

Il calore della terra ha un cuore sostenibile

Alessandro Lenzi, Nicoletta Mazzuca, Luigi Parisi *Enel Green Power SpA*

La Geotermia costituisce una delle opzioni più interessanti per lo sviluppo sostenibile del nostro paese. L'Italia ha una tradizione consolidata nell'uso del calore terrestre per produrre elettricità, riscaldamento delle abitazioni e nelle produzioni agricole

Introduzione

Esiste nel cuore della Toscana, nei dintorni di Larderello, un'area di particolare importanza per la presenza di fluidi e vapori endogeni che sono utilizzati sin dall'antichità, quando le terme romane facevano largo uso delle acque termali naturali per scopi terapeutici. Tuttavia, l'era moderna della geotermia italiana prende avvio ai primi dell'800 da un imprenditore francese, Francesco De Larderel. Egli costruisce una vera e propria industria per l'estrazione dell'acido borico dai laghi caldi costituiti da fango ed acqua, presenti in Toscana, creando uno dei più prosperi e tecnologicamente avanzati centri industriali dell'epoca. L'attuale sito industriale, già attivo a partire dal 1818, prende infatti il suo nome: Larderello. Si parlava di laghi e soffioni per indicare quei fenomeni endogeni di risalite naturali che si manifestavano sul terreno e che originavano dalla profondità della terra. All'opera di Francesco De Larderel

non mancano elementi di ingegno. Nel 1827 comincia a costruire delle strutture in muratura emisferiche, conosciute come i 'laghi coperti', che gli permettono di raccogliere il vapore endogeno che fuoriesce dai laghi ed utilizzarlo come fonte energetica in sostituzione del calore derivante dalla combustione del legname, fino a quel momento utilizzato per evaporare le acque madri geotermiche ed estrarre il prezioso acido borico (**figura 1A - 1B**). La data del 1827 costituisce una pietra miliare nel progresso delle energie rinnovabili, anche se, allora non c'era ancora la giusta percezione dell'importanza di tale scoperta per la generazione di energia elettrica da una fonte pulita e rinnovabile. Il 1827 è comunque una data fondamentale nella storia della geotermia segnando tra l'altro, l'anno in cui, per la prima volta, si utilizza la geotermia come fonte energetica.

Gli anni che seguono sono un susseguirsi di tappe importanti per lo sviluppo tecnologico

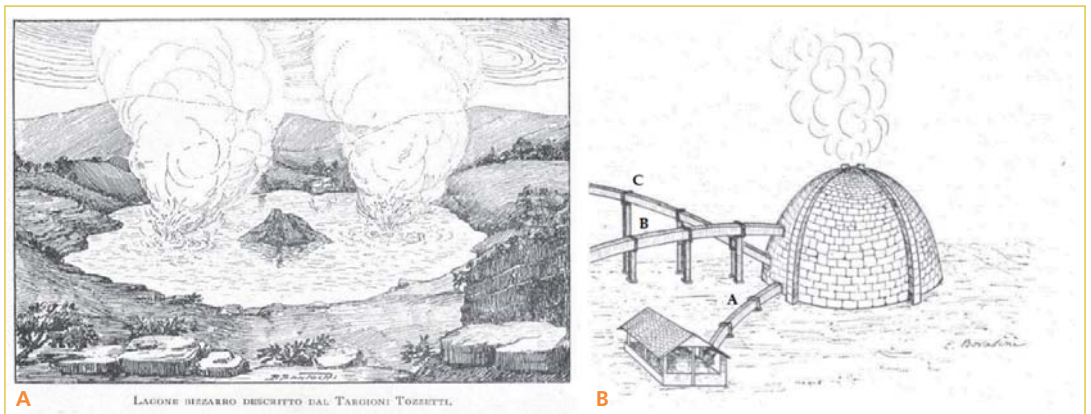


Figura 1A - B
I laghi naturali **1A** e l'invenzione di Francesco De Larderel del 1827, il lago coperto **1B**

della geotermia. Nel 1832 si dà inizio alla perforazione, che permetterà di raggiungere direttamente nelle profondità della terra il prezioso fluido endogeno. Non mancherà mai l'attenzione allo sviluppo tecnologico ed alla conoscenza scientifica grazie anche alle scoperte di successo e alla ricchezza della risorsa disponibile. Per fare un esempio di ciò basti pensare agli studi pionieristici condotti dal Prof. Anselme Payen della Sorbona di Parigi, chiamato da De Larderel a compiere le prime analisi dei fluidi endogeni. Al di là dell'importanza scientifica di questi studi merita menzionare lo stupore dello studioso di fronte alle opere sino ad allora sviluppate dai primi 'geotermici' citando le sue stesse parole:

"In questi stabilimenti si manifesta incessantemente un'enorme potenza meccanica; si eseguisce un'evaporazione che supera 80.000.000 di chilogrammi; si realizza un'annua produzione di chilogrammi 750.000 d'acido cristallizzato; e non si vedono né macchine, né materie prime, né combustibile! I soffioni forniscono tutto: per ottenere, e la soluzione lorda ed il riscaldamento, basta di dirigere convenientemente il loro potente soffio". (F. A. Payen 1841)

L'inizio della produzione elettrica

Qualche anno dopo, nel 1904 la disponibilità di imponenti quantità di vapore, sinora utilizzate per la sola estrazione dell'acido borico non sfuggirà all'attenzione di Piero Ginori Conti, che aveva sposato la figlia di Florestano De Larderel, nipote di Francesco ed aveva ereditato il patrimonio industriale. Una serie di esperimenti di successo gli permettono di dimostrare che il fluido può essere imbrigliato in una macchina a vapore che, connessa ad una dinamo, produce l'energia sufficiente per accendere 5 lampadine. Questo risultato si ottiene per la prima volta al mondo. Questa idea sarà subito messa alla prova illuminando, a partire dal 1905, le abitazioni dei De Larderel e dal 1908 i fabbricati produttivi.

È l'inizio di una nuova era!

Di lì a poco, nel 1913, entrerà in esercizio la prima turbina geotermoelettrica del mondo capace di produrre 250kW di elettricità. Questo primato segnerà l'inizio di una nuova fase, in continuo progresso sino ai giorni d'oggi, dove l'attuale operatore ENEL conta 34 centrali attive ed un totale di 37 turbine per una potenza installata di 916 MW e una produzione di circa 5,6 TWh di energia geotermica all'anno.

Attualmente, in aggiunta alla produzione di energia elettrica, il vapore alimenta anche un grande sistema di tele-riscaldamento che copre 9 municipalità, 13000 utenti sul territorio Toscano e piccole realtà industriali quali ad esempio serre, caseifici ed un birrifico. L'area di Larderello è inoltre meta di turismo sostenibile con la presenza di 2 poli museali, visitati da circa 60.000 persone ogni anno e percorsi naturalistici utilizzati per il trekking e cicloturismo.

Recentemente il crescente interesse per gli utilizzi industriali della CO₂ ha permesso inoltre di finalizzare contratti di collaborazione per rendere disponibile la CO₂ naturalmente prodotta dai fluidi geotermici.

Oggi giorno la geotermia italiana contribuisce per il solo 2% al mix energetico nazionale da fonti rinnovabili ma il calore della terra ha una disponibilità continua nelle 24 ore che la rende utile come produzione base di energia a differenza delle altre fonti rinnovabili, quali sole e vento, che sono variabili e intermittenti perché legate alla presenza di luce o alla presenza di vento. La sua storia centenaria ne è testimonianza, con impianti che continuano a produrre senza sosta da oltre 40 anni.

La geotermia e la sostenibilità ambientale

Tra le caratteristiche che vale la pena menzionare, c'è senz'altro la continua attenzione all'ambiente. Questo si traduce per esempio nell'adozione della tecnologia AMIS (Abbattimento Mercurio Idrogeno Solforato), interamente progettata in Italia e brevettata da ENEL, che consente di contenere le emissioni di mercurio e idrogeno solforato ampiamente al di sotto dei limiti di emissione vigenti e dei valori indicati dalle linee guida internazionali (figura 2).

Un'altra questione legata all'impatto potenziale delle centrali geotermoelettriche sull'ambiente riguarda le emissioni di anidride carbonica. Questo gas, climalterante, è naturalmente presente sia nei fluidi e vapori endogeni come misurato in diverse manifestazioni naturali sulla superficie terrestre, sia in quelli estratti in profondità tramite i pozzi geotermici utilizzati per la produzione di energia elettrica e calore. Il tema delle emissioni di CO₂ dalle centrali geotermiche è diventato sempre più importante, man mano che la discussione sui cambiamenti climatici è stata inserita come uno degli argomenti centrali nelle agende di politici e scienziati di tutto il mondo. Storicamente, le emissioni derivanti dal-

L'utilizzo dell'energia geotermica sono state considerate non antropogeniche, perché sono flussi di origine naturale rilasciati nell'atmosfera per emissione dalla superficie terrestre.

Come si genera la CO₂

L'anidride carbonica viene rilasciata nell'atmosfera naturalmente dai campi geotermici, dalle aree vulcaniche e per altri processi geologici che avvengono nella litosfera. Essa si manifesta attraverso flussi dal suolo, emissioni localizzate di gas e vapore, fratture, pozze di fango riscaldate dal vapore e sorgenti termali. Sebbene l'emissione di CO₂ dal suolo possa avvenire in molti modi, il tasso di emissione dipende fortemente dalle caratteristiche del sottosuolo attraversato e presente nelle aree geotermiche e, quindi, può variare notevolmente da una zona ad un'altra.

L'emissione naturale può essere alterata dall'estrazione di fluidi nei pozzi utilizzati per la produzione di energia elettrica e teleriscaldamento o, come è avvenuto in passato nell'area di Larderello, per la produzione di acido bórico. Nell'area di Larderello le emissioni naturali da emanazioni di vapore e gas sono progressivamente scomparse in concomitanza alla coltivazione della risorsa geotermica tramite l'utilizzo di vapore estratto dai pozzi. Tale evidenza ha permesso di mettere in relazione il tasso di emissione naturale dal suolo con l'estrazione di vapore nel campo geotermico.

Le fonti comunemente riconosciute come possibili origini della CO₂, in un sistema idrotermale, sono l'idrolisi delle rocce carbonatiche, il magmatismo crostale, il magmatismo sub crostale a seguito della fusione parziale delle rocce del mantello e i processi metamorfici (figura 3) [1].

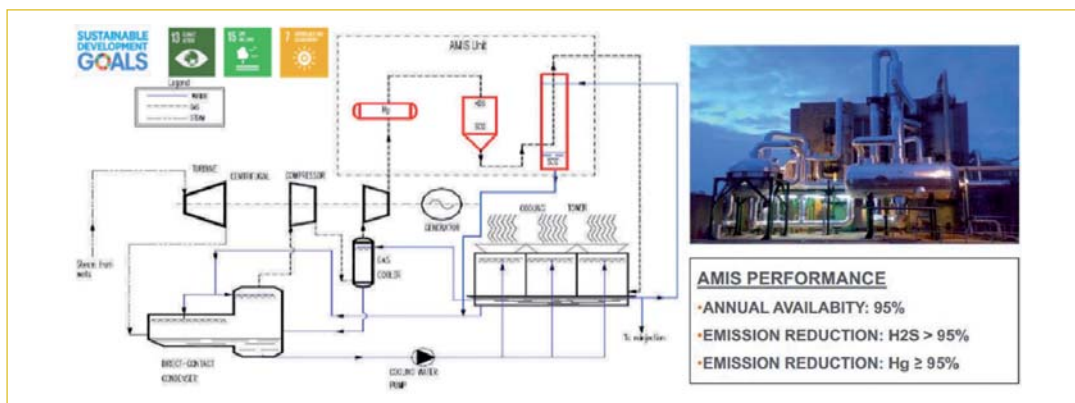


Figura 2 Sistemi di abbattimento AMIS con le performance rilevate

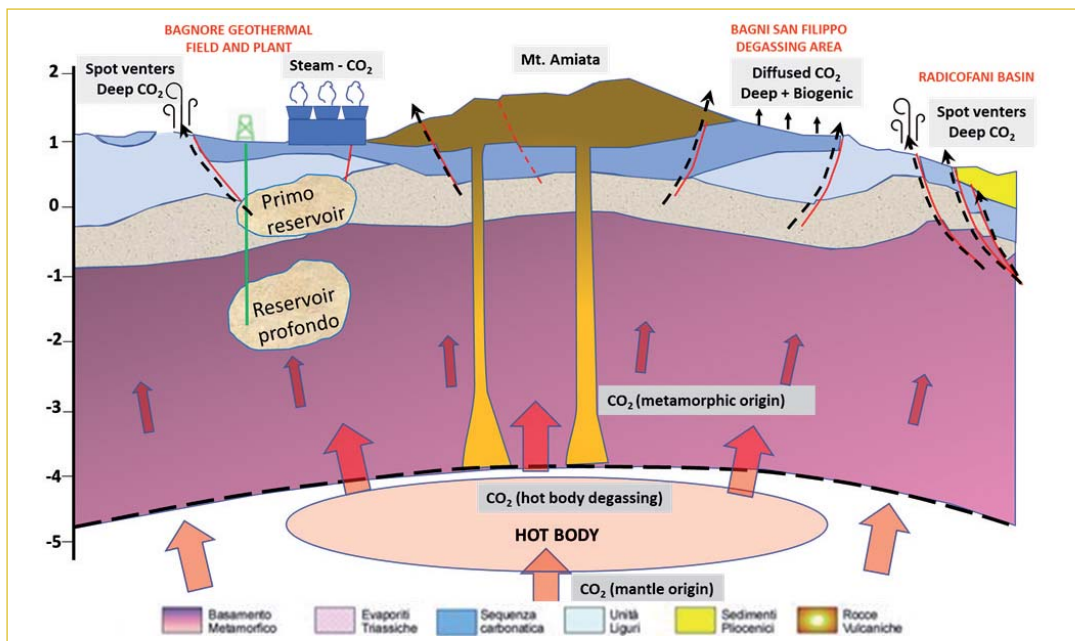


Figura 3 Rappresentazione schematica dell'origine e flussi della CO₂ endogena

Le emissioni di CO₂ dalle centrali devono essere misurate per legge, per tale scopo si analizzano in laboratorio la composizione del gas emesso da ogni centrale e la sua portata, ed espresse in termini di fattori di emissione misurati come grammi di CO₂ per kilowattora prodotto (gCO₂/kWh).

Uno studio di Bertani e Thain del 2002 [2] condotto su tutti gli impianti geotermici nel mondo, ha evidenziato che i fattori di emissione variano in un intervallo molto ampio compreso tra 4 e 740 gCO₂/kWh, con una media ponderata di 122 gCO₂/kWh. Recentemente Fridriksson (2017) [3] ha riportato valori fino a 1300 gCO₂/kWh per i giacimenti geotermici turchi. Da notare che le produzioni di energia elettrica alimentate da fonti fossili (gas naturale, carbone, petrolio) si attestano tra valori che vanno da 350 a 1100 gCO₂/ kWh.

Le emissioni di CO₂ legate alla coltivazione dei campi geotermici evidenziano caratteristiche diverse legate sia alle condizioni di temperatura e pressione della risorsa (Alta, media e bassa entalpia) sia alla tipologia d'impianto utilizzato (Vapore diretto, Flash e Ciclo Binario).

Ad esempio, negli Stati Uniti caratterizzati da fonti di media entalpia e impianti a ciclo binario, si segnala che il tasso di emissione di CO₂ varia a seconda di come è gestita la risorsa geotermica, in particolare si riscontra che la reiniezione del fluido condensato diluisce la risorsa e abbassa il tasso di emissione di gas dagli impianti [4]. Un altro esempio è il campo geotermico di Krafla in Islanda dove l'emissione fluttua in base all'azione combinata tra l'attività vulcanica e l'attività delle centrali geotermiche (figura 4) [3]. È chiaro quindi, che le emissioni degli impianti geotermici provengono da fonti naturali, ma la coltivazione del campo geotermico può influire sul tasso di emissione. Secondo gli studi attuali,

il tasso di emissione degli impianti geotermoelettrici può essere sia superiore che inferiore al tasso naturale e, nel tempo, l'utilizzo può ridurre ulteriormente il tasso di emissione.

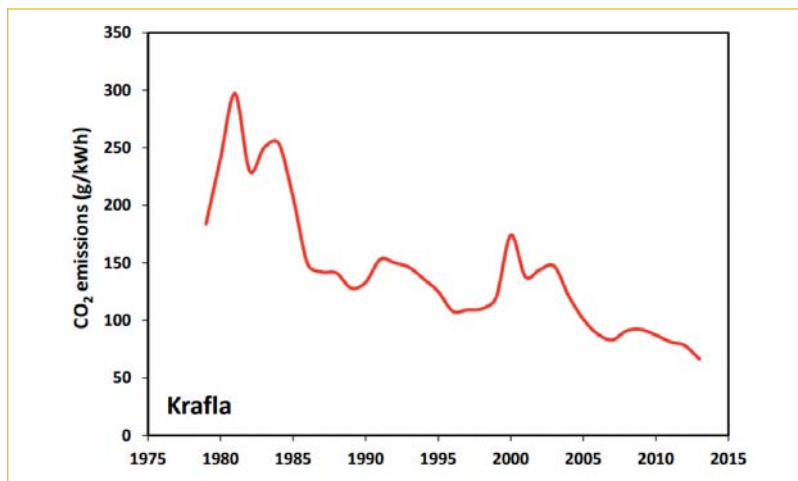
Va evidenziato che i fattori di emissione misurati nelle centrali geotermiche, espressi in termini di CO₂ per kWh o come CO₂eq (Carbon Dioxide Equivalent) comprensiva del contenuto di metano, rappresentano il contributo proveniente dall'impianto di generazione ma devono essere posti in relazione con le emissioni di anidride carbonica provenienti da suolo. Per avere una misura attendibile sulle concentrazioni di CO₂ in una determinata area è quindi importante misurare le emissioni superficiali naturali insieme a quelle provenienti dalla centrale elettrica per poi essere in grado di porle a confronto.

In sintesi, ogni impianto geotermico non costituisce un punto isolato di emissione di anidride carbonica ma esso è parte di un sistema più complesso, costituito dal campo geotermico, in cui, le centrali e le emissioni naturali interagiscono ed evolvono in seguito allo sviluppo della produzione di energia elettrica.

Come misurare la riduzione e sostituzione delle emissioni naturali

La produzione geotermica non può prescindere dall'estrazione dei fluidi endogeni in profondità. Come detto, questi contengono sia anidride carbonica presente all'interno del serbatoio sia CO₂ che fluisce verso l'alto per meccanismi naturali di migrazione attraverso faglie e per permeazione del terreno arrivando in superficie in forma diffusa. Il declino delle emissioni naturali a partire dallo sviluppo geotermico era stato osservato, oltreché in Italia [5] anche in altri pae-

Figura 4
Evoluzione delle emissioni di CO₂ dell'impianto geotermoelettrico islandese di Krafla [4]



si dove viene utilizzata la risorsa geotermica per la produzione dell'energia elettrica, quali ad esempio l'Islanda [6] e la Nuova Zelanda [7], ed era stato evidenziato in modo qualitativo da Bertani e Thain [2] già all'inizio degli anni 2000 proprio nell'area di Larderello, osservando direttamente la riduzione delle emissioni dal suolo, dai lagoni, dagli anfratti e in generale le emissioni diffuse di vapore e gas presenti rispetto alle rappresentazioni storiche dell'area (figura 5A - 5B).

Quella che era una osservazione qualitativa meritava una verifica sperimentale tramite una campagna di misurazioni quantitative del fenomeno della riduzione delle emissioni naturali, conosciuto come "Depletion". La lunga storia della coltivazione geotermica, che caratterizza l'area Toscana e i tanti dati e osservazioni disponibili acquisiti nel tempo, hanno in alcuni casi permesso di utilizzare il criterio generale secondo cui, è necessario confrontare le emissioni di anidride carbonica misurate sul terreno prima e dopo l'avvio delle centrali, per quantificarne il declino che è stato definito come Depletion.

Utilizzando infatti la teoria enunciata negli studi di Bertani, si è potuto valutare la quantità di riduzione delle emissioni naturali di CO₂ nell'area di Larderello secondo una valutazione indiretta delle emissioni di vapore e gas non condensabili (NCG) associate alla produzione industriale di acido bórico.

L'idea alla base di questo modello è che lo sviluppo geotermico può indurre un impoverimento delle emissioni di gas naturale nell'area che ospita pozzi e impianti geotermici. Il grado di impoverimento, vale a dire le differenze dei tassi di emissione del suolo, espressi come portate per unità di superficie (ad esempio, ton/giorno/km²), può essere calcolato registrando le emissioni naturali in un campo geotermico non ancora svi-

luppato, denominati convenzionalmente Green Field (e i relativi flussi di CO₂ dal suolo indicati come $\phi_{arcbaic}$) e prendendo nota delle stesse quantità dopo lo sviluppo industriale ($\phi_{developed}$). In questo modo può essere definita la Depletion

$$Depletion = \phi_{arcbaic} - \phi_{developed}$$

Quando i dati di un'area geotermica prima dell'insediamento delle centrali non sono disponibili, viene effettuato un confronto tra aree sviluppate ($\phi_{developed}$) e aree non sviluppate (Green Field e $\phi_{near\ areas}$); in questo modo è sempre possibile parlare di Depletion:

$$Depletion = \phi_{near\ areas} - \phi_{developed}$$

In entrambi i casi, il grado di Depletion rappresenta la quantità di emissione naturale che è stata parzialmente o totalmente sostituita dalle emissioni degli impianti, secondo un criterio che prende il nome di *Emissione Sostitutiva* (SE) calcolate come:

$$SE = actual\ plant\ emission - Depletion \times geothermal\ field\ area$$

Una volta quantificata la Depletion è quindi possibile confrontare questo valore con il contributo misurato nelle centrali riuscendo a quantificare le emissioni effettive in atmosfera legate alla sola coltivazione geotermica, semplicemente sottraendo alle emissioni delle centrali la Depletion misurata.

Per applicare tale metodologia, alle diverse aree geotermiche, era necessario un confronto tra un prima ed un dopo.

Ma come fare con aree geotermiche utilizzate ormai da anni di cui mancavano le necessarie misure antecedenti agli impianti?



Figura 5A - B
Il paesaggio dell'area di Larderello 5A come appariva prima e dopo lo sviluppo geotermico 5B

Il problema è stato risolto in due modi diversi ma equivalenti nei principi generali esposti sopra.

Per l'area di Larderello [4], dove era stata osservata la Depletion, pur non essendo disponibili le misure di flusso dal terreno queste sono state ricostruite e calcolate dai dati storici di produzione dell'acido borico. Quei lagoni, che in passato avevano permesso lo sviluppo dell'industria borica e che a partire dagli anni '20 del secolo scorso erano gradualmente scomparsi insieme al resto delle emissioni di vapore e gas dal terreno, erano stati tracciati accuratamente, ovvero, si conosceva quanto acido borico avevano prodotto negli anni grazie alle tabelle di contabilità e di produzione presenti negli archivi storici. Restava solamente da correlare la produzione di acido borico con il vapore endogeno che lo aveva trasportato alla superficie e quindi con l'anidride carbonica in esso contenuta. La curiosità scientifica legata alla quantificazione e caratterizzazione dei fenomeni endogeni, mostrata sin dall'inizio dai pionieri della geotermia, consentiva di dare una risposta al quesito. Erano note, infatti, le analisi di laboratorio che caratterizzavano i soffioni boraciferi presenti nelle aree tradizionali geotermiche di Larderello risalenti già a fine '800. Queste contenevano dati preziosissimi come i quantitativi di acido borico e di gas incondensabili NCG (costituiti da CO_2 , H_2S , CH_4 e altri componenti minori). Sulla base di questi dati si è potuto ricostruire e quantificare il fenomeno della Depletion. Il risultato di tali analisi ha portato ad una stima, che si potrebbe molto probabilmente rivedere al rialzo, in cui le emissioni non più presenti sembrano attestarsi su valori di circa 230 t/h di vapore e un trasporto di 17 t/h di gas incondensabili (CO_2 , CH_4 , H_2S etc.). Questi valori se vengono confrontati con campi attualmente in esercizio, in cui il contenuto di gas è ulteriormente diminuito grazie alla pratica della re-iniezione che re-immette nel serbatoio geotermico i fluidi di condensa raccolti durante la produzione privati dei gas, corrisponderebbero all'emissioni di centrali della potenza di circa 120MW, quale ad esempio la centrale di Vallesecolo in Toscana, che rappresenta una delle più grandi centrali geotermiche al mondo.

Il secondo criterio è stato il confronto tra aree geotermiche nelle quali sono presenti impianti di produzione ed aree geotermiche attigue non ancora sviluppate. In questo caso per l'applicazione è stata scelta l'area dell'Amiata [8], la seconda area in Toscana dove ci sono importanti coltivazioni geotermiche. Una serie massiccia di

campagne di misura di flussi dal suolo di anidride carbonica con il metodo della camera di accumulo, accompagnati da misure più localizzate dei cosiddetti spot venters o emettitori puntuali, ha permesso di ricostruire un quadro in cui, nelle aree di coltivazione delle risorse geotermiche, le emissioni dal suolo, espresse come flusso di CO_2 per km^2 al giorno, sono risultate sensibilmente inferiori a quelle dalle aree attigue non sviluppate. Questa osservazione evidenzia ulteriormente il fenomeno della Depletion. Andando avanti con l'interpretazione delle misure, è stato significativo dimostrare come la maggiore quantità di anidride carbonica misurata in queste zone non coltivate, se confrontata con le aree di riferimento dove si utilizza la risorsa geotermica mostra una differenza quasi esattamente equivalente al contributo dovuto alle centrali geotermoelettriche.

Questo fenomeno, espresso in termini di emissioni sostitutive, indica ciò che Bertani e Thain avevano ipotizzato ed è confermato anche in queste aree.

Tutto ciò è in realtà legato a un fenomeno di bilancio di massa: le emissioni che naturalmente risalirebbero dal suolo vengono 'anticipate' dai pozzi di produzione dei fluidi profondi e solo successivamente, tali gas vengono ri-emessi in atmosfera tramite le centrali geotermiche in quantità equivalente alla Depletion misurata in superficie. Questo fenomeno può essere rappresentato da un semplice schema concettuale (figura 3 e 7).

La CO_2 generata da fenomeni geologici profondi come il degassing del mantello, il degassing dei corpi plutonici caldi profondi, tipicamente presenti nelle aree geotermiche e tutti i relativi fenomeni di metamorfismo crostale, producono un flusso costante di anidride carbonica che nelle aree non sviluppate si manifesta alla superficie con quei fenomeni precedentemente descritti, come spot venters, emissioni diffuse, emissioni da sorgenti termali etc. Nelle aree geotermiche, in cui sono presenti le centrali, questo flusso dal profondo rimane invariato e si ripartisce tra emissioni dal suolo, ora diminuite, ed emissione dalle centrali.

Il concetto di Depletion e la conseguente quantificazione dell'emissione sostitutiva permettono di considerare la CO_2 emessa dalle centrali geotermiche a contributo carbonico neutrale. Inoltre, questa CO_2 è di tipo naturale essendo esattamente la stessa che si ritrova nelle emissioni disperse sul territorio e non deriva

in nessun modo dalla combustione di idrocarburi o sostanze fossili come già affermato a suo tempo da IPCC dove [9]:

“Geothermal energy is classified as a renewable resource because the tapped heat from an active reservoir is continuously restored by natural heat production, conduction and convection from surrounding hotter regions, and the extracted geothermal fluids are replenished by natural recharge and by injection of the depleted (cooled) fluids” (cit.) “The exploitation of geothermal energy does not ultimately create any additional CO₂ from the subsurface, since there

is no combustion process, though the rate of natural missions can be altered by geothermal production depending on the plant configuration.”

Sulla base di quanto dimostrato, l'attività geotermica legata alla produzione di energia elettrica risulta a impatto zero e deve permettere a questa tecnologia di essere considerata come una fonte al 100% rinnovabile e sostenibile alla pari delle altre tecnologie quali solare ed eolico. In termini quantitativi questo si ottiene tramite i protocolli del cosiddetto *Life Cycle Assessment* (LCA) in cui le recenti osservazioni in termini di

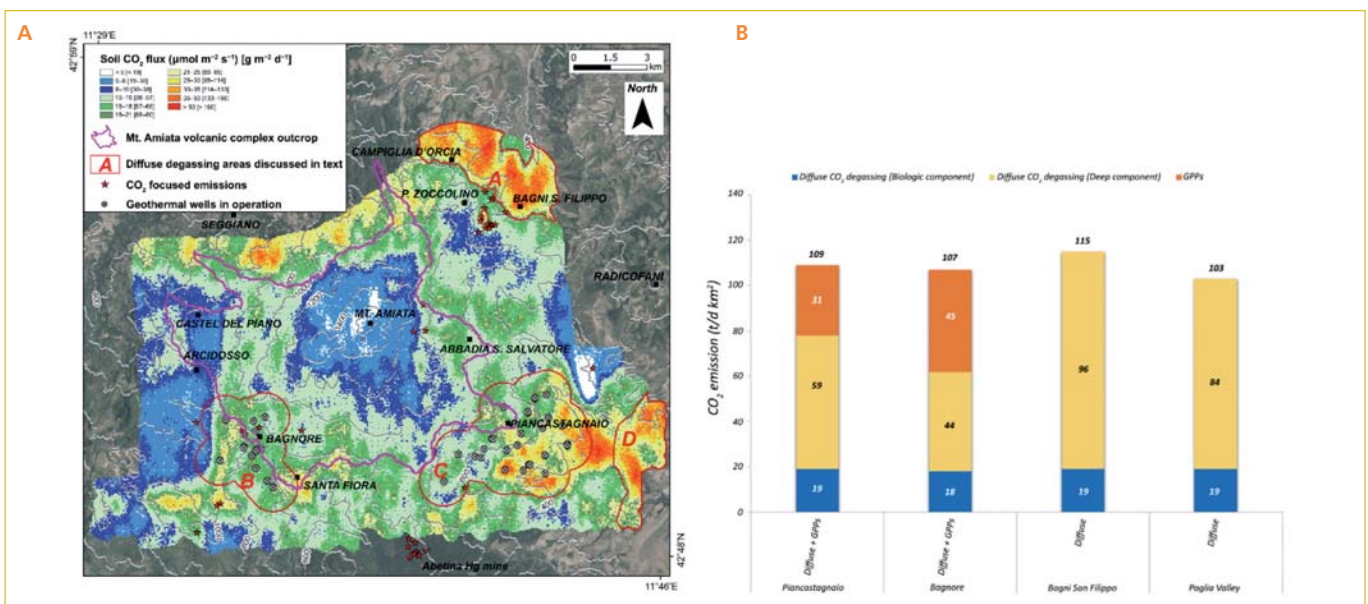


Figura 6A - B Emissioni diffuse di CO₂ nell'area del Monte Amiata. Nella immagine di sinistra **6A** sono individuate le aree di riferimento per le emissioni (A e D) e le aree nelle quali sono presenti le centrali geotermoelettriche. Nel grafico a destra **6B** sono indicati i valori di emissione dal suolo espressi in t/die km². In blu il contributo biogenico alle emissioni, in arancio chiaro l'emissione dal suolo di origine profonda ed in arancio scuro l'emissione delle centrali geotermoelettriche. Si evidenzia il fenomeno della Depletion (valori in arancio chiaro maggiori per le aree indisturbate di Bagni San Filippo e Paglia) e il fenomeno della sostituzione in cui il contributo delle centrali (arancio scuro) riporta i valori di emissione agli stessi livelli delle aree indisturbate

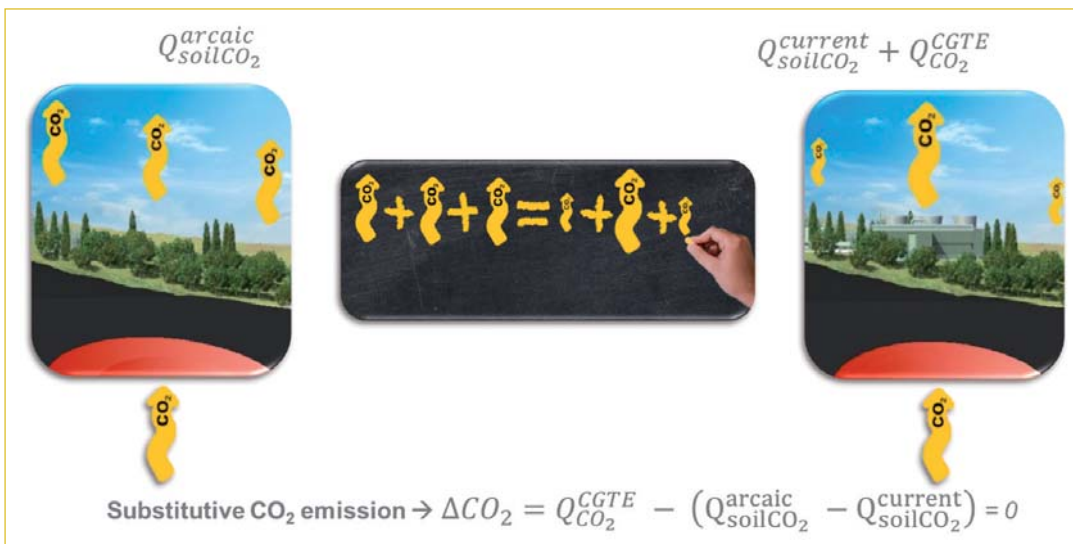


Figura 7 La metodologia usata per quantificare le emissioni sostitutive

Depletion ed Emissioni Sostitutive, introdotte negli algoritmi di LCA (calcoli effettuati da Rina Consulting), hanno permesso di classificare le emissioni delle centrali geotermiche, ampiamente al di sotto dei 100 g/kwh equivalente di CO₂, riferimento oramai universalmente accettato per i contributi climatici delle attività industriali. Oltre a ciò, la produzione geotermica italiana è classificata come eligibile in base alla tassonomia europea che richiede per le attività produttive di conformarsi ad alcuni criteri che ne quantificano la sostenibilità. Tra questi ci sono, la mitigazione dei cambiamenti climatici, l'adattamento ai cambiamenti climatici, l'uso sostenibile e la protezione delle acque e delle risorse marine, la transizione verso un'economia circolare, la prevenzione e la riduzione dell'inquinamento e la protezione e il ripristino della biodiversità e degli ecosistemi. Dei 6 requisiti richiesti il gruppo Enel ha raggiunto anche per la geotermia la compatibilità, in particolare per il primo, la mitigazione dei cambiamenti climatici e contribuendo anche per i restanti seguendo il criterio DNSH - *Do Not Significant Harm* [10].

Conclusioni

Questi risultati sulla sostenibilità della geotermia sono molto importanti perché la collocano di fatto tra le migliori opzioni nella scelta di uno sviluppo delle rinnovabili del nostro paese. Inoltre, altri aspetti della sostenibilità della risorsa

accregono ancor più il suo valore potenziale, primo fra tutti la possibilità di contribuire significativamente nel riscaldamento di ambienti civili e industriali. Contribuiscono alla sua importanza gli aspetti ulteriori legati al valore culturale della risorsa quali la lunga e pionieristica storia produttiva, il contenuto tecnologico e gli aspetti sociali tra cui il turismo sostenibile. Tutte queste caratteristiche rendono maggiormente necessario un supporto a livello nazionale per far crescere la produzione da fonte geotermica e facilitare l'accettazione di tale risorsa come totalmente rinnovabile.

Concludendo, possiamo senz'altro affermare che la Geotermia è Scienza, Tecnologia e Storia. Ognuna di queste discipline ha visto la geotermia italiana protagonista nello sviluppo di un sistema tecnologico e scientifico che è un autentico riferimento ed esempio nel mondo. Una storia millenaria accompagna lo sviluppo della geotermia dove quello che era soltanto un fenomeno naturale che incuriosiva o addirittura intimoriva l'uomo è divenuto una autentica sfida caratterizzata da un continuo sviluppo di tecnologie e di conoscenza divenute patrimonio dell'Umanità. La geotermia italiana ha percorso, prima di altri, le tappe fondamentali di questo sviluppo e colloca l'Italia tra i maggiori produttori di energia geotermica nel mondo ed un riferimento indiscusso sulle tecnologie di utilizzo di questa straordinaria forza della natura.

bibliografia

- [1] G. Gianelli, G. Ruggieri, M. Mussi: Isotopic and fluid inclusion study of hydrothermal and metamorphic carbonates in the Larderello geothermal field and surrounding areas, Italy. *Geothermics*, 26, 393-417, 1997.
- [2] Bertani, Thain: *IGA News* 49. pp. 1-3, 2002 - <https://www.geothermal-energy.org/iganews/> (accessed on 12 May 2021).
- [3] T. Fridriksson, A. Mateos, P. Audinet, Y. Orucu: Greenhouse Gas Emission from Geothermal Power Production; *The World Bank: Washington*, DC, USA, 2016
- [4] A. Lenzi, M. Paci, G. Giudetti, R. Gambini: Tracing Ancient Carbon Dioxide Emission in the Larderello Area by Means of Historical Boric Acid Production Data. *Energies*, 14, 4101, 2021 - <https://doi.org/10.3390/en14144101>
- [5] F. Frondini, S. Caliro, C. Cardellini, G. Chiodini, N. Morgantini: Carbon dioxide degassing and thermal energy release in the Monte Amiata volcanic-geothermal area (Italy). *Applied Geochemistry*, vol. 24, Issue 5, p. 860-875, 2009, ISSN 0883-2927 - <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2009.01.010>
- [6] H. Ármannsson: CO₂ Emission from Geothermal Plants. In Proceedings of the International Geothermal Conference, *Reykjavík, Iceland*, 14-17 September 2003 - <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.463.525&rep=rep1&type=pdf> (accessed on 31 May 2022).
- [7] C. Werner, C. Cardellini: Comparison of carbon dioxide emissions with fluid upflow, chemistry, and geologic structures at the Rotorua geothermal system, New Zealand. *Geothermics*, 35, 221-238, 2006.
- [8] A. Sbrana, A. Lenzi, M. Paci, R. Gambini, M. Sbrana, V. Ciani, P. Marianelli: Analysis of Natural and Power Plant CO₂ Emissions in the Mount Amiata (Italy) Volcanic-Geothermal Area Reveals Sustainable Electricity Production at Zero Emissions. *Energies*, 14, 4692, 2021 - <https://doi.org/10.3390/en14154692>
- [9] B. Goldstein, G. Hiriart, R. Bertani, C. Bromley, L. Gutierrez-Negrin, E. Huenges, H. Muraoka, A. Ragnarsson, J. Tester, V. Zui: Geothermal Energy, 2011. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwicker, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlomer, C. von Stechow (eds)], *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [10] Bilancio di Sostenibilità 2021 e 2022 del gruppo Enel.