delle ricadute economiche e occupazionali dello sviluppo delle fonti energetiche rinnovabili in Italia [Rapporto]. GSE. www.gse.it.

Huttrer, Gerald W. "Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report." Paper presented



at the World Geothermal Congress 2020, Reykjavik, Iceland, April 26 – May 2, 2020.

International Renewable Energy Agency (IRENA). Geothermal: The Solution Underneath. The Value of Geothermal for a Clean Energy Transition, 2021.

Lenzi, A., M. Paci, G. Giudetti, and R. Gambini. 2021. "Tracing Ancient Carbon Dioxide Emission in the Larderello Area by Means of Historical Boric Acid Production Data." *Energies* 14: 4101. <https://doi.org/10.3390/en14144101>.

Procesi, M., B. Cantucci, M. Buttinelli, G. Armezzani, F. Quattrocchi, and E. Boschi. "Strategic Use of the Underground in an Energy Mix Plan: Synergies among CO₂, CH₄ Geological Storage and Geothermal Energy. Latium Region Case Study (Central Italy)." *Applied Energy* 110 (2013): 104–131.

World Commission on Environment and Development. (1987). *Our common future*. Oxford University Press.



Sitografia

<https://www.enelgreenpower.com/it/learning-hub/energie-rinnovabili/e-nergia-geotermica/teleriscaldamento>

<https://www.ihfc-iugg.org>

<https://www.ingvterremoti.com/libro-terremotimaremoti>

<https://www.ingv.it/monitoraggio-e-infrastrutture/reti-di-monitoraggio/l-ingv-e-le-sue-reti/la-rete-integrata-nazionale-gps-ring>

<https://www.regione.toscana.it/-/la-geotermia-in-toscana-i-comuni-geotermici>

<https://www.thinkgeoenergy.com/map>

<https://www.unionegeotermica.it/la-geotermia-in-italia>





L'**Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV)** è uno dei principali istituti di ricerca al mondo per lo studio delle Scienze della Terra. Oltre a svolgere attività di ricerca, articolate su tre grandi linee tematiche (Terremoti, Vulcani Ambiente), l'INGV è un importante centro di competenza della Dipartimento della Protezione Civile, e in tal contesto gestisce l'Osservatorio Nazionale Terremoti, il Centro di Allerta Tsunami e il monitoraggio dei vulcani attivi italiani. Le competenze sviluppate nello studio dei fenomeni sismici e vulcanici hanno inoltre permesso all'INGV di ampliare le proprie attività verso la ricerca nel campo delle risorse energetiche del pianeta Terra.

L'Istituto è fortemente impegnato nella diffusione della cultura scientifica attraverso iniziative di divulgazione rivolte alle scuole e alla cittadinanza, attività museali, mostre e installazioni scientifico-artistiche. Gestisce inoltre biblioteche specializzate in ambito scientifico-tecnologico e dispone di proprie linee editoriali dedicate alla pubblicazione e alla valorizzazione dei risultati della ricerca.



Monia Procesi (PhD) è prima ricercatrice presso l'INGV. Geologa e geochemica, si occupa di geochemica dei fluidi, con particolare attenzione all'analisi delle manifestazioni idrotermali per la caratterizzazione dei sistemi geotermici convenzionali e non convenzionali. Svolge attività di sorveglianza sismica presso la Sala Operativa e Centro Allerta Tsunami, è inoltre membro del Comitato Operativo dell'INGV. Coordina e partecipa a progetti nazionali e internazionali sulla valorizzazione sostenibile delle georisorse e sulla mitigazione delle emissioni di metano di origine geologica. Autrice di numerosi articoli scientifici, svolge attività di divulgazione e formazione universitaria ed è impegnata nella promozione di pratiche etiche e sostenibili per l'uso delle risorse del sottosuolo. È coordinatrice scientifica del Progetto IRGIE.



Federica La Longa è prima tecnologa presso l'INGV. Psicologa specializzata in Psicologia del lavoro e delle organizzazioni ed ha un Master in Psicoterapia strategica. Svolge attività di ricerca nell'ambito dell'educazione al rischio sismico. Durante le emergenze sismiche, svolge interventi di sostegno psicosociale per diversi segmenti della popolazione. È membro del Laboratorio sulla Percezione del Rischio Naturale e la Memoria dei Disastri. È autrice di pubblicazioni sulla percezione del rischio sismico, sulla percezione del rischio tsunami, sui rumors e sull'educazione ai rischi naturali. Realizza attività di divulgazione scientifica con metodologie didattiche interattive nell'ambito di progetti educativi.



Barbara Cantucci Marini (PhD) è ricercatrice presso l'INGV. Svolge attività di ricerca nell'ambito della geochemica dei fluidi e delle georisorse. Effettua simulazioni numeriche dei processi di interazione fluido-roccia per ricostruire l'origine dei fluidi, i processi di migrazione verso la superficie ed il loro impatto sull'ambiente. Effettua campagne geochemiche di acque sorgive e di pozzo, prospezione delle specie gassose nei suoli e misure dei flussi di esalazione di anidride carbonica e metano, anche in occasione di emergenze sismiche e vulcaniche. Svolge attività di divulgazione. È coordinatrice scientifica del Progetto IRGIE.





Roberta Maffucci (PhD) è ricercatrice presso l'INGV. Geologa strutturale, si occupa di modellazione geologica del sottosuolo applicata alla sismotettonica e all'esplorazione di georisorse. La sua ricerca integra l'analisi di dati geologici e geofisici per la ricostruzione e interpretazione di modelli geologico-strutturali con l'obiettivo di comprendere i processi tettonici, definire il contesto sismotettonico di aree sismicamente attive, studiare zone interessate dallo sfruttamento di georisorse e caratterizzare sistemi geotermici. Ha partecipato a diversi progetti nazionali e internazionali, in particolare in Argentina, dedicati all'esplorazione di risorse geotermiche e alla caratterizzazione geologico-strutturale di rocce serbatoio. Autrice di numerosi articoli scientifici, è impegnata nella divulgazione scientifica e nella formazione universitaria.



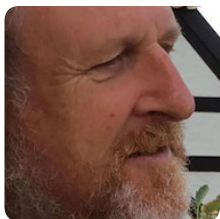
Valeria Misiti (PhD) è prima tecnologa presso l'INGV. Petrologa e vulcanologa, si occupa di proprietà fisiche dei magmi. La sua ricerca è volta alla caratterizzazione delle proprietà reologiche dei magmi attraverso l'utilizzo di macchinari sperimentali e allo studio dei processi magmatici in generale. Svolge attività di sorveglianza sismica presso la Sala Operativa e Centro Allerta Tsunami. Autrice di numerosi articoli scientifici, svolge attività di divulgazione e formazione in ambito scolastico di ogni ordine e grado fino all'universitario.



Nunzia Voltattorni (PhD) è ricercatrice presso l'INGV. Geologa e geochemica, si occupa dello studio di processi di degassamento diffuso e naturale, individuazione di faglie sepolte e secondarie in aree sismicamente attive, radioattività naturale, stoccaggio geologico della anidride carbonica, mitigazione del rischio ambientale, monitoraggio geochemico in aree vulcaniche e sismiche. Autrice di numerosi articoli scientifici, svolge attività di divulgazione e formazione in ambito scolastico di ogni ordine e grado fino all'universitario.



Corrado Castellano è tecnico presso l'INGV. Specializzato in comunicazione della scienza, ha conseguito un Master di II livello in Comunicazione della Scienza e della Ricerca Scientifica presso l'Università degli Studi Roma Tre. Si occupa di divulgazione scientifica, curando mostre scientifico-divulgative, exhibit interattivi, prodotti multimediali, pubblicazioni a carattere scientifico e materiali per la comunicazione. La sua attività è orientata a rendere accessibili al grande pubblico i temi legati ai fenomeni naturali, alla ricerca sismologica e alle attività dell'INGV. Ha svolto servizio di sorveglianza sismica presso la Sala Operativa e il Centro Allerta Tsunami dell'INGV, integrando competenze tecnico-scientifiche e comunicative. Partecipa attivamente ai gruppi operativi in occasione di forti terremoti, intervenendo sul campo nelle aree epicentrali per le attività di rilievo macrosismico e la stima dei danni causati dagli eventi sismici.



Massimo Crescimbene è psicologo presso l'INGV. Si occupa di psicologia dell'emergenza, con particolare attenzione ai processi di percezione del rischio, alla memoria dei disastri e alla comunicazione scientifica applicata ai fenomeni naturali. Coordina il Laboratorio sulla Percezione del Rischio Naturale e la Memoria dei Disastri e collabora con il Dipartimento della Protezione Civile in programmi nazionali di educazione al rischio. Autore di diversi studi scientifici, integra attività di ricerca, formazione e



divulgazione, impiegando anche approcci creativi e teatrali per coinvolgere soprattutto i più giovani sui temi della sicurezza, della resilienza e della consapevolezza dei rischi naturali.



Federico Florindo è graphic designer e illustratore presso l'INGV. Con una formazione in iconografia antica, progettazione editoriale e type design, si occupa della creazione di prodotti di divulgazione scientifica per la stampa e per la fruizione digitale. Nel corso della sua carriera ha curato la progettazione di libri illustrati, percorsi espositivi, identità visive, materiali didattici e informativi, specialmente nell'ambito dei beni culturali e della comunicazione scientifica. Ha particolarmente a cuore l'uso del design e dell'illustrazione come strumenti per rendere accessibili al pubblico contenuti complessi.