



# Sommario

---

Sommario .....	2
Premessa .....	4
1 Introduzione .....	5
1.1 Risparmio energetico ed energie rinnovabili: dati e scenari .....	5
1.2 Le pompe di calore geotermiche .....	10
1.3 Impianti a circuito chiuso .....	11
1.3.1 Sonde geotermiche verticali .....	11
1.3.2 Pali geotermici .....	17
1.3.3 Impianti geotermici a circuito chiuso a sviluppo orizzontale .....	17
1.4 Impianti a circuito aperto .....	19
1.5 Aspetti economici e ambientali .....	22
1.5.1 Riduzione delle emissioni di gas serra .....	22
1.5.2 Sicurezza e rischi ambientali .....	22
2 Leggi, norme e procedure in materia di geotermia a bassa entalpia .....	24
2.1 Legislazione nazionale .....	24
2.1.1 Codice Civile .....	24
2.1.2 D. Lgs. 28/2011 (Energie rinnovabili) .....	24
2.1.3 Decr. Min. Amb. 25/11/2008 (Fondo Kyoto) .....	24
2.1.4 D. Lgs. 152/2006 (Testo Unico Ambientale) .....	25
2.1.5 D. Lgs. 22/2010 (risorse geotermiche) .....	25
2.2 Legislazione regionale .....	26
2.2.1 Piano di Tutela delle Acque .....	26
2.2.2 Regolamenti per le derivazioni di acque sotterranee .....	28
2.3 Normativa UNI .....	28
2.3.1 UNI 11466:2012 .....	29
2.3.2 UNI 11467:2012 .....	30

2.3.3	UNI 11468:2012.....	31
2.4	Procedura di autorizzazione degli impianti geotermici a bassa entalpia nella Regione Piemonte .	31
3	La Provincia di Cuneo .....	32
3.1	Geologia.....	32
3.2	Idrogeologia.....	36
3.3	Clima .....	38
4	Mappatura del potenziale geotermico per impianti a circuito chiuso.....	40
4.1	Scelta dei parametri per la mappatura.....	40
4.2	Stima della conducibilità termica del terreno .....	41
4.3	Stima della temperatura del terreno.....	46
4.4	Stima della potenzialità geotermica closed-loop (metodo G.POT.) .....	51
5	Mappatura del potenziale geotermico per impianti a circuito aperto.....	55
5.1	Mappatura dei parametri idrodinamici della falda .....	55
5.1.1	Bottom di falda e spessore saturo.....	56
5.1.2	Conducibilità idraulica e trasmissività .....	60
5.1.3	Gradiente idraulico di falda .....	63
5.2	Valutazioni sul potenziale geotermico open-loop.....	65
5.2.1	Ampiezza del fronte di cattura per unità di portata.....	66
5.2.2	Massima portata estraibile e iniettabile.....	68
5.2.3	Potenza massima .....	73
5.3	Considerazioni sulla chimica delle acque sotterranee .....	75
6	Conclusioni .....	77
	Bibliografia.....	80

## **Premessa**

La Fondazione Cassa di Risparmio di Cuneo è impegnata da anni in una serie di azioni volte a promuovere il risparmio energetico e la diffusione di impianti ad energie rinnovabili. In particolare, il Bando Ambientenergia, attivo con cadenza annuale dal 2011, ha permesso a decine di amministrazioni comunali del territorio provinciale di dotarsi di impianti fotovoltaici, di razionalizzare l'illuminazione pubblica, di attuare una pianificazione energetica territoriale, di effettuare audit energetici e di tradurre tali azioni in interventi di riqualificazione energetica cofinanziati dalla Fondazione stessa.

Il progetto "Studio e mappatura delle potenzialità della geotermia a bassa entalpia nella Provincia di Cuneo", presentato dal Politecnico di Torino – DIATI con il coordinamento del prof. Rajandrea Sethi, si propone di diffondere la conoscenza delle potenzialità di una fonte di energia rinnovabile, la geotermia a bassa entalpia, molto diffusa in alcuni Paesi del Centro e Nord Europa (Svezia, Finlandia, Germania, Austria, Svizzera) ma ancora poco conosciuta in Italia.

Nella presente relazione tecnica vengono presentati nel dettaglio il lavoro svolto nel progetto e i risultati ottenuti, che permettono di comprendere quali sono le aree della Provincia di Cuneo più adatte all'installazione di pompe di calore geotermiche. Nel Cap. 1 viene fornita una panoramica su questa tecnologia e sui principali aspetti progettuali e ambientali. Il Cap. 2 affronta la legislazione e la normativa nel campo della geotermia a bassa entalpia, dando un'indicazione delle procedure per l'approvazione di questi impianti. Il Cap. 3 descrive il territorio oggetto dello studio dal punto di vista geologico, idrogeologico e climatico. I dati forniti danno un inquadramento generale utile per i due capitoli successivi, che descrivono la metodologia seguita per la stima del potenziale geotermico per gli impianti a circuito chiuso (Cap. 4) e aperto (Cap. 5) e i risultati ottenuti (mappe del potenziale geotermico). Nel Cap. 6 sono infine riportate le conclusioni, con la sintesi del lavoro svolto e dei possibili sviluppi futuri.

## **1 Introduzione**

Le pompe di calore geotermiche sono una tipologia di impianto di climatizzazione basato sullo scambio termico con il terreno a basse profondità, indicativamente inferiori a 400 metri.

In questo capitolo, dopo una breve introduzione sulla situazione energetica attuale in Italia e in Europa, vengono descritte le differenti modalità con cui viene effettuato lo scambio termico con il terreno e gli aspetti progettuali, economici e ambientali di questa tecnologia.

### **1.1 Risparmio energetico ed energie rinnovabili: dati e scenari**

I combustibili fossili sono stati uno degli elementi fondanti del progresso della civiltà umana negli ultimi secoli, tuttavia negli ultimi 40 anni alcuni fattori limitanti di questo modello di sviluppo sono emersi con sempre maggior forza. Tra questi fattori, i più importanti sono la prospettiva di un esaurimento del petrolio e del gas naturale e il riscaldamento globale provocato dalla loro combustione, insieme all'inquinamento causato e alla fragilità di un sistema basato su risorse concentrate in pochi Paesi. La ricerca e la diffusione delle fonti di energia rinnovabile e del risparmio energetico sono diventate quindi una priorità nell'agenda politica a livello mondiale. In Italia, negli ultimi 10 anni, la politica energetica ha puntato molto sull'incremento della produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili, in particolare l'energia fotovoltaica, eolica e, in misura minore, idroelettrica da piccoli impianti. Il consumo totale di energia primaria, dopo aver raggiunto un picco di quasi 200 Mtep nel 2005, è in continuo calo, come si può osservare in Fig. 1. In particolare, il consumo energetico del settore industriale ha subito un crollo legato sia al miglioramento dei processi sia, soprattutto, alla riduzione della produzione industriale e allo spostamento all'estero di molte produzioni energivore (Fig. 2). Nel settore civile, invece, i consumi non si stanno riducendo nonostante le politiche di incremento dell'efficienza energetica. La maggior parte dei consumi di energia primaria sono attribuibili alla produzione di calore e di freddo (circa il 70%, secondo l'EIA [1]), ed è quindi in questo settore che devono concentrarsi gli sforzi per il risparmio energetico, per la riduzione delle emissioni e per l'incremento della produzione di energia da fonti rinnovabili.

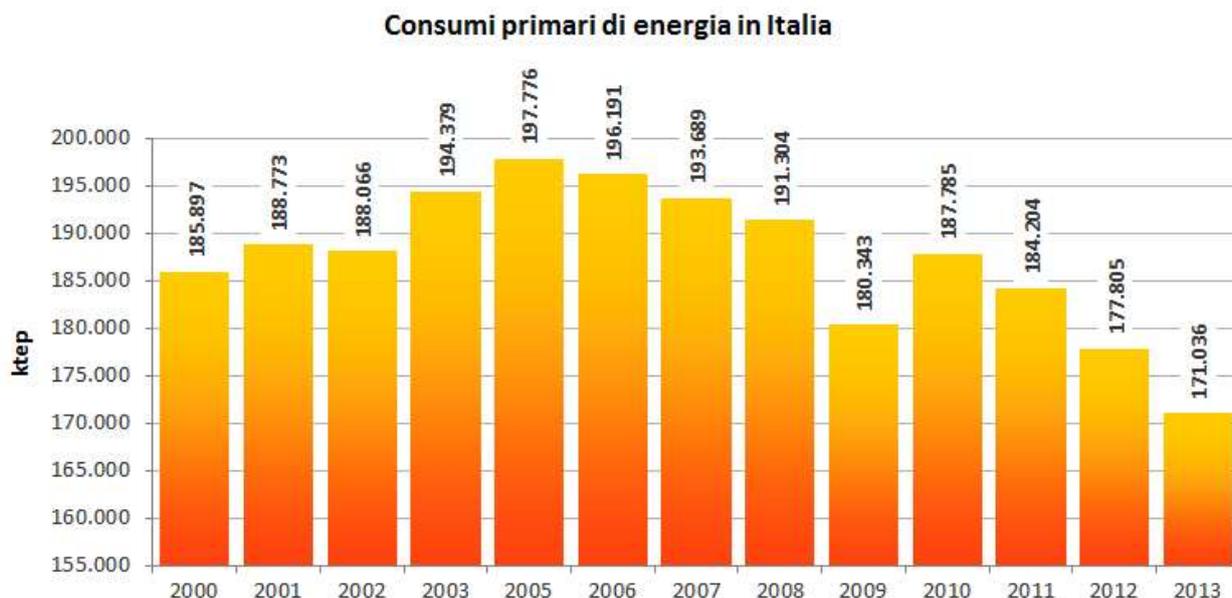


Fig. 1 – Andamento dei consumi totali di energia primaria in Italia (fonte: ENI [2]).

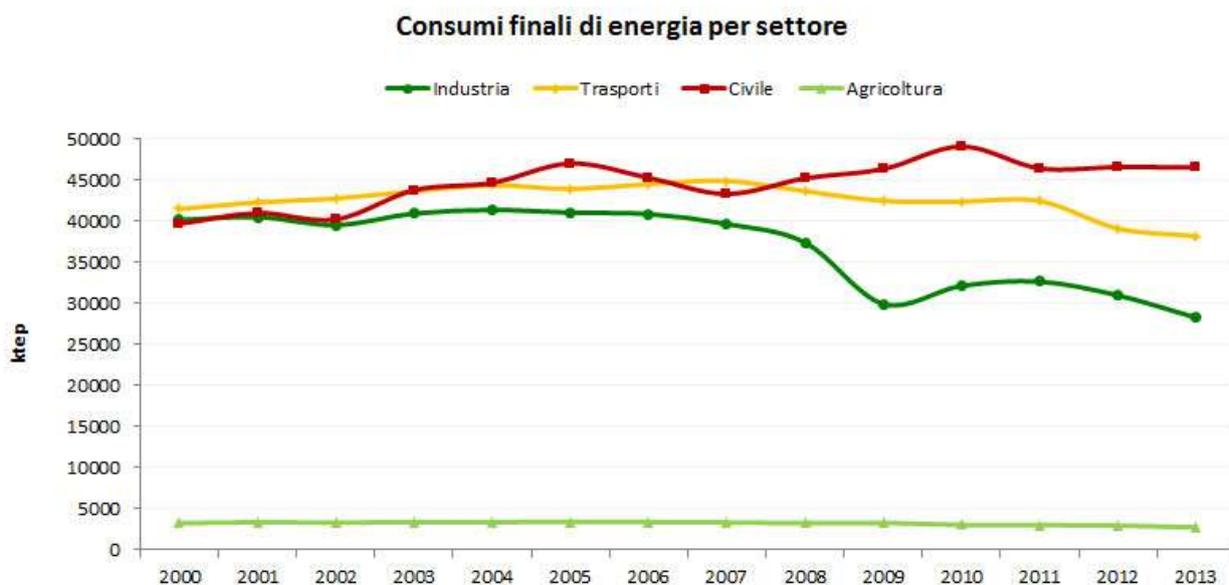


Fig. 2 – Andamento dei consumi di energia primaria in Italia, suddivisi per settore (fonte: ENI [2]).

Nell’obiettivo “20-20-20” stabilito dall’Unione Europea (riduzione del 20% dei consumi di energia primaria, riduzione del 20% delle emissioni di gas serra, raggiungimento del 20% di produzione di energia da fonti rinnovabili), l’Italia deve raggiungere una percentuale di produzione da fonti rinnovabili del 17% ed è a buon punto (16.7% nel 2013, come riportato in Fig. 3) grazie alla produzione di energia elettrica (34.3% sul consumo elettrico), mentre nel settore termico il contributo delle fonti di energia rinnovabile è decisamente più modesto, pari al 7%.

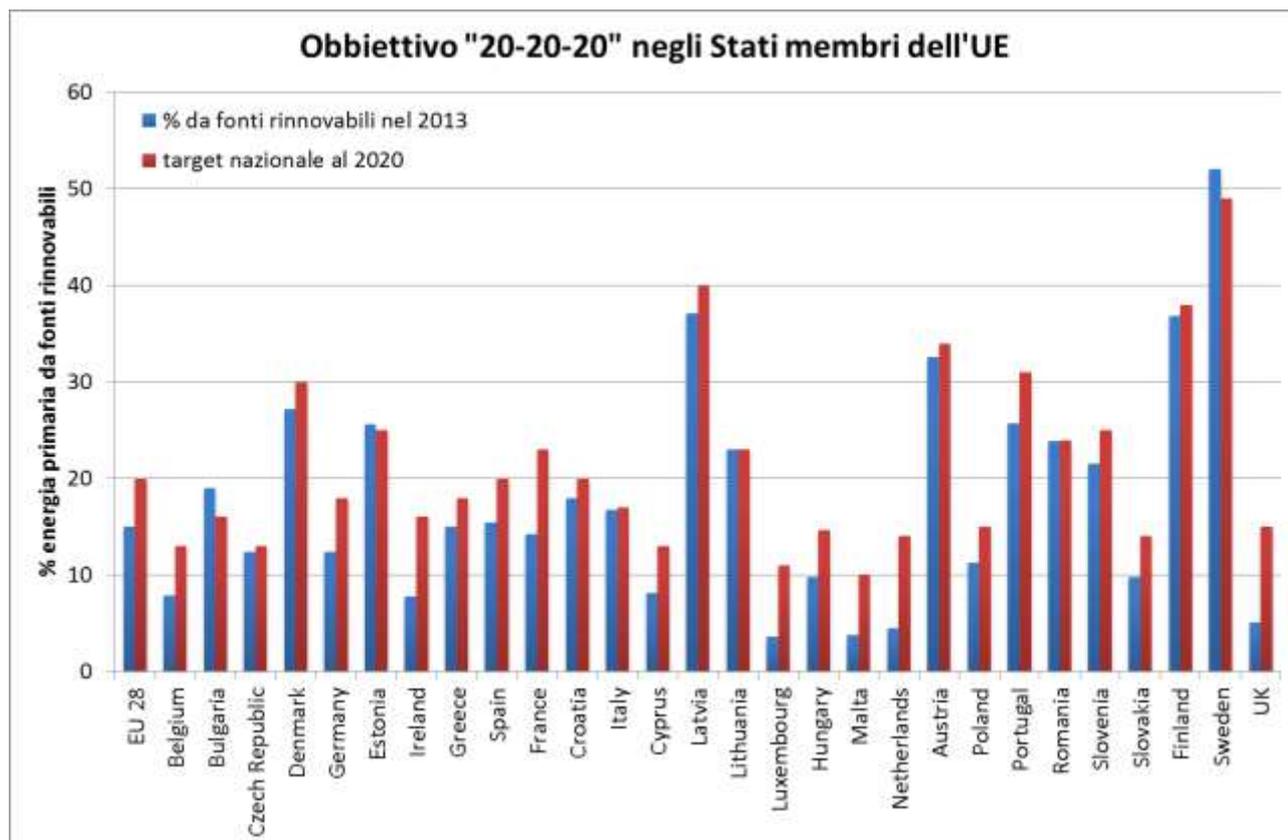
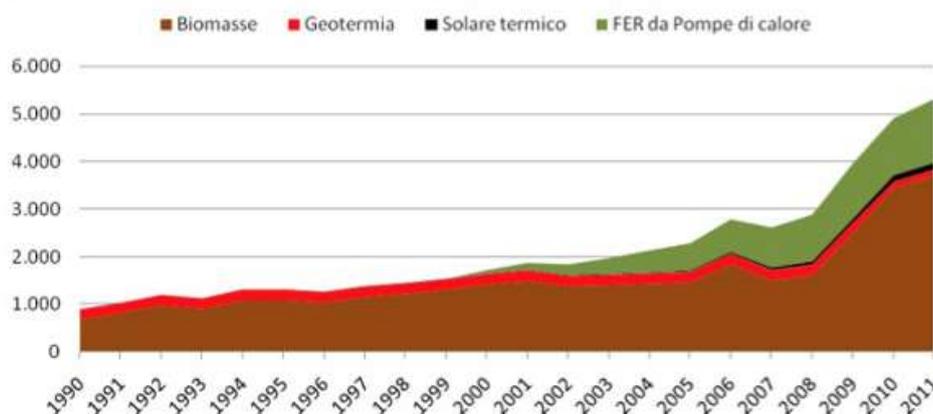


Fig. 3 –Aggiornamento al 2013 sul raggiungimento degli obiettivi imposti dal “Piano 20 20 20”. (Fonte: EUROSTAT [3]).

La produzione delle rinnovabili termiche è però quintuplicata negli ultimi 20 anni (Fig. 4), con un contributo determinante delle biomasse e delle pompe di calore, mentre il solare termico è usato per coprire una piccola parte dei consumi (produzione di acqua calda sanitaria) e gli usi diretti della geotermia sono ristretti a poche aree del nostro Paese.

Figura 1 Consumi di energia termica da fonti rinnovabili 1990-2011 (ktep)



Fonte: elaborazione e stime Amici della Terra Italia su dati Eurostat

Fig. 4 – Produzione di energia termica da fonti rinnovabili (fonte: EUROSTAT).

L'utilizzo di biomasse è in forte espansione e, soprattutto nella Provincia di Cuneo, potrà arrivare a rappresentare una voce importante nel bilancio energetico. Vi sono tuttavia limiti nel suo utilizzo

soprattutto in ambito urbano, a causa delle emissioni in situ sono molto superiori a quelle delle caldaie a metano e per ragioni pratiche legate all'approvvigionamento e allo stoccaggio di grandi quantità di legno. Per questo motivo, nell'ottica di incrementare significativamente la produzione di energia termica da fonti rinnovabili, è necessario puntare sulle pompe di calore, che permettono di azzerare le emissioni inquinanti *in situ* e di ridurre in modo consistente le emissioni inquinanti a livello globale. Secondo le statistiche dell'EUROSERV'ER (2013, [4]), l'Italia è il Paese leader in Europa con quasi 16 milioni di pompe di calore installate, che rappresentano quasi l'80% del totale europeo <sup>1</sup>. La maggior parte delle installazioni sono pompe di calore aerotermiche (99.9% circa) di piccola potenza, mentre il numero di pompe di calore geotermiche è molto ridotto (10300 stimate nel 2012) e con potenze medie molto più elevate. I dati sul numero di pompe di calore geotermiche sono scarsi e contraddittori: la potenza totale installata secondo EUROSERV'ER era di 231 MW nel 2011 [5], mentre secondo l'European Geothermal Council (EGEC) era di 500 MW nel 2010 [6]. Le organizzazioni internazionali concordano però sulle ottime prospettive di crescita dell'intero settore delle pompe di calore, che nel 2011 hanno prodotto circa 5.6 Mtep di energia termica rinnovabile e che, con l'attuale trend di crescita, arriveranno a produrre più del doppio (11.5÷12 Mtep), di cui circa un quarto sarà attribuibile alle pompe di calore geotermiche.

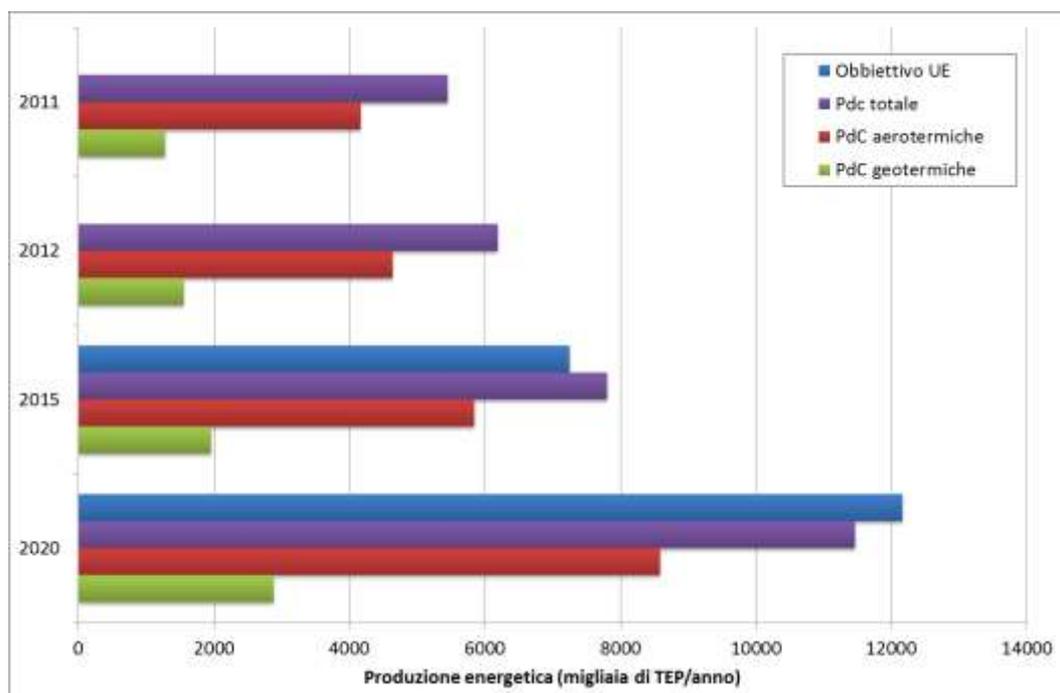


Fig. 5 – Dati sulla produzione energetica da pompa di calore in Europa. Fonte: EUROSERV'ER [4].

L'Italia potrà seguire questo trend di crescita se si verificheranno alcune condizioni:

<sup>1</sup> Il report specifica però che il dato in Italia tiene conto anche delle pompe di calore aerotermiche utilizzate prevalentemente per il raffrescamento, a differenza di quanto effettuato da tutti gli altri Paesi, che hanno scorporato questo tipo di impianti dal conteggio.

- miglioramento del rapporto tra il prezzo del kWh elettrico, tra i più alti d'Europa, e dei combustibili fossili, in modo da rendere più conveniente l'utilizzo delle pompe di calore. In questo senso, la tariffazione agevolata D1 introdotta recentemente (AEEG, 2014 [7]) rappresenta uno sviluppo positivo;
- mantenimento dei regimi di incentivazione sugli interventi di miglioramento dell'efficienza energetica e sulle fonti di energia termica rinnovabile;
- diffusione di una maggiore consapevolezza sul risparmio economico e sui vantaggi ambientali conseguibili con le pompe di calore;

Relativamente alle pompe di calore geotermiche, è inoltre necessario:

- diffondere la conoscenza su questa tecnologia, ancora poco nota e spesso confusa con la geotermia ad alta entalpia;
- introdurre meccanismi che premiano la maggiore produzione di calore rinnovabile data dalle pompe di calore geotermiche, rispetto a quelle aerotermiche;
- emanazione di regolamenti chiari e di procedure snelle per l'approvazione degli impianti geotermici a bassa entalpia. Attualmente, infatti, l'unica Regione che si è dotata di un regolamento è la Lombardia [8], mentre altrove le Province hanno emanato linee guida e regolamenti propri, spesso inutilmente restrittivi. Si attende inoltre, da 4 anni, l'emanazione del decreto attuativo previsto dal D.Lgs. 28/2011;
- fornire strumenti di supporto alla pianificazione delle installazioni geotermiche a bassa entalpia, che tengano conto della forte influenza delle proprietà sito-specifiche del terreno sulla progettazione di questi impianti.

## 1.2 Le pompe di calore geotermiche

Un impianto geotermico a bassa entalpia è costituito da un sistema di scambio termico con il suolo, da una pompa di calore e dai terminali dell'impianto di climatizzazione dell'edificio (Fig. 6).

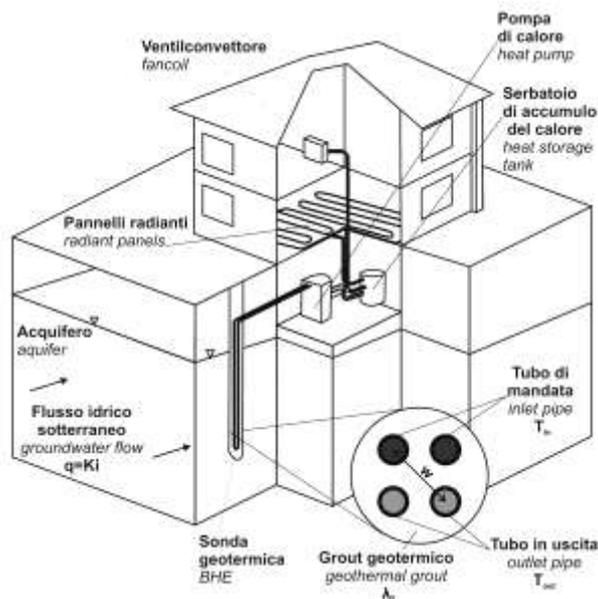


Fig. 6 – Componenti di un impianto con pompa di calore geotermica a circuito chiuso. Da Casasso e Sethi, 2013 [9].

La pompa di calore, il cuore del sistema, è una macchina in grado di trasferire energia termica da una sorgente a bassa temperatura ad una a temperatura più elevata, a spese del lavoro meccanico di un compressore: in inverno il calore viene trasferito dal terreno verso l'impianto di riscaldamento dell'edificio (a temperatura più elevata), mentre in estate il ciclo si inverte per il raffrescamento. Nonostante l'energia elettrica fornita alla pompa possa essere prodotta da fonti non rinnovabili, la geotermia a bassa entalpia è considerata una fonte rinnovabile: buona parte (dal 60 all'80%) del calore, infatti, proviene dal sottosuolo e può essere estratto per un tempo teoricamente infinito se l'impianto è correttamente dimensionato per tenere conto della capacità di rigenerazione del serbatoio termico.

A differenza degli impianti di climatizzazione convenzionali, tra i quali anche le pompe di calore aerotermiche, il dimensionamento dell'impianto è basato non solo sul consumo totale annuo e sulla potenza termica massima di riscaldamento e raffrescamento, ma anche sull'andamento temporale del carico termico, in modo da poter stimare come evolve nel tempo la temperatura del suolo in risposta alla sollecitazione imposta dallo scambio termico. Il terreno funziona infatti come un "serbatoio" di calore, di cui i prelievi e le immissioni di calore alterano il bilancio termico. Una eccessiva alterazione termica del terreno, infatti, porta a un malfunzionamento dell'impianto geotermico e deve quindi essere evitata con un dimensionamento sufficiente degli scambiatori.

Le modalità con le quali viene effettuato lo scambio termico sono due:

- negli impianti a circuito chiuso (closed loop), lo scambio termico avviene tramite la circolazione di un fluido termovettore in un circuito idraulico di tubi interrati;
- negli impianti a circuito aperto (open-loop), una coppia di pozzi (prelievo e reiniezione) scambia calore con l'acqua di falda che viene successivamente scaricata.

Nei prossimi paragrafi verranno descritti gli scambiatori al suolo e le tecniche di dimensionamento più comunemente impiegate.

### **1.3 Impianti a circuito chiuso**

Gli impianti a circuito chiuso sono i più diffusi, sia per la possibilità di applicazione anche in assenza di falda idrica, sia per la maggiore facilità delle procedure di approvazione. Per le pompe di calore geotermiche open loop è infatti necessario ottenere una concessione di derivazione di acque sotterranee, che può avere dei tempi di approvazione piuttosto lunghi, mentre per le sonde geotermiche è necessario, a seconda del Comune, seguire la procedura della DIA (Denuncia di Inizio Attività in edilizia) o della SCIA (Segnalazione Certificata di Inizio Attività). Il circuito chiuso di scambio termico può essere installato in posizione verticale in una perforazione appositamente effettuata (sonde geotermiche verticali) o in un palo di fondazione (pali geotermici), oppure posato orizzontalmente in una trincea o in uno sbancamento (sonde geotermiche orizzontali).

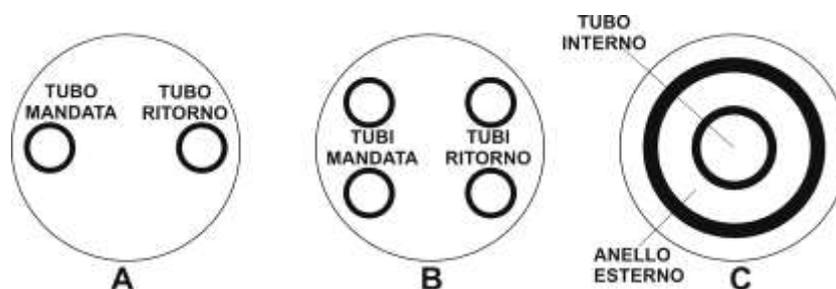
#### **1.3.1 Sonde geotermiche verticali**

Le sonde geotermiche verticali sono la tipologia più diffusa di scambiatore a circuito chiuso. Sono costituite da una tubazione (Fig. 7) all'interno della quale circola il fluido termovettore che opera lo scambio termico con il terreno. Vengono installate all'interno di una perforazione di diametro solitamente pari a 15 cm e con lunghezze che possono variare tra i 50 ed i 400 m, ma che generalmente sono dell'ordine dei 100 m.



**Fig. 7 – Preparazione alla posa in opera di una sonda geotermica a U doppia.**

Il circuito di scambio può avere tre diverse configurazioni: a U singola, a U doppia o coassiale (Fig. 8). La configurazione a U singola è la più semplice e lo scambio di calore con il suolo avviene sia in discesa che in risalita. Le tubazioni sono in polietilene ad alta densità (HDPE) con diametri esterni di 25, 32 o 40 mm, e resistenza alla pressione compresa tra 16 e 25 bar. Per mezzo di appositi spaziatori viene assicurata la massima distanza tra i tubi all'interno della sonda, per limitare il cortocircuito termico e minimizzare la resistenza termica dello scambiatore al suolo. Si possono affiancare, nella stessa perforazione, due circuiti (sonda a doppia U) al fine di ottenere uno scambio termico più efficace e di avere un sistema ridondante, in grado di funzionare anche in caso di rottura di una delle due tubazioni. Le sonde coassiali sono formate da due tubi concentrici di diametro differente, collegati sul fondo della perforazione. L'ingresso del fluido può avvenire dal tubo centrale o dalla corona circolare tra il tubo interno e quello esterno: lo scambio di calore con il suolo avviene però soltanto quando il fluido transita nella corona circolare esterna. Rispetto alla sonda a U, la superficie di scambio con il terreno è più ampia e il contatto termico è più diretto. Tali vantaggi sono però compensati negativamente dallo scambio termico esistente tra le tubazioni di mandata e di ritorno (cortocircuito termico) e da una fase di posa in opera decisamente più complessa e delicata. Per tali motivi, la configurazione più utilizzata è la sonda a U singola e, soprattutto in Germania e Svizzera, a U doppia.



**Fig. 8 –** Sezioni trasversali di sonde geotermiche a U singola (A), a U doppia (B) e coassiale (C). Da: Casasso e Sethi, 2013 [10].

Lo spazio tra il perforo ed i tubi deve essere riempito con un materiale termicamente conduttivo. In Svezia, dove per prime si diffusero le sonde geotermiche negli anni Ottanta, nelle perforazioni in roccia spesso si utilizza l'acqua come riempimento, poiché essa raggiunge un'elevata conducibilità termica allo stato solido, mentre allo stato liquido il gradiente verticale di temperatura e densità genera moti convettivi che riducono la resistenza allo scambio termico [11]. Tale soluzione non appare però praticabile in Italia, dove anzi alcuni regolamenti locali richiedono espressamente la cementazione delle sonde. Generalmente, quindi, si adottano calcestruzzi premiscelati specifici, contenenti bentonite e additivi che migliorano le performance termiche. L'aggiunta di bentonite serve inoltre ad evitare di mettere in comunicazione acquiferi differenti, eventualità piuttosto probabile viste le profondità abituali di perforazione. Tra gli altri additivi si possono annoverare gli inerti di sabbia quarzifera ma anche micro particelle di grafite [12] con la funzione di aumentare la conducibilità termica del materiale di riempimento. L'iniezione deve essere effettuata con

pompaggio (Fig. 9) a partire dal fondo del foro, per evitare la formazione di vuoti nella cementazione che aumenterebbero la resistenza termica dello scambiatore. E' importante quindi verificare che il getto della malta geotermica all'interno della sonda non venga effettuato a gravità.



**Fig. 9 – Pompa di iniezione del grout geotermico.**

Il fluido utilizzato per il trasporto di calore nel circuito sonde deve avere un basso punto di solidificazione, una bassa viscosità, un'elevata conducibilità termica e una ridotta tossicità. I fluidi più utilizzati sono soluzioni di glicole propilenico, glicole etilenico e cloruro di calcio, con concentrazioni differenti a seconda delle temperature minime previste durante il funzionamento dell'impianto (Tab. 1): per estrarre calore dal sottosuolo, infatti, la temperatura del fluido della sonda può scendere di alcuni gradi sotto lo zero. Inoltre, è possibile che la temperatura del terreno attorno alle tubazioni orizzontali che collegano le sonde con la centrale termica scenda sotto gli zero gradi, poiché tali tubazioni vengono installate a profondità modeste (generalmente inferiori a 1.50 m, per evitare di armare lo scavo).

In generale, aumentando la concentrazione di antigelo, diminuisce la temperatura di solidificazione ma aumenta la viscosità e conseguentemente il costo energetico di circolazione del fluido. Il glicole etilenico è un fluido poco costoso, di media viscosità e con una buona conducibilità termica, ma la sua forte tossicità lo rende pericoloso nell'ipotesi (pur poco probabile) di un suo sversamento in falda o di una fuoriuscita dal circuito sonde. Per questo motivo si ricorre sempre più frequentemente al glicole propilenico, che è atossico (è utilizzato anche nell'industria alimentare e farmaceutica) ma ha un costo maggiore ed è più viscoso. La degradazione in falda del glicole etilenico e propilenico è rapida, tuttavia la presenza di additivi anticorrosione e antimuffa può inibirla fortemente [13]. Le soluzioni di cloruro di calcio, a parità di temperatura di solidificazione, hanno valori di viscosità molto inferiori rispetto a quelle dei glicoli e costi molto inferiori. Esse presentano tuttavia lo svantaggio di essere corrosive e richiedono, pertanto, componenti appositamente progettate. L'utilizzo di acqua pura richiede un sovradimensionamento

dell'impianto, per mantenere la temperatura del fluido ad un sufficiente margine di sicurezza rispetto alla temperatura di solidificazione (0°C).

Tab. 1 – Proprietà termiche (temperatura di solidificazione e conducibilità termica) e reologiche di alcuni fluidi termovettori.

Fluido	T <sub>cong</sub> [°C]	λ [Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	μ [10 <sup>-3</sup> Pas <sup>-1</sup> ]	
			a 0°C	a 30°C
Acqua pura	0	0.59	1.79	0.80
Glicole propilenico 20%	-7	0.45	4.00	1.78
Glicole propilenico 30%	-12	0.42	7.00	2.37
Glicole etilenico 20%	-8	0.44	3.27	1.03
Glicole etilenico 30%	-16	0.42	4.38	1.30
Cloruro di calcio 10%	-7	0.57	2.13	0.93
Cloruro di calcio 20%	-20	0.54	3.12	1.54

La progettazione degli impianti con sonde geotermiche si basa sul calcolo delle temperature del fluido termovettore, dalle quali dipendono le performance della pompa di calore. Il dimensionamento deve minimizzare il costo di installazione, che è superiore rispetto alle altre soluzioni per la climatizzazione, con il vincolo di mantenere temperature del fluido compatibili con il buon funzionamento dell'impianto e ottenere una congrua riduzione dei costi di mantenimento rispetto, ad esempio, alle pompe di calore aerotermiche.

Uno dei metodi più utilizzati per il dimensionamento degli impianti con sonde geotermiche è quello di Eskilson [14, 15], che è utilizzato da programmi come Earth Energy Design [16] e GLHEPRO [17]. Entrambi i programmi, a partire dalle caratteristiche del suolo, dalla configurazione della sonda e dal carico termico mensile e di picco, calcolano le temperature del fluido termovettore ricavando la lunghezza minima necessaria a soddisfare i requisiti di temperatura del fluido minima (in modalità riscaldamento) e massima (in modalità raffrescamento).

Il modello di Eskilson sfrutta l'analogia tra il sistema fluido-sonda-terreno e un circuito elettrico, composto da due resistenze in serie (la resistenza termica della sonda  $R_b$  e quella del suolo  $R_g$ ) e tre nodi, che rappresentano:

- il terreno ad una distanza infinita dalla sonda, alla quale si può considerare che il disturbo termico sia nullo:

$$T_g(r = \infty, t) = T_0$$

Eq. 1

- la parete della perforazione, di raggio  $r_b$ , che è l'interfaccia tra il suolo e la sonda geotermica, alla temperatura:

$$T_g(r = r_b, t) = T_b(t)$$

Eq. 2

- il fluido termovettore alla temperatura media tra ingresso e uscita della sonda:

$$\bar{T}_f(t) = \frac{T_{f\ in}(t) + T_{f\ out}(t)}{2}$$

Eq. 3

La variazione di temperatura del suolo all'interfaccia con la sonda ( $T_b$ ) rispetto alla temperatura indisturbata  $T_0$  è quindi:

$$T_b(t) - T_0 = qR_g(t)$$

Eq. 4

dove  $q$  è la potenza termica per unità di lunghezza [ $MLT^{-3}$ ] ed è positiva se è immessa nel suolo e negativa se è estratta.

La differenza tra la temperatura dell'interfaccia della sonda ( $T_b$ ) e la temperatura media del fluido ( $\bar{T}_f$ ), dovuta alla resistenza termica della sonda  $R_b$ , è:

$$\bar{T}_f(t) - T_b(t) = qR_b$$

Eq. 5

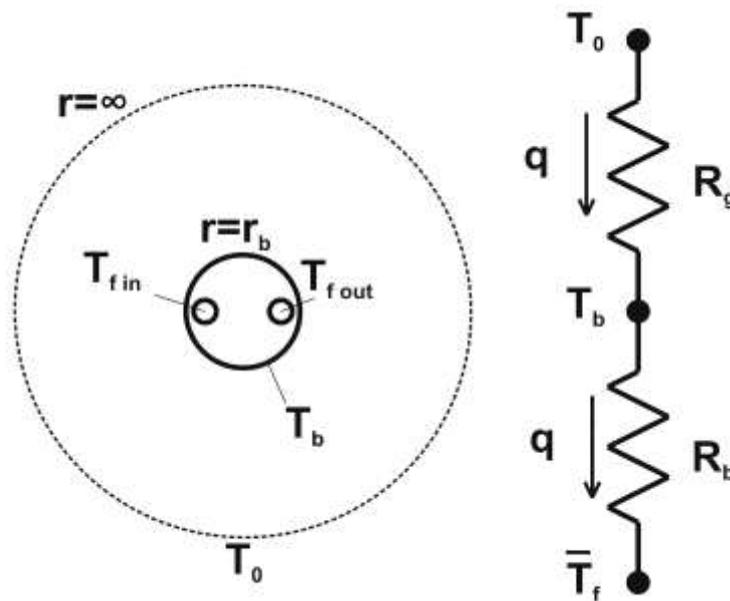


Fig. 10 – Schema concettuale del modello di Eskilson. Da: Casasso e Sethi, 2013 [10].

Il salto termico dovuto alla resistenza della sonda ( $\bar{T}_f(t) - T_b(t)$ ) va sempre a sfavore del rendimento della pompa di calore e, pertanto, la resistenza termica  $R_b$  va minimizzata. I fattori che influenzano maggiormente questo parametro sono la conducibilità termica del grout, la disposizione dei tubi (distanza reciproca e distanza dalla parete del perforo), la portata e il tipo di fluido termovettore: su questi parametri si può intervenire per ottimizzare il rendimento della sonda. Per una trattazione esaustiva delle formule

comunemente utilizzate per il calcolo della resistenza termica della sonda, si rimanda al lavoro di Lamarche et al. [18] e al modello di Bauer et al.[19].

La resistenza termica del suolo  $R_g$  è calcolata con formule analitiche o con modelli numerici e dipende dalle proprietà termiche del suolo e dalla configurazione della sonda o del campo di sonde. Il metodo più comunemente utilizzato è quello delle g-functions [14], funzioni adimensionali che descrivono l'andamento temporale della resistenza termica del suolo.

Il modello di Eskilson si basa sull'ipotesi di uno scambio puramente conduttivo ed effettivamente, a meno che siano presenti flussi di falda molto forti su buona parte della lunghezza della sonda, la conducibilità termica del suolo è il parametro fondamentale nel progetto dei campi di sonde geotermiche [9, 20, 21]. Essa dipende dalla litologia e dalla saturazione del suolo e può variare in intervalli molto ampi. Per stimare con precisione e in situ questo parametro, viene utilizzato il Thermal Response Test [22], una prova nella quale si immette una potenza termica costante (prodotta generalmente da una resistenza elettrica) in una sonda geotermica, per un tempo generalmente non inferiore a 48 ore. Da questi test si ricava, oltre alla conducibilità termica del suolo  $\lambda_g$ , anche la resistenza termica della sonda  $R_b$ , permettendo una progettazione più precisa dei grandi impianti (ad es. sopra i 50kW).

Un altro metodo molto utilizzato per il dimensionamento delle sonde geotermiche è il metodo ASHRAE [23], che si basa sul calcolo della lunghezza minima totale di sonde geotermiche che è necessario installare per rispettare un determinato requisito di temperatura minima (se l'impianto lavora prevalentemente in riscaldamento) o massima (per gli impianti di raffrescamento) del fluido nella sonda, data la conducibilità termica del terreno, la temperatura indisturbata e tre valori del carico termico: la media annuale, la media nel mese di utilizzo più intenso e la potenza massima (che spesso si assume pari alla potenza nominale della pompa di calore). Philippe et al. (2010, [24]) hanno implementato il metodo ASHRAE in un foglio elettronico, scaricabile all'indirizzo [www.ashrae.org/borehole.xls](http://www.ashrae.org/borehole.xls). Il metodo ASHRAE è inoltre consigliato dalla normativa UNI 11466 (Sistemi geotermici a pompa di calore - Requisiti per il dimensionamento e la progettazione. UNI, 2012 [25]).

Negli ultimi anni si è imposto l'uso di codici numerici di flusso e trasporto anche nella progettazione dei campi di sonde geotermiche. Il codice FEFLOW [26], ad esempio, ha un'apposita interfaccia per il calcolo delle temperature del fluido in una o più sonde geotermiche. Il principale vantaggio delle simulazioni con questi codici numerici è la possibilità di tenere in conto l'advezione e la dispersione termica operata dai moti di falda e di utilizzare geometrie complesse dei campi di sonde, mentre i modelli citati in precedenza sono in grado di modellizzare solo alcune tipologie standard con uno scambio termico puramente conduttivo. Lo svantaggio di questi software è il loro costo e la loro complessità, che limitano il loro utilizzo agli impianti di grandi dimensioni, per i quali un dimensionamento più accurato permette di ottenere un vantaggio economico sufficiente a giustificare i maggiori costi di progettazione.

### **1.3.2 Pali geotermici**

I pali di fondazione possono essere utilizzati per lo scambio termico con il suolo, fissando le tubazioni per lo scambio termico all'armatura del palo. I pali geotermici sono quindi scambiatori verticali con un funzionamento simile a quello delle sonde geotermiche. La differenza principale è la minore resa (10÷30 W/m, a fronte dei 30÷60 W/m delle sonde geotermiche), dovuta a due fattori: la minore conduttività termica dei terreni nei quali si utilizza questa fondazione (argille e terreni organici) e la necessità di contenere la dilatazione e contrazione termica del palo, che comprometterebbe la stabilità dell'edificio. I terreni argillosi, infatti, hanno comportamento plastico, cioè mantengono la deformazione impressa (compressione) anche al cessare della sollecitazione che l'ha provocata: ciò significa che, quando la dilatazione del palo causata dal suo riscaldamento (quando l'impianto geotermico lavora in modalità di raffrescamento) induce una compressione del terreno circostante, il suo effetto permane anche quando, successivamente, il palo subisce un raffreddamento (e quindi, una contrazione) durante l'estrazione di calore per il riscaldamento dell'edificio, il terreno circostante mantiene la deformazione precedentemente impressa e, di conseguenza, può ridursi o cessare l'effetto di attrito laterale sulla parete del palo, che è un principio di funzionamento fondamentale di questo tipo di fondazione.

Il vantaggio principale dei pali geotermici è il risparmio sui costi di perforazione, dato dall'utilizzo di una perforazione per scopi sia strutturali che energetici. Per contro, la minore resa termica e la distribuzione spaziale dei pali, che richiede lunghe tubazioni di distribuzione, comporta dispersioni termiche e alti costi energetici per la circolazione del fluido.

L'istituto svizzero SUPSI ha sviluppato un software specifico per i pali geotermici, PILESIM 2 [27], tuttavia è comune anche l'utilizzo, seppure non molto rigoroso, dei software di dimensionamento per le sonde geotermiche come EED e GLHEPRO. Nella normativa UNI 11466 (2012, [25]) si riporta una descrizione delle modalità di dimensionamento dei pali geotermici e del calcolo degli effetti strutturali della dilatazione e della contrazione dei pali.

In questa relazione non vengono studiate le potenzialità di applicazione di questa tecnologia, poiché rappresenta una nicchia di mercato ridotta e la progettazione di questi impianti deve tener conto, più che dello scambio termico con il terreno circostante, delle problematiche strutturali che potrebbero insorgere e che devono essere studiate caso per caso.

### **1.3.3 Impianti geotermici a circuito chiuso a sviluppo orizzontale**

Nel caso sia disponibile vicino all'edificio una grande superficie di terreno, si può adottare la soluzione a circuito chiuso orizzontale, installato a profondità molto ridotte (tra 0.8 e 3 m): a queste profondità, la temperatura del suolo presenta una variabilità durante l'anno, sia pure in un intervallo molto più ridotto rispetto alle oscillazioni di temperatura dell'aria. Le tipologie adottate sono la tubazione a serpentina (eventualmente con alette per aumentare la superficie di scambio) o a bobina (gli "earth coils"), le

tubazioni a sviluppo lineare e i cosiddetti “basket geotermici” (Fig. 11). In Fig. 12 è rappresentata una fase di installazione di un impianto a sonde geotermiche orizzontali dopo lo sbancamento di terreno.

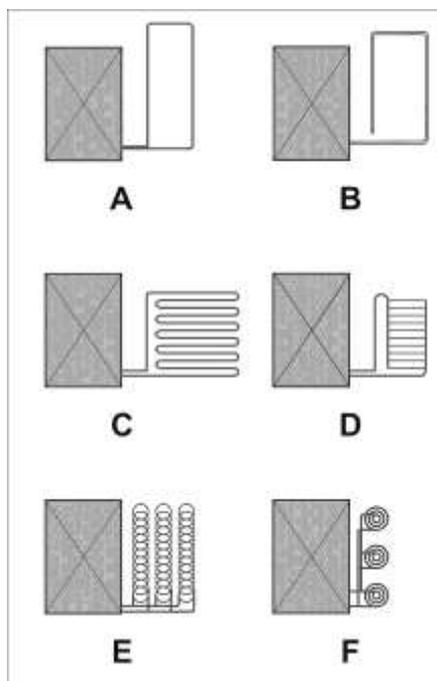


Fig. 11 – Schemi di impianto geotermico a circuito chiuso a sviluppo orizzontale: con tubo singolo (A) e doppio (B), con serpentine in serie (C) e in parallelo (D), con bobine o *earth coils* (E) e basket geotermici. Da: Casasso e Sethi, 2013 [10].



Fig. 12 – Installazione di un impianto a sonde geotermiche orizzontali di tipo “earth coils”.

I costi di installazione sono inferiori rispetto a quelli delle sonde geotermiche verticali e dovuti in buona parte ai movimenti terra necessari per lo scavo della trincea o dello sbancamento. Lo scambio termico con il suolo in questi impianti è però molto meno efficiente rispetto alle altre tipologie, e i rendimenti energetici sono molto più bassi. Ciò è dovuto al fatto che il terreno a basse profondità risente, seppure in misura ridotta, della variazione di temperatura dell’aria e questo riduce in parte i vantaggi dell’utilizzo, come

sorgente di calore, di uno scambiatore al terreno al posto dell'aria. E' necessaria inoltre un'area molto grande per il circuito di geoscambio, poiché le rese sono molto basse:  $10\div 40 \text{ W/m}^2$  per le tubazioni a serpentina o a bobina e  $4\div 16 \text{ W/m}$  per quelle a sviluppo lineare, con una forte dipendenza dall'umidità del terreno [28]. Una guida di riferimento per la progettazione e il dimensionamento di questi impianti può essere reperita su un manuale tecnico della Caleffi ([29]) e sulla norma UNI 11466 ([25]). Sull'area dove vengono installati questi impianti, inoltre, non possono sorgere edifici o piante ad alto fusto e non si possono installare altri sottoservizi.

In questa relazione non vengono studiate le potenzialità di applicazione di questa tecnologia, che comunque rappresenta una nicchia estremamente ridotta nel mercato degli impianti geotermici, poiché non è possibile tenere in considerazione la variabilità delle caratteristiche del suolo a profondità così ridotte, peraltro suscettibili di variazioni indotte dall'uomo (copertura di superfici, movimenti terra ecc.).

#### 1.4 Impianti a circuito aperto

Negli impianti a circuito aperto, la pompa di calore opera uno scambio termico con l'acqua di falda superficiale, che viene prelevata da un pozzo (Fig. 13) e successivamente scaricata, con modalità differenti che dipendono sia dalle scelte progettuali che dalle prescrizioni normative.



Fig. 13 – Schema di un impianto geotermico a circuito aperto: pozzo di prelievo, scambio termico con la pompa di calore, reiniezione in falda con sviluppo di plume termico a valle. Da: Casasso e Sethi, 2013 [10].

La reiniezione in un corpo idrico superficiale (ad es. in un fiume o in un canale irriguo) è la modalità di scarico più semplice ed economica: permette infatti di risparmiare sulla trivellazione del pozzo di reiniezione ed evita l'alterazione termica della falda che, come evidenziato in Fig. 14, può raggiungere il pozzo di prelievo dando origine alla cortocircuitazione termica. Tale modalità può causare tuttavia un depauperamento della risorsa idrica sotterranea ed è pertanto sconsigliabile, a meno che si tratti di impianti di potenza modesta. La reiniezione in falda può avvenire sulla superficie, con bacini di ricarica o

trincea drenante, o in profondità, con pozzi che iniettano l'acqua nella zona satura dell'acquifero o nella zona non satura sovrastante (zona vadosa).

La potenza termica ( $P$ ) scambiata con la falda dipende dalla portata prelevata ( $Q$ ) e dalla differenza di temperatura dell'acqua di falda tra prelievo e restituzione ( $\Delta T_w$ ):

$$P = (\rho c)_w \cdot Q \cdot \Delta T_w$$

Eq. 6

dove  $(\rho c)_w$  è la massa termica dell'acqua (4.18 MJ/kg). In caso di reiniezione in falda, la differenza di temperatura tra ingresso e uscita deve essere il più possibile contenuta, per evitare l'alterazione dell'attività microbica e geochimica del sistema acquifero. Secondo la normativa tedesca VDI 4640 il valore di  $\Delta T_w$  non deve superare i 6°C [30]: dall'Eq. 6 per una portata scambiata pari a 1 l/s, la potenza è di circa 25 kW.

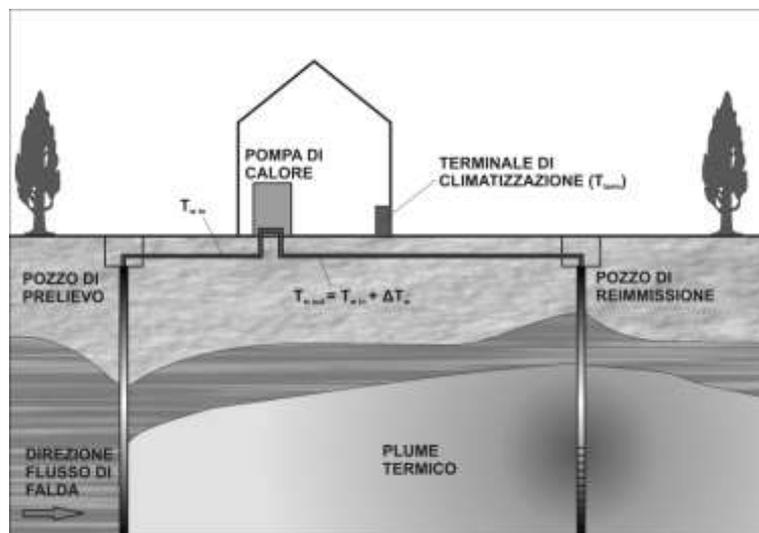


Fig. 14 – Cortocircuitazione termica: il plume termico nel pozzo di reimmissione viene “richiamato” dal pozzo di prelievo posto a monte, provocando un’alterazione delle temperatura dell’acqua prelevata. Da: Casasso e Sethi, 2013 [10].

I parametri chimici dell'acqua devono essere studiati in fase progettuale: la presenza di ioni di ferro o manganese, o un'elevata durezza, per esempio, richiedono trattamenti preliminari dell'acqua prelevata, per evitare la formazione di incrostazioni nello scambiatore di calore. Nei pozzi, inoltre, l'attività batterica provoca fenomeni di incrostazione (biofouling) che richiedono periodici trattamenti di rimozione (Howsam, 1988 [31]). Gli impianti geotermici open loop con reiniezione in falda richiedono uno studio numerico in regime transitorio dell'estensione del disturbo termico nell'acquifero e della cortocircuitazione termica tra pozzo di prelievo e pozzo di reiniezione. L'estensione e l'entità del disturbo termico, infatti, dipendono da parametri variabili nello spazio e/o nel tempo, come la portata e la potenza termica scambiata con la falda, la conducibilità idraulica, il gradiente idraulico, la porosità efficace e la dispersività termica. La cortocircuitazione termica, che si verifica quando l'acqua prelevata dal pozzo di estrazione risente del

disturbo termico provocato dal pozzo di reiniezione, dipende dalla distanza tra i due pozzi e dall'estensione del plume termico [32]. Per la simulazione termo-idrogeologica è consigliato l'utilizzo di codici numerici di modellizzazione di flusso e trasporto di calore, quali FEFLOW [33] e SEAWAT [34]. Sfruttando l'analogia tra i due meccanismi di trasporto [35] si possono anche utilizzare modelli di trasporto dei contaminanti nel sottosuolo come MODFLOW [36] per simulare il trasporto di calore [37, 38]. Casasso e Sethi (2015, [39]) hanno sviluppato recentemente un codice e una formula pratica per il calcolo dell'entità dell'alterazione termica dell'acqua prelevata, dovuta alla cortocircuitazione termica, in funzione delle proprietà idrogeologiche dell'acquifero e dei parametri operativi d'impianto. Questi strumenti possono essere usati per uno studio preliminare della fattibilità di un impianto o, per installazioni di potenza ridotta, per la progettazione.

I vantaggi principali degli impianti a circuito aperto sono il basso costo di installazione e l'ingombro limitato: con uno o più pozzi di prelievo e reiniezione, di profondità ridotta (pochi metri o poche decine di metri) è infatti possibile scambiare con la falda una potenza termica dell'ordine dei Megawatt (ad esempio, edifici di migliaia di mq di superficie), che richiederebbero invece la perforazione di sonde geotermiche per decine di migliaia di metri. Il rendimento della pompa di calore negli impianti a circuito aperto è generalmente superiore rispetto a quello degli impianti a circuito chiuso poiché, in assenza di cortocircuitazione termica, la temperatura dell'acqua prelevata resta costante e pari a quella indisturbata del terreno, a differenza di quanto avviene in un impianto closed loop, nel quale il terreno circostante subisce un'alterazione della temperatura dovuta allo scambio termico. Il consumo energetico dell'impianto dipende anche dalla soggiacenza di falda e quindi dalla prevalenza della pompa e dalla potenza impiegata per il pompaggio da pozzo, che si somma al consumo energetico della pompa di calore. In caso di elevata soggiacenza della falda, potrebbe essere più conveniente l'adozione di un impianto a circuito chiuso.

Gli impianti a circuito aperto richiedono però una caratterizzazione idrodinamica approfondita del sistema acquifero, che in mancanza di studi preesistenti può comportare anche l'effettuazione di sondaggi e prove di falda [40]. La reiniezione in falda potrebbe essere evitata, sebbene l'orientamento delle autorità competenti sia generalmente contrario per evitare un inutile depauperamento della falda: nel caso venga concesso il prelievo senza reiniezione, bisogna comunque tenere in conto gli eventuali costi di smaltimento in fognatura. Negli altri casi, in cui viene effettuata la reiniezione in falda, si diffonde a valle dell'impianto un "plume termico" di acqua a temperatura differente da quella indisturbata (generalmente, più fredda d'inverno e più calda d'estate), con potenziali conseguenze negative su eventuali impianti analoghi posti a valle. Le procedure di approvazione degli impianti a circuito aperto sono inoltre più lunghe poiché, come verrà spiegato più avanti nel dettaglio, al di sopra di una certa taglia è necessario ottenere una concessione di derivazione di acque sotterranee.

## 1.5 Aspetti economici e ambientali

### 1.5.1 Riduzione delle emissioni di gas serra

Le pompe di calore geotermiche permettono di ridurre in modo notevole i consumi di energia primaria e le emissioni di gas serra, che dipendono dal COP della pompa di calore e il mix di fonti utilizzate per la produzione di energia elettrica.

Il COP della pompa di calore dipende, come già accennato in precedenza, dalla tipologia dell'impianto (generalmente è più elevato per gli impianti a circuito aperto e più basso per quelli a circuito chiuso), dalle caratteristiche termiche e idrogeologiche del terreno e della falda e dalla bontà della progettazione e dell'installazione. Lo Russo e Civita (2009 [41]) hanno stimato, per gli impianti open loop in Piemonte, un COP pari a 7.5 e, considerando la produzione elettrica italiana, a questo rendimento corrisponde una riduzione del 61% delle emissioni di CO<sub>2</sub> rispetto a una caldaia a metano [41]. Esaminando i mix energetici di 29 Paesi Europei, Saner et al. (2010, [42]) concludono che le sonde geotermiche riducono le emissioni di CO<sub>2</sub> di circa il 75% rispetto ad una caldaia a metano in Paesi come Norvegia, Svezia, Francia e Svizzera (dove gran parte dell'energia elettrica è prodotta da centrali idroelettriche e nucleari), mentre in Italia (dove la produzione è ancora basata in gran parte sui combustibili fossili) tale risparmio si riduce al 28%.

La Life Cycle Analysis (LCA) applicata alle sonde geotermiche [42] evidenzia come il principale impatto ambientale sia la CO<sub>2</sub> dovuta al consumo di energia elettrica (87.1%), seguito dalle perdite di refrigerante della pompa di calore (6.1%), sebbene quest'ultimo impatto si sia ridotto notevolmente con l'abolizione dei CFC.

### 1.5.2 Sicurezza e rischi ambientali

L'assenza di fiamme e di stoccaggi di idrocarburi rende le pompe di calore, al pari del teleriscaldamento, la soluzione più sicura per il riscaldamento degli edifici. Vi sono però alcuni rischi potenziali per l'ambiente, che di seguito vengono brevemente descritti. L'alterazione termica (soprattutto il riscaldamento) dell'acqua di falda può portare a variazioni dei parametri geochimici dell'acquifero e alterazioni temporanee della microbiologia e dell'attività batterica [43], che però sono generalmente trascurabili nell'intervallo di temperatura abituale delle pompe di calore geotermiche. Sono stati osservati impatti apprezzabili sulla geochimica delle falde solo in alcune applicazioni, come gli stoccaggi termici in acquifero (ATES, Aquifer Thermal Energy Storage) molto diffuse in altri Paesi, come l'Olanda (Bonte *et alii* [44, 45]), ma impraticabili nel territorio della Provincia di Cuneo e in generale del Piemonte, dove la falda idrica è in forte movimento. Un altro possibile impatto è la messa in comunicazione tra acquiferi differenti. E' un problema che riguarda soprattutto le sonde geotermiche, data la loro profondità, mentre i pozzi degli impianti a circuito aperto sono generalmente finestrati nella falda freatica. E' importante quindi utilizzare una malta geotermica (che contiene bentonite, una argilla impermeabile), correttamente miscelata e installata per evitare questo impatto ambientale. Il rilascio del fluido termovettore, per rottura della tubazione o per sversamento

accidentale, è altamente improbabile e, in ogni caso, il volume sversabile è di poche decine di litri e la biodegradazione dei composti abitualmente usati (glicole propilenico o etilenico) è piuttosto rapida [13]. Infine, durante l'esercizio degli impianti a pompa di calore avvengono delle perdite di fluido refrigerante della pompa di calore, che solitamente è un composto a elevato potere di effetto serra (1000÷2000 volte maggiore dell'anidride carbonica) e che, come evidenziato in precedenza, contribuisce per una piccola parte all'impatto ambientale totale di una pompa di calore.

## **2 Leggi, norme e procedure in materia di geotermia a bassa entalpia**

La legislazione in materia di geotermia in Italia è carente, molto frammentata e contraddittoria, e questa è riconosciuta da molti operatori del settore come una delle cause principali del suo limitato sviluppo [10]. In questo capitolo si riassumono le principali disposizioni di legge attualmente in vigore, le tre recenti normative UNI 11466÷11468 ([25, 46, 47]) e le procedure da seguire per la richiesta di autorizzazione di un impianto geotermico a bassa entalpia in Piemonte.

### **2.1 Legislazione nazionale**

#### **2.1.1 Codice Civile**

Nel Codice Civile sono presenti alcuni articoli di interesse per le installazioni geotermiche:

- Art. 840 Sottosuolo e spazio sovrastante al suolo. La proprietà del suolo si estende al sottosuolo, con tutto ciò che vi si contiene, e il proprietario può fare qualsiasi escavazione od opera che non rechi danno al vicino. [...] Il proprietario del suolo non può opporsi ad attività di terzi che si svolgano a tale profondità nel sottosuolo o a tale altezza nello spazio sovrastante, che egli non abbia interesse ad escluderle;
- Art. 844 Immissioni. Il proprietario di un fondo non può impedire le immissioni di fumo o di calore, le esalazioni, i rumori, gli scuotimenti e simili propagazioni derivanti dal fondo del vicino, se non superano la normale tollerabilità, avuto anche riguardo alla condizione dei luoghi. Nell'applicare questa norma l'autorità giudiziaria deve contemperare le esigenze della produzione con le ragioni della proprietà. Può tener conto della priorità di un determinato uso;
- Art. 889 Distanze per pozzi, cisterne, fosse e tubi. Chi vuole aprire pozzi, cisterne, fosse di latrina o di concime presso il confine, anche se su questo si trova un muro divisorio, deve osservare la distanza di almeno due metri tra il confine e il punto più vicino del perimetro interno delle opere predette. Per i tubi d'acqua pura o lurida, per quelli di gas e simili e loro diramazioni deve osservarsi la distanza di almeno un metro dal confine. Sono salve in ogni caso le disposizioni dei regolamenti locali.

#### **2.1.2 D. Lgs. 28/2011 (Energie rinnovabili)**

Il Decreto Legislativo 28/2011 prevede, all'art. 7 comma 4, l'emanazione di un regolamento attuativo che regolamenti, tra le varie fonti di energia rinnovabile, anche gli impianti geotermici a bassa entalpia. Nonostante il termine di tre mesi posto dal decreto legislativo, ad oggi non è ancora stato emanato il decreto ministeriale che regolamenti a livello nazionale le pompe di calore geotermiche.

#### **2.1.3 Decr. Min. Amb. 25/11/2008 (Fondo Kyoto)**

Il Decreto del Ministero dell'Ambiente 25/11/2008 istituì un fondo rotativo per il rispetto del protocollo di Kyoto, per finanziamenti agevolati a impianti di produzione da Fonti Energetiche Rinnovabili, con una

dotazione di circa 200 mln € all'anno, presso la Cassa Depositi e Prestiti. L'erogazione dei finanziamenti è vincolata al rispetto di precise disposizioni tecniche, riportate nel Decreto del Ministero dell'Ambiente 19 luglio 2011 [48]:

- E' necessario analizzare, nella relazione progettuale, il rischio di contaminazione in falda e con l'assetto idrogeologico;
- E' necessario prelevare campioni di terreno durante la perforazione (uno ogni 10m e comunque almeno uno per ogni strato differente);
- Il riempimento del perforo deve essere effettuato con cementazione;
- I tubi devono essere in HDPE PN16 (PN10 per la distribuzione orizzontale);
- E' necessario effettuare test di pressione sulle sonde (10 bar, 1h,  $\Delta p < 0.5$  bar);
- Gli antigelo permessi sono glicole etilenico e propilenico, etanolo,  $\text{CaCl}_2$ .

Ulteriori informazioni sono reperibili al sito della CDP <sup>2</sup>.

#### **2.1.4 D. Lgs. 152/2006 (Testo Unico Ambientale)**

Il Decreto Legislativo 152/2006 "Testo Unico Ambientale", all'art. 104, vieta lo scarico in falda di qualsiasi tipo di refluo, specificando nel comma 2 come unica eccezione proprio le acque provenienti da impianti geotermici.

#### **2.1.5 D. Lgs. 22/2010 (risorse geotermiche)**

Il Decreto Legislativo 22/2010 è un riordino della disciplina in materia di risorse geotermiche, che abroga in toto la precedente Legge 896/1986. Nel decreto, in base alla temperatura del fluido, vengono definite tre categorie di risorsa geotermica:

- Alta entalpia: superiore a 150°C;
- Media entalpia: tra 90 e 150°C;
- Bassa entalpia: inferiore a 90°C.

Si stabiliscono inoltre tre soglie dimensionali:

- Le risorse ad alta entalpia che possono assicurare una potenza superiore a 20 MW e quelle in aree marine sono considerate di interesse nazionale;
- Le risorse a media e bassa entalpia di potenza inferiore a 20 MW sono considerate di interesse locale;
- Le risorse a bassa entalpia di potenza inferiore a 2 MW con riferimento a una temperatura di 15°C, ottenute mediante l'esecuzione di pozzi fino a 400 m di profondità, anche per produzione di energia elettrica, nonché le sonde geotermiche (per le quali non avviene quindi estrazione di fluidi geotermici) sono ritenute "piccole utilizzazioni locali", per le quali sono competenti le Regioni o gli Enti da esse delegate;

---

<sup>2</sup> URL: <http://portalecdp.cassaddpp.it/cdp/AreaGenerale/FondoKyoto/index.htm>

Inoltre all'art.10 si precisa che:

- Le piccole utilizzazioni locali con la realizzazione di pozzi (open loop) sono concesse dalla Regione, con le modalità previste per le concessioni idriche di derivazione;
- Le piccole utilizzazioni locali con la realizzazione di sonde (closed loop) sono sottoposte alla disciplina emanata dalla Regione competente, con procedure semplificate, fermo restando che l'emanazione delle linee guida è di competenza dei Ministeri dello Sviluppo Economico, dell'Ambiente e delle Infrastrutture e Trasporti, che secondo l'art. 7 del D.Lgs. 28/2011 dovrebbero emanare un decreto attuativo.

## **2.2 Legislazione regionale**

La legislazione regionale del Piemonte interviene, per quanto attiene alle sonde geotermiche, sull'aspetto della possibile miscelazione di acque provenienti da falde idriche differenti.

### **2.2.1 Piano di Tutela delle Acque**

Con Determinazione Dirigenziale n.900 del 3/12/2012, in particolare l'Allegato 1, e con il successivo chiarimento della Regione, [49], l'acquifero della pianura piemontese è stato distinto in due aree:

- Aree nelle quali, a una profondità superiore ai 50m di spessore saturo della falda, sono stati individuati veri e propri setti di terreni fini che delimitano fisicamente l'acquifero superficiale (delimitazione con metodo litostratigrafico);
- Aree nelle quali tale delimitazione non è possibile e dove si ipotizza una circolazione idrica più profonda, distinguibile con metodo idrochimico.

Per le opere potenzialmente miscelanti, si prescrive di non superare il limite inferiore dell'acquifero superficiale della pianura piemontese. Le sonde geotermiche, però, non sono soggette a tale limitazione, ad eccezione delle zone di riserva (RISE) e delle zone di protezione dei campi pozzi d'interesse regionale, come indicate dal Piano di Tutela delle Acque [50]. Per quanto riguarda la Provincia di Cuneo, in Fig. 15 si può osservare che nel PTA non compaiono aree di salvaguardia dei pozzi idropotabili di interesse regionale, ma sono presenti due zone di riserva, una compresa tra gli abitati principali di Racconigi, Sommariva del Bosco, Bra e Cavallermaggiore, e un'altra alla confluenza tra il fiume Po e i torrenti Pellice e Varaita, che ricade parzialmente nei Comuni di Moretta, Faule e Polonghera. Stando a questa interpretazione, quindi, in queste due aree non è permesso installare sonde geotermiche che oltrepassino il letto dell'acquifero superficiale, posto a profondità dell'ordine dei 50 metri, mentre nel resto del territorio provinciale non sono previste limitazioni di profondità.

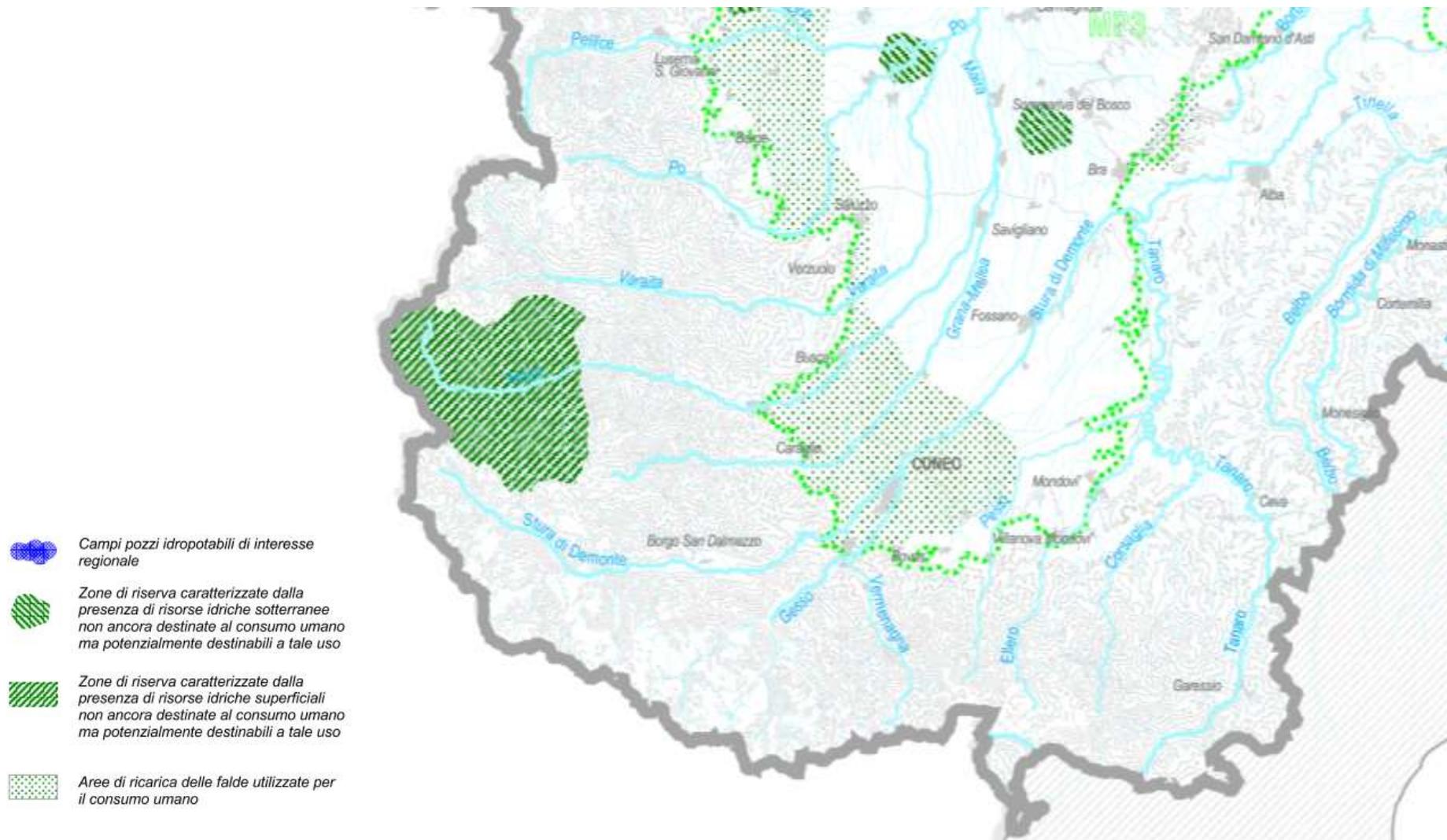


Fig. 15 – Estratto dalla tavola 8 del Piano di Tutela delle Acque della Regione Piemonte [50]: rappresentazione delle zone di riserva caratterizzate dalla presenza di risorse idriche sotterranee non ancora utilizzate per il consumo umano, ma potenzialmente destinabili a tale uso.

## **2.2.2 Regolamenti per le derivazioni di acque sotterranee**

Come prescritto dal D.Lgs. 22/2010, le installazioni a circuito aperto sono soggette alla disciplina delle concessioni a derivare che, nella Regione Piemonte, sono regolate dalla Legge Regionale 22/1996 e ss.mm.ii., dalla Legge Regionale 6/2003 che in parte l'ha aggiornata, dal DPGR 10R/2003 che descrive le procedure per le concessioni a derivare. Tra le disposizioni più importanti contenute in questi atti legislativi, vi è il divieto di costruzione di opere che consentano la comunicazione tra falda profonda e freatica (divieto che, va da sé, riguarda anche le sonde geotermiche, che devono essere cementate opportunamente), l'esclusivo uso idropotabile per le acque di falda profonda, la definizione di "uso domestico" con i limiti di portata (2 l/s) e volume annuo estratto (5000 m<sup>3</sup>/s), l'obbligo di misurazione dei volumi prelevati.

Il Regolamento 10R/2003 è stato modificato dal DPGR 1R/2014 con importanti novità che riguardano la geotermia:

- l'alimentazione di impianti geotermici per il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici viene inclusa all'interno della categoria "uso domestico", purché tali usi siano a servizio di insediamenti di tipo residenziale e non configurino un'attività economica, produttiva o con finalità di lucro;
- possono accedere alla procedura semplificata per il rilascio della concessione a derivare gli impianti open loop con portata massima estratta inferiore a 20 l/s. Si tratta di un'importante semplificazione, che riguarda impianti con potenza termica massima di circa 300÷500 kW.

## **2.3 Normativa UNI**

Nel mese di novembre 2012 sono state emanate le seguenti norme UNI:

- UNI 11466:2012 Sistemi geotermici a pompa di calore. Requisiti per il dimensionamento e la progettazione;
- UNI 11467:2012 Sistemi geotermici a pompa di calore. Requisiti per l'installazione;
- UNI 11468:2012 Sistemi geotermici a pompa di calore. Requisiti ambientali.

Allo stato attuale l'applicazione di queste norme non è obbligatoria, non essendo citate esplicitamente da alcuna legge nazionale o regionale<sup>3</sup>, tuttavia esse rappresentano un'utile guida per alcuni aspetti legati, come recitano i titoli, al dimensionamento, alla progettazione, all'installazione e allo studio degli effetti ambientali. Tra le altre normative che interessano la progettazione di pompe di calore geotermiche, si può citare la UNI TS 11300:4 (2012, [51]), che definisce i COP della pompa di calore.

Nei paragrafi che seguono si riporta una breve sintesi di quanto riportato in queste norme.

---

<sup>3</sup> Fonte: sito UNI [http://www.uni.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=153&Itemid=1462](http://www.uni.com/index.php?option=com_content&view=article&id=153&Itemid=1462) .  
La cogenza di una norma UNI può essere verificata al seguente indirizzo  
[http://www.uni.com/index.php?option=com\\_wrapper&view=wrapper&Itemid=1482](http://www.uni.com/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=1482)

### **2.3.1 UNI 11466:2012**

La norma si compone di 4 capitoli e di 11 appendici (A÷K) e tratta alcuni aspetti relativi al dimensionamento e alla progettazione degli impianti geotermici con pompa di calore. I capitoli riguardano:

- 1) Scopo e campo di applicazione: la norma si applica al dimensionamento e alla progettazione degli impianti geotermici a bassa entalpia con circuito a fluido secondario. Sono quindi esclusi gli impianti a scambio diretto, che però sono molto rari;
- 2) Riferimenti normativi: si rimanda a una serie di normative che riguardano il calcolo energetico degli edifici, gli apparecchi per la climatizzazione e i materiali utilizzati nelle sonde geotermiche;
- 3) Definizioni;
- 4) Requisiti di progettazione, dove vengono forniti:
  - a. Una panoramica delle diverse tipologie impiantistiche, con alcune indicazioni di base per la loro realizzazione e sui principali aspetti progettuali;
  - b. Valori tipici della conducibilità termica dei suoli, formule pratiche per il calcolo della conducibilità di sabbie e argille al variare del loro grado di saturazione, valori tipici di conducibilità termica dei materiali utilizzati per le sonde geotermiche;
  - c. Formule per il calcolo della temperatura nel suolo a basse profondità;
  - d. Classificazione dei metodi di dimensionamento (soluzioni analitiche, soluzioni mediante funzioni di trasferimento e soluzioni numeriche).

Le appendici riguardano:

- A) Spiegazione del metodo ASHRAE per il dimensionamento delle sonde verticali [23, 24];
- B) Metodi di dimensionamento per gli scambiatori di calore a terreno a sviluppo orizzontale, con un'impostazione concettuale simile a quella del metodo ASHRAE;
- C) Combinazione di tensioni dovuti alla presenza di carico strutturale e carico termico al terreno nel caso di pali energetici, che rappresentano il principale aspetto da tenere in conto nel dimensionamento di questi impianti per evitare conseguenze negative sulla stabilità dell'edificio;
- D) Determinazione della temperatura media del fluido termovettore delle sonde geotermiche;
- E) Estensione del campo termico in presenza di acqua di falda: viene fornita un'equazione pratica per il calcolo del disturbo termico a valle di una sonda (o un campo di sonde), in presenza di un flusso di falda, che può essere utilizzata per determinare la compatibilità di impianti vicini tra di loro o con pozzi idropotabili a valle;
- F) Metodo Carrier per il calcolo della potenza frigorifera di un edificio;
- G) Metodo mensile per il calcolo dell'energia frigorifera latente di un edificio;
- H) Esempi numerici per il calcolo delle sonde geotermiche;
- I) Test di risposta termica: vengono fornite alcune raccomandazioni (es. accuratezze massime degli strumenti di misura, misura della temperatura indisturbata del suolo...);

- J) Esempio di test di risposta termica e interpretazione;
- K) Tubazioni in plastica. Contiene un rimando alle norme UNI EN 12201-2 e UNI EN ISO 15875 sulle specifiche tecniche che i tubi delle sonde devono soddisfare in termini di resistenza alla pressione a determinate temperature (prove secondo UNI EN ISO 1167-1 e 1167-2);

### **2.3.2 UNI 11467:2012**

La normativa si compone di 7 capitoli e 6 appendici e tratta alcuni aspetti relativi all'installazione degli impianti geotermici a pompa di calore, limitatamente alla parte di scambio termico con il suolo o l'acqua di falda. I capitoli riguardano:

- 1) Scopo e campo di applicazione;
- 2) Riferimenti normativi;
- 3) Definizioni;
- 4) Metodologie di perforazione:
  - a. Raccomandazioni su protezione da contaminazioni superficiali, separazione del materiale scavato dal fluido di perforazione, attraversamento di falde artesiane;
  - b. Tecniche di perforazione ammesse;
  - c. Prescrizioni sulla perforazione a rotazione con circolazione diretta e ad aria compressa con martello di fondo foro, con indicazioni sugli scavi che hanno bisogno di essere rivestiti;
  - d. Utensili di perforazione ammessi (tricono, trilama, martello fondo foro...);
  - e. Utensili impiegabili per il riempimento della sonda (pompa a pistoncini o a vite senza fine);
  - f. Trattamento dei materiali di risulta;
  - g. Spiegazione dettagliata del procedimento di cementazione delle sonde;
  - h. Indicazioni per l'installazione di impianti a sviluppo orizzontale;
  - i. Indicazioni per l'installazione di pozzi per gli impianti a circuito aperto;
  - j. Indicazioni per l'effettuazione del Thermal Response Test;
- 5) Verifiche e messa in servizio (riferimento a UNI EN 805:2002);
- 6) Procedure di collaudo;
- 7) Procedure di smantellamento.

Le appendici riguardano:

- A) Determinazione dell'indice di turbolenza dei pozzi per acqua, così come definito da Gorla (2004 [52]). Tale prova è necessaria per determinare l'efficienza dei pozzi utilizzati per lo scambio termico con l'acqua di falda;
- B) Campi di conducibilità idraulica e tipi di rocce coerenti e incoerenti, utilizzabili come riferimento per il dimensionamento preliminare di impianti a circuito aperto;

- C) Prestazioni dei metodi di perforazione a seconda della litologia attraversata;
- D) Drenaggio, con criteri per la scelta del dreno in base alla granulometria dell'acquifero.

### **2.3.3 UNI 11468:2012**

La normativa si compone di 5 capitoli e 1 appendice e tratta alcuni aspetti relativi all'impatto ambientale degli impianti geotermici a bassa entalpia. I capitoli riguardano:

- 1) Scopo e campo di applicazione;
- 2) Riferimenti normativi;
- 3) Definizioni;
- 4) Elementi di valutazione della sostenibilità ambientale:
  - a. Definizione dello stato di fatto (caratterizzazione del serbatoio geotermico);
  - b. Fase di screening: individuazione di altri sistemi geotermici a bassa entalpia, pozzi per acqua potabile, opere in sotterraneo, sottoservizi, canali;
  - c. Modellazione numerica di flusso e trasporto con software come FEFLOW, MODFLOW, MT3D, SUTRA, SWIFT;
  - d. Elementi di giudizio di sostenibilità ambientale: valutazione/analisi di rischio, estensione dell'isoterma di variazione di temperatura 0.5°C – 1°C, valutazione della deriva termica nel tempo, calcolo dell'impronta geotermica, durabilità dell'opera, procedure di dismissione, quantificazione delle emissioni di CO<sub>2</sub> evitate, delle TEP risparmiate, dell'efficienza (COP, EER, GUE);
  - e. Monitoraggio quantitativo (temperatura e livello di falda);
  - f. Monitoraggio qualitativo: campionamenti.

Nell'appendice si riportano alcune raccomandazioni per la realizzazione di sonde geotermiche in presenza di pozzi pubblici ad uso potabile.

## **2.4 Procedura di autorizzazione degli impianti geotermici a bassa entalpia nella Regione Piemonte**

In mancanza di una legislazione nazionale in materia, ogni Regione ha regolamenti e procedure differenti per l'autorizzazione degli impianti geotermici a bassa entalpia. In Piemonte, per gli impianti open loop è necessario ottenere una concessione a derivare secondo il Regolamento Regionale 10R/2003, che recentemente è stato modificato dal DPGR 1R/2014 (si veda il Cap. 2.2). Per gli impianti a circuito chiuso, che non richiedono quindi il prelievo di fluidi dal sottosuolo, la procedura è diversa a seconda del Comune e generalmente richiede la presentazione di DIA (Denuncia di Inizio di Attività in edilizia) o di SCIA (Segnalazione Certificata di Inizio Attività).

### **3 La Provincia di Cuneo**

Lo studio delle potenzialità della geotermia a bassa entalpia, che verrà descritto nei capitoli successivi, si è basato su una accurata ricognizione delle informazioni disponibili sul territorio della Provincia di Cuneo e rilevanti ai fini della progettazione di impianti geotermici. Di seguito viene riportata una sintesi delle informazioni raccolte, che riguardano la geologia, l'idrogeologia e il clima del territorio cuneese.

#### **3.1 Geologia**

Il territorio della Provincia di Cuneo è composto per il 50.8% da montagne, per il 26.6% da colline e per il 22.6% da pianure e altipiani. Questa suddivisione può essere utilizzata per descrivere la geologia del territorio studiato e le litologie rinvenute.

Le Alpi occupano la parte occidentale e meridionale della Provincia, dalla Valle Po alla Valle Tanaro passando per i loro affluenti: Varaita, Maira e Grana in sponda destra del Po e Stura, Gesso, Vermenagna, Pesio, Ellero e Corsaglia in sponda sinistra del Tanaro. L'origine delle Alpi Occidentali è il risultato di un complesso processo geodinamico, composto da una prima fase di subduzione della Placca Europea sotto quella Adriatica, che iniziò nel tardo Cretaceo (circa 100 milioni di anni fa) e da una seconda fase di collisione nell'Eocene (56 milioni di anni fa) accompagnata dalla formazione di prismi di accrezione di diversa provenienza (placca Iberica, placca Europea, placca Adriatica). Queste caratterizzano l'attuale litologia dei terreni affioranti, che possono essere così suddivisi, da Nord verso Sud [53, 54]:

- Massiccio del Dora-Maira (DM), che rappresenta l'unità penninica più interna ed è composto prevalentemente da gneiss. In provincia di Cuneo, questo massiccio occupa la bassa valle Maira, la bassa e media valle Varaita e gran parte della valle Po;
- La Zona Piemontese è caratterizzata dalla presenza di calcescisti e serpentiniti e occupa la media valle Maira, l'alta valle Varaita, la valle Grana, parte della valle Stura e alcune piccole porzioni della bassa valle Ellero e Corsaglia;
- La zona Brianzonese è una fascia che occupa l'alta valle del Maira, la valle Stura in sinistra orografica, la valle Vermenagna, Pesio, Ellero, Corsaglia e Tanaro. Le litologie prevalenti sono gli gneiss e i calcari. A ridosso di questa zona, è presente la sottile fascia della zona Sub-Brianzonese, con affioramenti di gessi, carnioli, calcari, arenarie e argilloscisti, in cui è distinguibile l'unità di Demonte-Aisone e quella del Colle di Tenda;
- Del dominio Elvetico fa parte, nel cuneese, il Massiccio dell'Argentera, prevalentemente costituito dalle migmatiti e magmatiti erciniche che formavano la crosta continentale europea. La litologia prevalentemente è lo gneiss occhiadino e minuto, mentre sono presenti notevoli masse granitiche come quella presente a monte delle Terme di Valdieri.

La suddivisione di queste zone della fascia alpina è riportata schematicamente in Fig. 16.

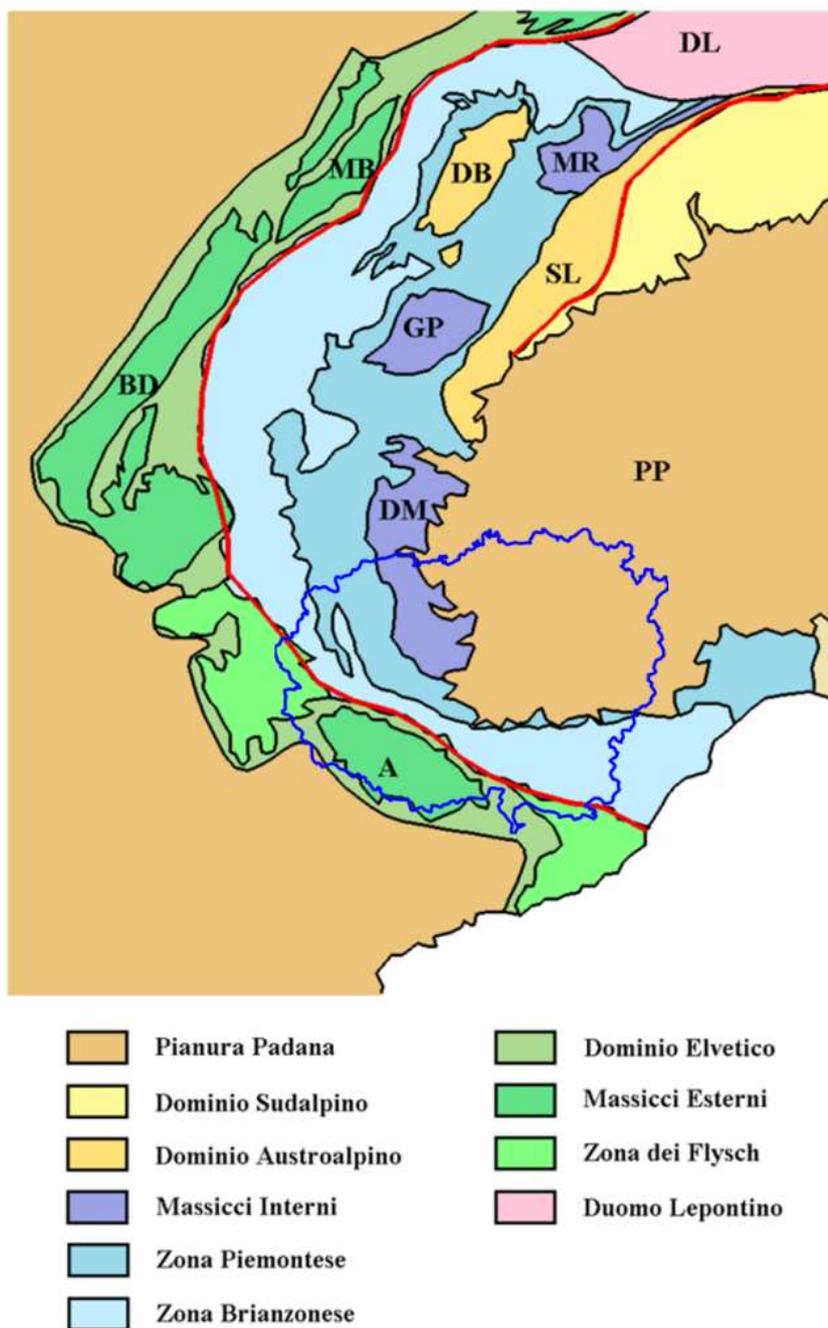


Fig. 16 – Mapa schematica del dominio Pennidico (gradazioni di blu) ed Elvetico (gradazioni di verde) nelle Alpi Occidentali. Modificata da Wikipedia [55].

La pianura cuneese fa parte della Pianura padana, che nel tardo Cretaceo (100 milioni di anni fa) era la parte frontale delle catene dell'Appennino Settentrionale e delle Alpi Meridionali in formazione. Nel Pliocene iniziò il suo riempimento, dapprima con sedimenti di origine marina (Bacino Terziario Ligure-Piemontese), in un ciclo che si chiude con il Villafranchiano Superiore (circa 2.5 milioni di anni fa), e in seguito con sedimenti di origine continentale (fluvio-glaciale e alluvionale), che ricoprono i anche i fondovalle, talvolta con coltri di grande spessore (es. fondovalle Stura fra Moiola, con spessore superiore ai 100 m). Lo spessore delle coltri sedimentarie in pianura, invece, varia dagli 80÷100 m nella zona

pedemontana attorno a Dronero fino a pochi metri di spessore nelle porzioni distali della pianura vicino al Roero. La pianura cuneese è profondamente incisa dai suoi fiumi, in particolare dallo Stura di Demonte che, come verrà spiegato più avanti, origina due pianure con caratteristiche molto differenti, denominate pianura in Sinistra Stura e in Destra Stura. Un altro corso d'acqua che incide profondamente la pianura cuneese, delimitandola a ovest, è il Pesio, che insieme allo Stura è uno dei grandi affluenti del Tanaro in sponda sinistra. L'escavazione operata dallo Stura, dal Pesio e da altri affluenti del Tanaro è frutto di un processo noto come "cattura del Tanaro", avvenuta nel Miocene (25 milioni di anni fa) a causa del sollevamento del Bacino Terziario Piemontese. Il fiume Tanaro, che allora scorreva in direzione Sud-Nord sfociando nel Po nei pressi di Carmagnola, fu deviato verso est nei pressi di Bra. Il letto del fiume subì un notevole approfondimento e, di conseguenza, tutti i suoi tributari si approfondirono. Le colline delle Langhe sono il frutto dell'escavazione operata sul Bacino Terziario Piemontese dai tributari in sponda destra, in particolare il Bormida e il Belbo e altri corsi d'acqua minori (Talloria, Cevetta). Il Roero, e in particolare l'area delle "rocche" (Pocapaglia, Santo Stefano Roero, Montà, Monteu Roero), è stato modellato dall'erosione attuata dai tributari in sponda sinistra. Come verrà mostrato più avanti nella carta geologica (Fig. 17), le colline delle Langhe e il Roero sono composte prevalentemente da marne, siltiti e argille. In Fig. 17 si riporta la carta litologica della Provincia di Cuneo, tratta dalla cartografia in scala 1:1000000 della Regione Piemonte [56], fornita da ARPA Piemonte in formato GIS<sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup> Dato in formato shapefile all'indirizzo: <http://www.arpa.piemonte.it/approfondimenti/temi-ambientali/geologia-e-dissesto/pubblicazioni/dati-geoportale#CARGEO>

Studio e mappatura delle potenzialità della geotermia a bassa entalpia nella Provincia di Cuneo

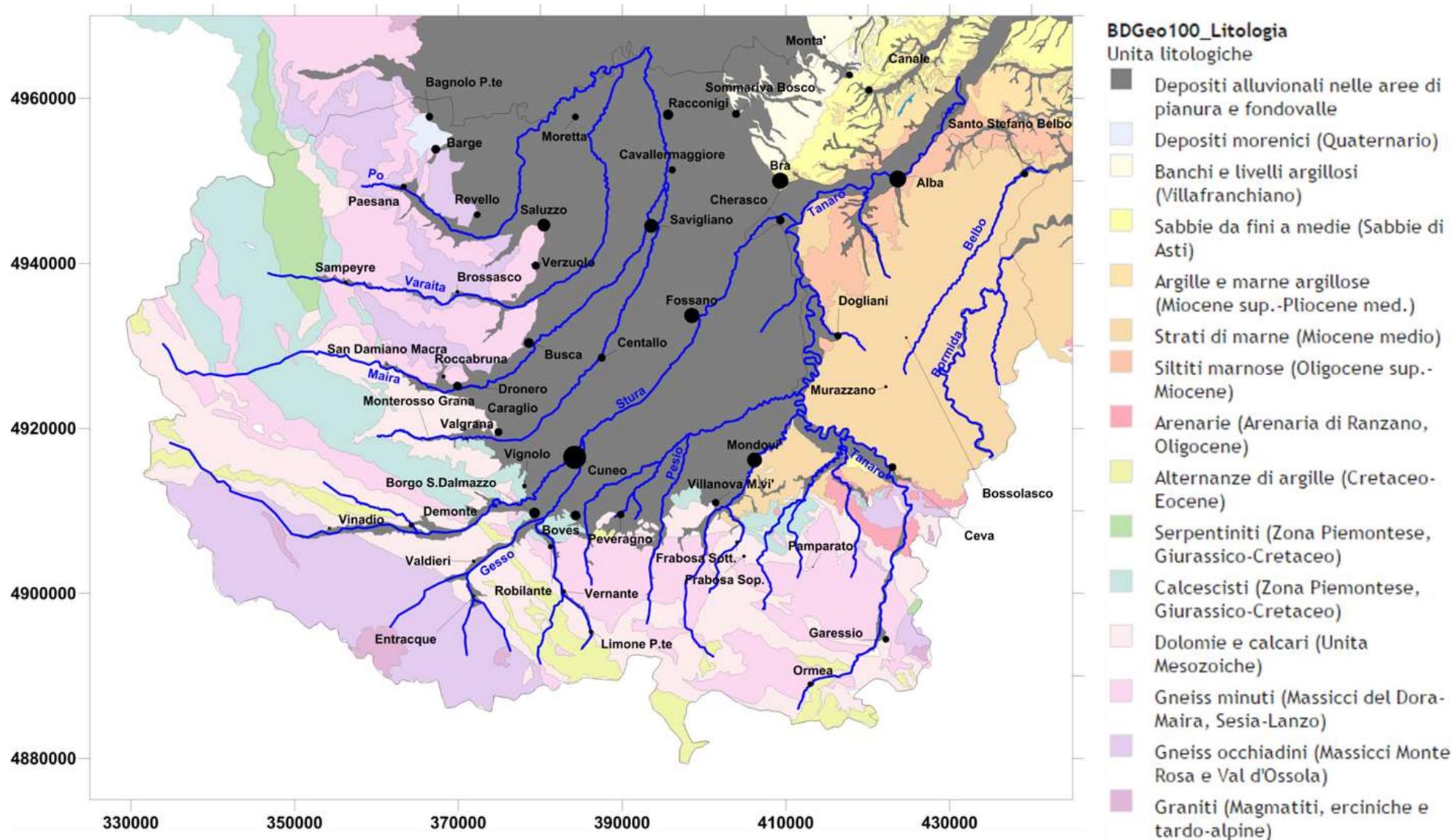


Fig. 17 – Cartografia geologica della Provincia di Cuneo (fonte: ARPA Piemonte [56])

### 3.2 Idrogeologia

Come accennato nel paragrafo precedente, la pianura cuneese è composta da sedimenti di origine alluvionale e fluvioglaciale, che ospitano acquiferi superficiali anche molto estesi. Seguendo la classificazione del Piano di Tutela delle Acque [50], si riconoscono tre grandi acquiferi superficiali Fig. 18:

- Pianura cuneese in Sinistra Stura;
- Pianura cuneese in Destra Stura;
- Fondovalle Tanaro.

L'area di Sinistra Stura è considerata in letteratura come omogenea, sebbene sia visibile la discontinuità del campo di moto della falda dovuto all'effetto drenante e alimentante dei principali corsi d'acqua (Po, Varaita, Maira, Grana).

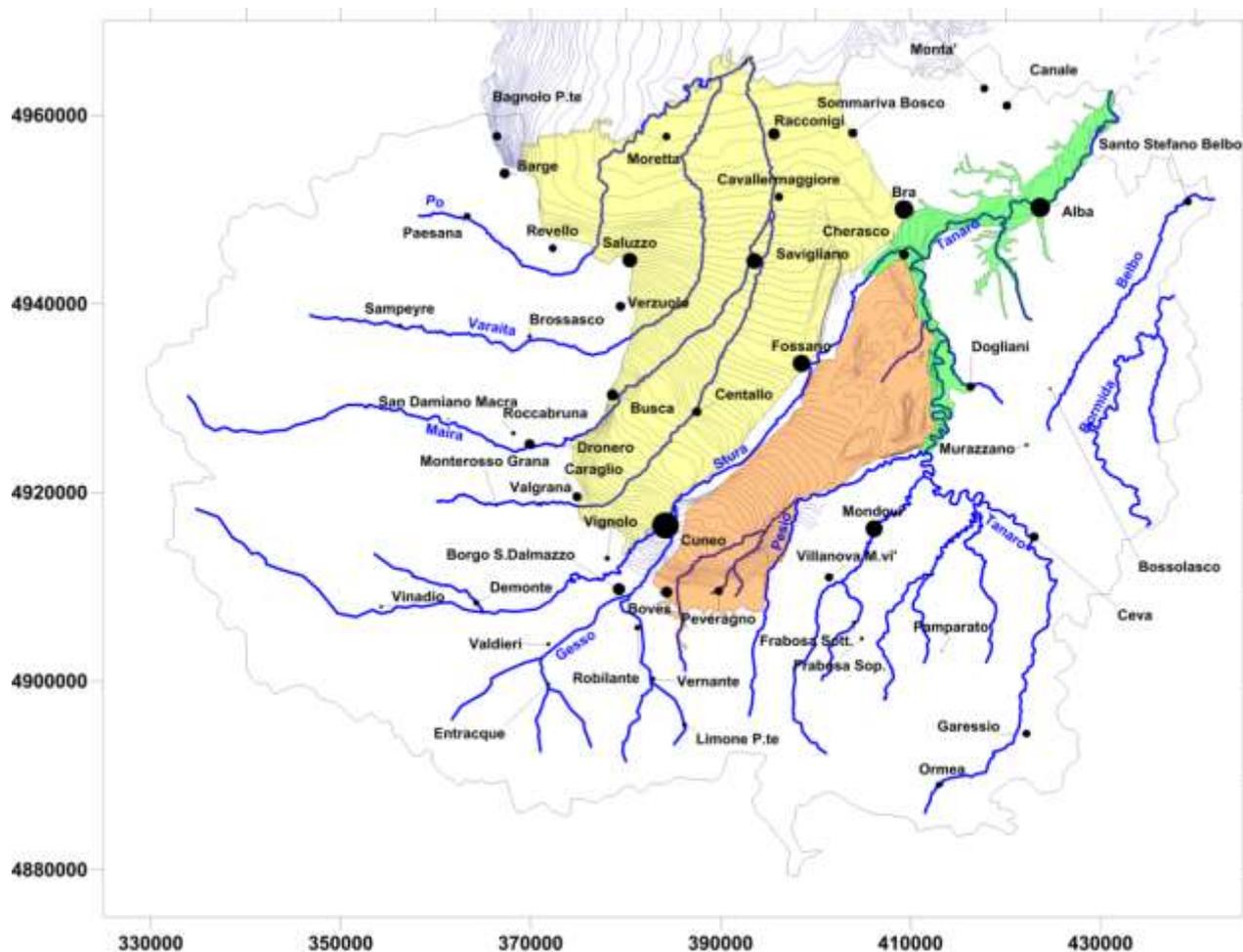


Fig. 18 – Acquiferi non confinati della pianura cuneese, secondo la suddivisione del Piano di Tutela delle Acque: pianura cuneese in Sinistra Stura (in giallo) e Destra Stura (arancione), Fondovalle Tanaro (in verde). Sono inoltre riportate le curve di livello della falda (isopiez) con equidistanza 5 m.

L'area di destra Stura è stata suddivisa in diverse aree da Civita et al. (2005 [57]), come riportato nel dettaglio di Fig. 19. L'area di Morozzo (211 km<sup>2</sup>) è quella principale e comprende gli abitati di Roccavione, Sant'Albano Stura, Carrù, Magliano Alpi, Morozzo, Peveragno e Boves. Gli spessori maggiori sono presenti

nella zona di Mellana di Boves (40 m circa). A sud dell'area di Morozzo è presente una piccola zona, attorno a Beinette (13.3 km<sup>2</sup>), nella quale è presente l'omonimo lago alimentato dalla falda e utilizzato per scopo irriguo. L'area di Cherasco (39 km<sup>2</sup>), posta a nord-est, è delimitata dal torrente Mondalavia e dall'altipiano di Salmour (22.6 km<sup>2</sup>). A sud dell'area di Cherasco si trovano quelle di Benevagienna (23.8 km<sup>2</sup>), Lequio Tanaro (6.8 km<sup>2</sup>), Piozzo (11.6 km<sup>2</sup>) e l'altipiano del Beinale (29.9 km<sup>2</sup>). In tutte queste aree la falda è sottile e poco produttiva. Il Piano di Tutela delle Acque non considera invece la parte compresa tra il Brobbio-Pesio e l'Ellero, nettamente separata dal punto di vista idrogeologico dal resto della pianura in destra Stura dal profondo alveo del torrente Pesio. Civita et al. (2005 [57]) individuano in questa zona le aree di Roracco (7.8 km<sup>2</sup>), Villanova Mondovì (22.5 km<sup>2</sup>), Pianfei (3.7 km<sup>2</sup>), San Biagio (8.4 km<sup>2</sup>) e Mondovì (34.9 km<sup>2</sup>). Queste aree sono caratterizzate in genere da spessori modesti e da un'alimentazione data prevalentemente dall'infiltrazione delle piogge. Questa area non è stata pertanto considerata nella stima delle potenzialità geotermiche con impianti a circuito aperto.

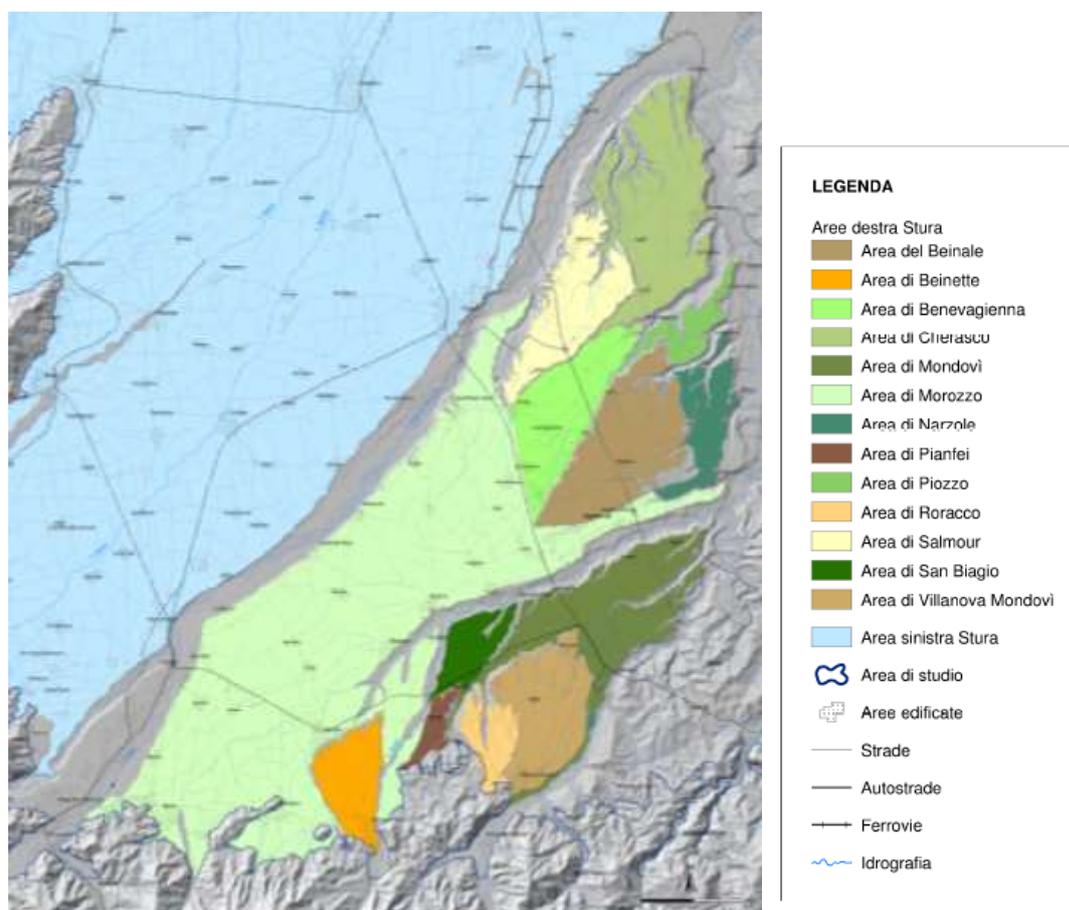


Fig. 19 – Acquiferi non confinati della Provincia di Cuneo, dettaglio sulle aree in Destra Stura estratto da Civita et al. (2005 [57]).

### 3.3 Clima

La Provincia di Cuneo è caratterizzata da un clima continentale, determinato dalla presenza della catena alpina a sud e ovest, con un lieve influsso mediterraneo che rende le estati piuttosto secche [58]. Le precipitazioni medie annue presentano una accentuata variabilità (Fig. 20), con un trend di diminuzione dalle Alpi Marittime e Liguri (900÷1200 mm/anno) e Cozie (800÷1000 mm/anno) verso la pianura e le colline delle Langhe e del Roero (700÷900 mm/anno).

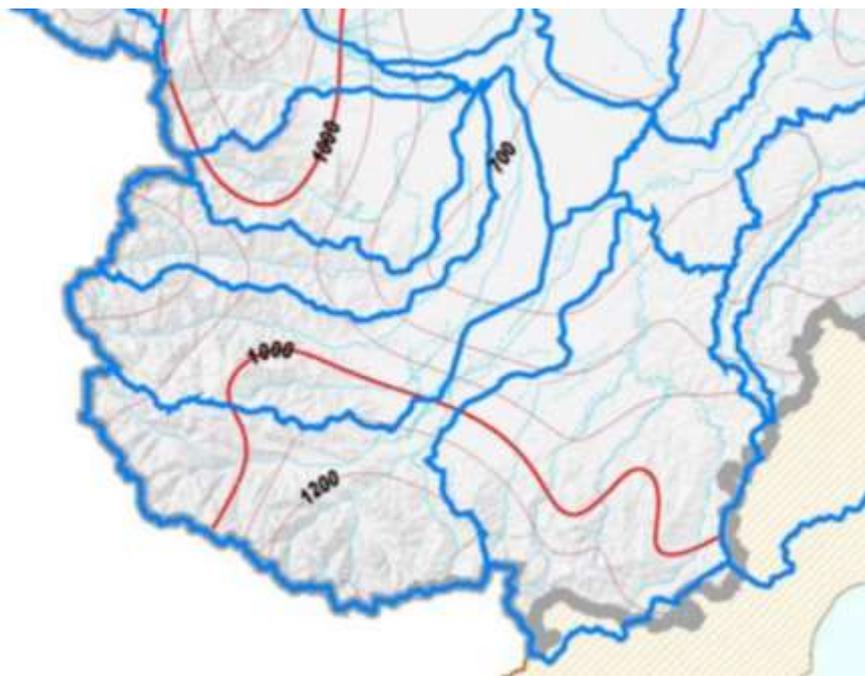


Fig. 20 – Mappa delle curve con uguale precipitazione (isoiete) media annua, misurata nel periodo 1995-2002. Fonte: Piano di Tutela delle Acque della Regione Piemonte (2007, [50]).

Un dato importante nella valutazione delle potenzialità geotermiche è la temperatura media annua dell'aria, poiché ad essa è legata la temperatura del terreno (che, a partire da una profondità di 5÷10 m, è pressoché costante). La temperatura media dell'aria risente fortemente della quota altimetrica e, pertanto, presenta una forte variabilità all'interno del territorio provinciale. Sono stati quindi analizzati i dati di 76 stazioni meteorologiche dell'ARPA Piemonte, dislocate su tutto il territorio provinciale, elaborando i dati disponibili all'interno del periodo 1990-2013 per individuare il legame tra la temperatura media annua dell'aria e la quota altimetrica. I dati rappresentati in Fig. 21 evidenziano una correlazione lineare tra le due grandezze, con valori compresi tra -3.1°C (stazione Monviso-Pontechianale, quota 3325 m s.l.m.) e 13.2°C (Castellinaldo, quota 325 m s.l.m.). Altri autori hanno individuato correlazioni differenti tra quota e temperatura media dell'aria, in alcuni casi introducendo altri parametri come la latitudine, l'esposizione del versante ecc.. Signorelli e Kohl (2004, [59]) hanno studiato la variazione di questo parametro sul territorio svizzero, ricavando la seguente correlazione con la quota  $Z$ :

$$T_{ma} = 13.47 - 1.07 \cdot 10^{-2} \cdot Z + 6.88 \cdot 10^{-6} \cdot Z^2 + 2.6 \cdot 10^{-9} \cdot Z^3$$

Eq. 7

Claps et al. (2008, [60]), analizzando la distribuzione spaziale delle temperature medie annue dell'aria sul territorio italiano, hanno dedotto la seguente correlazione:

$$T_{ma} = 43.59 - 5.4 \cdot 10^{-3} \cdot Z - 0.6601 \cdot \Phi$$

Eq. 8

dove  $\Phi$  è la latitudine rispetto al Nord, misurata in gradi decimali (es.  $44^{\circ}45'00''=44.75^{\circ}$ ).

Nel grafico in Fig. 22 si osserva che la formula di Claps et al. (2008, [60]) riproduce in modo accettabile l'andamento delle temperature medie dell'aria. La formula di Signorelli e Kohl (2004, [59]), invece, sottostima il valore della temperatura media dell'aria, probabilmente a causa del differente clima presente in Svizzera, sul quale tale modello è calibrato.

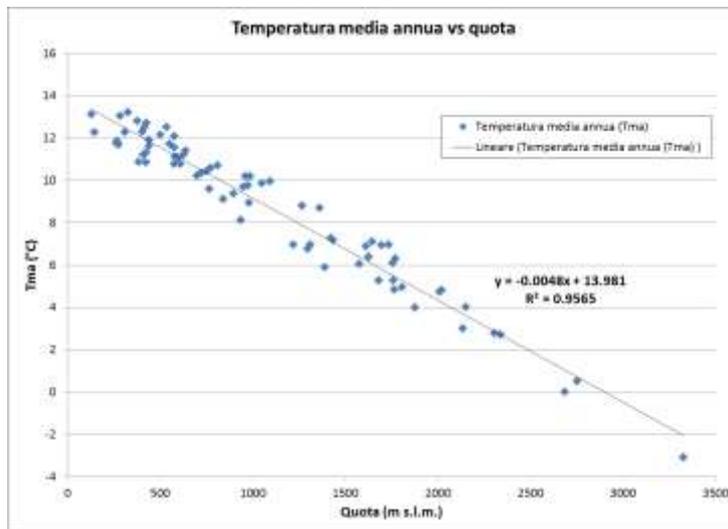


Fig. 21 – Legame tra le temperature medie annue dell'aria (ordinata) e la quota altimetrica (ascissa). Elaborazione su dati ARPA.

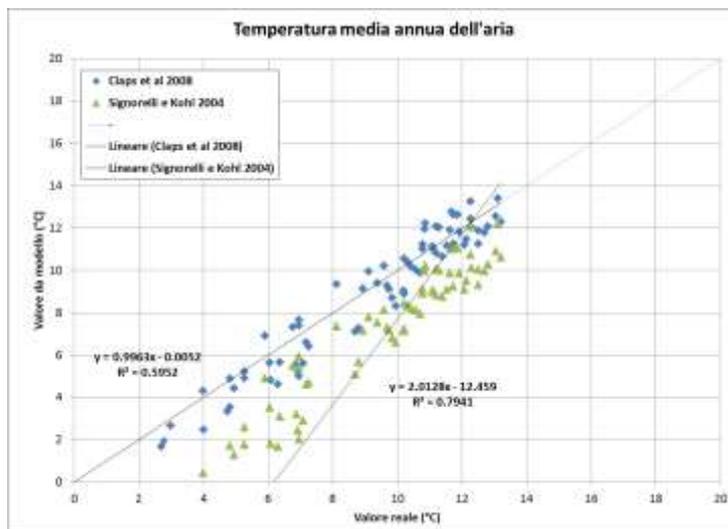


Fig. 22 – Correlazione tra i dati di temperatura media misurati nelle 76 stazioni meteo ARPA (ascissa) e i rispettivi valori calcolati con le formule di Signorelli e Kohl (2004, [59]) e di Claps et al. (2008, [60]).

## **4 Mappatura del potenziale geotermico per impianti a circuito chiuso**

La pianificazione dell'installazione di sonde geotermiche non può prescindere da un'attenta valutazione delle caratteristiche del terreno, che ne influenzano la capacità di scambio termico. Da questa capacità dipendono la lunghezza e il numero di sonde che è necessario installare per soddisfare le richieste energetiche dell'edificio. Nei piccoli impianti ad uso residenziale, infatti, il costo della trivellazione è generalmente pari a circa la metà del costo totale dell'impianto [61] e, pertanto, la profondità totale delle sonde è determinante nella valutazione economica delle pompe di calore geotermiche.

In questo capitolo viene descritta la stima e la mappatura effettuata per stimare il carico termico annuo (potenziale geotermico) estraibile con una sonda di profondità standard (100 m), tenuto conto delle proprietà termiche del terreno. I risultati della mappatura rappresentano un'indicazione che, soprattutto nella progettazione di impianti di potenza più elevata, deve essere supportata dall'acquisizione di dati in situ.

### **4.1 Scelta dei parametri per la mappatura**

L'individuazione dei parametri da mappare per la stima del potenziale geotermico deve essere basata sulla conoscenza approfondita del loro principio di funzionamento e sulla quantificazione dell'influenza di ciascun parametro sulla loro efficienza.

La sonda geotermica effettua lo scambio termico con il terreno circostante grazie alla circolazione di un fluido termovettore all'interno di un circuito idraulico chiuso. L'efficienza dello scambio termico è funzione di numerosi fattori, che possono essere così riassunti [9, 10, 20, 62]:

- nello scambio tra il fluido della sonda e il terreno, l'efficienza dipende dalla resistenza termica della sonda, a sua volta funzione delle proprietà termiche della cementazione, dei tubi, del fluido termovettore, dalla geometria della sonda [19];
- lo scambio termico nel terreno è basato principalmente sulla conduzione termica (che dipende quindi dalla conducibilità termica media lungo la profondità della sonda) e, qualora sia presente un flusso di falda, dall'advezione (velocità del flusso di falda e spessore saturo dell'acquifero) e dalla dispersione termica (che dipende dalla dispersività termica);
- la potenza termica scambiabile dipende anche dalla temperatura del terreno indisturbato: una sonda installata in un terreno può estrarre una potenza termica più ridotta rispetto a un terreno più caldo, mentre vale il viceversa per l'immissione di calore nel terreno per il raffrescamento dell'edificio.

Il trasporto di calore all'interno della sonda geotermica è quindi influenzato dalla qualità della realizzazione, mentre i parametri che influenzano il trasporto di calore nel terreno variano a seconda del sito: in una valutazione globale delle potenzialità geotermiche, quindi, si utilizzeranno valori tipici dell'efficienza della

sonda uguali su tutto il territorio mappato, mentre per i parametri sito-specifici si analizzerà la loro distribuzione spaziale.

In conclusione, quindi, i parametri che vengono analizzati per la stima delle potenzialità geotermiche sono:

- la conducibilità e la capacità termica del terreno, mediata sulla profondità tipica di una sonda geotermica, posta pari a 100m;
- la temperatura del terreno indisturbato.

Non sono invece stati analizzati, in questa sede, i parametri relativi al flusso di falda, che influenzano l'advezione e la dispersione termica. Si tratta di due meccanismi che possono incrementare notevolmente la capacità di scambio termico di una sonda [9, 20, 62-64], tuttavia non è possibile effettuare valutazioni affidabili su larga scala del loro contributo, considerata l'estrema variabilità spaziale dei parametri idrodinamici delle falde idriche attraversate dalla sonda e l'insufficiente densità dei dati a disposizione.

Dalla distribuzione spaziale della conducibilità termica e della temperatura del suolo indisturbato è stato possibile ricavare la potenzialità di scambio termico di una sonda di profondità pari a 100m, con un metodo matematico che è stato elaborato nell'ambito di questo progetto, che è stato presentato in un articolo scientifico recentemente sottomesso sulla rivista Energy, edita dalla Elsevier.

## **4.2 Stima della conducibilità termica del terreno**

La conducibilità termica del terreno (espressa in  $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) è il flusso di calore (espresso in  $\text{Wm}^{-2}$ ) che in condizioni di regime stazionario passa attraverso una parete di superficie unitaria ( $1 \text{ m}^2$ ) e spessore unitario (1 m), data una differenza di temperatura unitaria (1K) tra le due facce opposte e parallele della parete di materiale considerato. Il trasferimento è quindi dovuto esclusivamente al gradiente di temperatura che, nel caso di una sonda geotermica, si instaura dalla parete della sonda in direzione radiale. Il valore della conducibilità termica di un terreno o di una roccia dipende principalmente dalla mineralogia, dalla porosità, dalla presenza di acqua all'interno dei pori. La Carta Geologica del Piemonte classifica il territorio regionale in 15 diverse litologie per le quali, in Tab. 2, sono riportati i valori di conducibilità e capacità termica da dati di letteratura. Le litologie più conduttive sono le rocce magmatiche (riolite, granito, diorite, gabbro, basalto) e metamorfiche (quarzite, anfibolite, gneiss, marmo, micascisti), seguite dalle rocce sedimentarie (arenaria, calcare, marne, siltiti, argilliti). Per i terreni sedimentari (argille, limi, sabbie, ghiaie) si osservano valori molto differenti a seconda che il materiale sia secco o saturo, mentre la granulometria ha un'importanza molto inferiore.

Tab. 2 – Valori di conducibilità termica assegnati a ciascuna tipologia litologica.

Descrizione litologia	Conducibilità termica [W/(mK)]	Capacità termica [MJ]/(m <sup>3</sup> K)]	Fonte
Depositi alluvionali (saturi)	2.4	2.5	VDI 4640
Depositi alluvionali (secchi)	0.5	1.5	VDI 4640
Depositi morenici (saturi)	2.4	2.5	VDI 4640
Depositi morenici (secchi)	0.5	1.5	VDI 4640
Banchi e livelli argillosi (Villafranchiano)	1.8	2.5	Di Sipio et al., 2014
Sabbie da fini a medie (Sabbie di Asti)	1.8	2.5	VDI 4640
Argille e marne (Miocene sup.-Pliocene med.)	2.1	2.5	VDI 4640
Strati di marne (Miocene medio)	2.3	2.25	VDI 4640
Siltiti marnose (Oligocene sup.-Miocene)	2.1	2.25	VDI 4640
Arenarie (A. di Ranzano, Oligocene)	2.3	2.2	VDI 4640
Alternanze di argille (Cretaceo-Eocene)	1.8	2.5	VDI 4640
Serpentiniti (Zona Piemontese, Giurassico-Cretaceo)	2.5	2.1	VDI 4640
Calcescisti (Zona Piemontese, Giurassico-Cretaceo)	2.5	2.1	Di Sipio et al., 2014 [65]
Dolomie e calcari (Unità mesozoiche)	2.7	2.25	VDI 4640
Gneiss minuti (Massicci del Dora-Maira, Sesia-Lanzo)	2.9	2.1	VDI 4640
Gneiss occhiadini (Massicci Monte Rosa e Val d'Ossola)	2.9	2.1	VDI 4640
Graniti (Magmatiti, erciniche e tardo-alpini)	3.4	2.5	VDI 4640

Sulla base di queste considerazioni, è stata effettuata una stima della conducibilità termica media del terreno fino a una profondità di 100m, con due metodi diversi:

- per le rocce, è stata assegnata direttamente la conducibilità termica corrispondente alla litologia, poiché in questo caso le condizioni di saturazione hanno un'importanza molto limitata;
- per i terreni sedimentari, è stata calcolata una media pesata della conducibilità termica tra la zona non satura (con spessore pari alla soggiacenza della falda idrica superficiale e conducibilità pari a 0.5 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>) e zona satura (il restante spessore, fino a 100m di profondità, al quale è stato assegnato un valore di 2.4 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>):

$$\lambda_{media} = \frac{\lambda_{secco} \cdot sogg + \lambda_{sat}(100 - sogg)}{100}$$

Eq. 9

Le litologie in affioramento e i relativi confini sono stati ricavati dalla cartografia geologica a scala 1:100000 della Regione Piemonte [56], fornita da ARPA Piemonte in formato GIS<sup>5</sup> e riportata in Fig. 17. Per quanto riguarda i terreni sedimentari, che nella Provincia di Cuneo hanno origine alluvionale, non si è tenuto conto del basamento roccioso sottostante.

La mappa della conducibilità termica risultante dalle elaborazioni effettuate indica che:

- le litologie più conduttive sono i calcari, gli gneiss e i calcescisti (2.5÷2.9 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>) presenti nelle Alpi Marittime e Cozie, in particolare sui versanti. Una fascia che si estende dalla valle Stura alla valle

<sup>5</sup> Dato in formato shapefile all'indirizzo: <http://www.arpa.piemonte.it/approfondimenti/temi-ambientali/geologia-e-dissesto/pubblicazioni/dati-geoportale#CARGEO>

Vermenagna e all'alta Valle Tanaro è ricoperta da argille del Cretaceo-Eocene, meno conduttive ( $1.8 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ );

- nei fondovalle sono presenti in genere delle pianure alluvionali piuttosto strette, nelle quali si concentra buona parte della popolazione dell'area montana. I flussi di falda, a causa delle forti pendenze degli alvei fluviali e dei versanti, sono caratterizzati da forti velocità e possono incrementare notevolmente il potenziale geotermico. Tali situazioni potranno essere valutate con analisi di maggiore dettaglio, da condurre nei centri abitati più importanti delle valli, con interessanti opportunità per lo sfruttamento della geotermia a bassa entalpia anche ad alta quota;
- nella pianura cuneese in Sinistra Stura, dove risiede buona parte degli abitanti della Provincia, presenta una conducibilità termica variabile nell'intervallo  $1.2 \div 2.3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ , con valori più bassi nella fascia pedemontana di Busca, Dronero e Caraglio ( $1.2 \div 1.5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) a causa della elevata soggiacenza di falda (fino a 70 m) che fa sì che una parte rilevante della sonda tipo (lunghezza 100 m) si trovi nella zona non satura. Valori leggermente più elevati ( $1.6 \div 1.7 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) si registrano sull'altipiano tra Fossano e Marene, mentre nel resto della pianura (centri principali: Centallo, Savigliano, Saluzzo, Racconigi, Sommariva Bosco) si stimano valori di conducibilità termica superiori a  $2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ . L'acquifero superficiale è piuttosto spesso ( $80 \div 100 \text{ m}$  nell'area pedemontana, che si riducono fino a 10 m nei settori più distali della pianura), con elevata trasmissività (nell'ordine di  $10^{-2} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ) e forte gradiente ( $2 \div 10 \text{ m/km}$ ): il flusso di falda che si sviluppa può fornire un contributo notevole al miglioramento delle performance di scambio termico, ma deve essere stimato sulla base di valori puntuali affidabili, che non è possibile fornire per tutta l'area di pianura con i dati a disposizione;
- nella pianura cuneese in Destra Stura i valori di conducibilità termica sono compresi tra 1.4 e  $2.3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ . I valori più bassi si riscontrano nei Comuni di Cuneo, Boves, Peveragno, Mondovì, Rocca de' Baldi, Benevagienna e Salmour ( $1.4 \div 2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ), mentre altrove i valori sono compresi tra 2 e  $2.3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ . Anche nella pianura in Destra Stura è presente un flusso di falda piuttosto forte, con una trasmissività nell'ordine di  $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ , un gradiente di  $5 \div 10 \text{ m/km}$  e uno spessore di  $5 \div 20 \text{ m}$ . L'acquifero presenta forti disomogeneità delle caratteristiche idrauliche e degli andamenti dei livelli di falda, che devono essere attentamente valutati per tenere conto dell'advezione nel dimensionamento degli impianti;
- l'intero territorio delle Langhe e l'area collinare tra i torrenti Ellero, Corsaglia e Maudagna, (comprendente gli abitati di Briaglia, Vicoforte, Monastero di Vasco, San Michele Mondovì e Torre Mondovì), è caratterizzato da una litologia prevalentemente marnosa con una conducibilità di  $2.1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ;

- il fondovalle Tanaro, che si sviluppa nel tratto di fiume da Ceva fino al confine con la Provincia di Asti, è una pianura alluvionale piuttosto sottile (circa 10m di spessore) e con soggiacenza molto ridotta (perlopiù inferiore a 5 m). La conducibilità termica è di circa  $2 \div 2.3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ;
- il Roero presenta una litologia marnosa nella parte meridionale (Govone, Priocca, Castellinaldo, Magliano Alfieri, Guarene, Piobesi), con una conducibilità stimata di  $2.1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ , mentre nella parte centrale e settentrionale (Veza d'Alba, Montà, Canale, Sommariva Perno, Pocapaglia ecc.) si rinvencono le sabbie d'Asti e le argille del Villafranchiano, con una conducibilità termica stimata leggermente inferiore ( $1.8 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ).

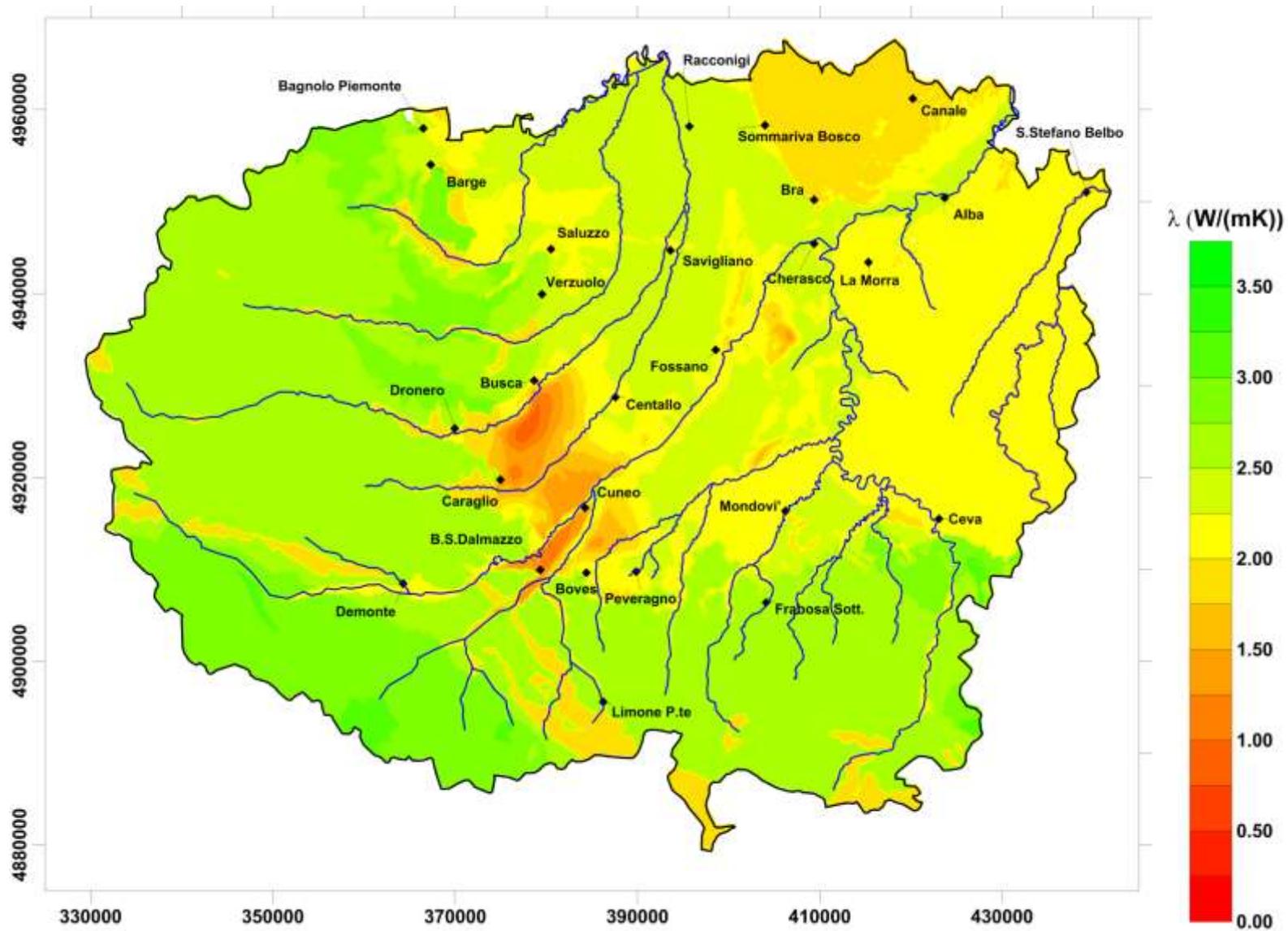


Fig. 23 – Valori di conducibilità termica nei primi 100 m di profondità, stimata a partire dalla Carta Geologica e dai dati di soggiacenza di falda.

### 4.3 Stima della temperatura del terreno

Le pompe di calore geotermiche si basano sullo sfruttamento dell'inerzia termica del terreno, che fa sì che la sua temperatura sia pressoché costante durante l'anno a profondità relativamente ridotte (5÷10 m). I fattori che influenzano la temperatura del terreno sono:

- temperatura dell'aria e andamento durante l'anno;
- flusso geotermico proveniente dagli strati più profondi della crosta terrestre;
- sorgenti termiche che, all'interno delle città, portano a un innalzamento anche di alcuni gradi detto isola termica [66-68];
- precipitazioni, in particolare nevose;

La misura della temperatura del terreno può essere effettuata all'interno di pozzi o sonde geotermiche, ricavando una serie di dati puntuali che possono essere interpolati spazialmente. Nel 2009, ARPA Piemonte condusse uno studio geotermometrico sui piezometri della rete di monitoraggio qualitativo della falda idrica superficiale [69], dal quale risultano temperature dell'acqua di falda comprese fra 11 e 14°C nel territorio cuneese (Fig. 24), con un unico dato anomalo (outlier) nel piezometro di Caramagna Piemonte con temperature superiori a 15°C. I dati di dettaglio riportati in

Tab. 3 e Fig. 25 mostrano una correlazione inversa tra la temperatura dell'acqua di falda e la quota topografica. I valori più bassi (11÷12 °C) si osservano nella fascia pedemontana, mentre i valori più alti si osservano nella parte nord della pianura, a quote più basse.

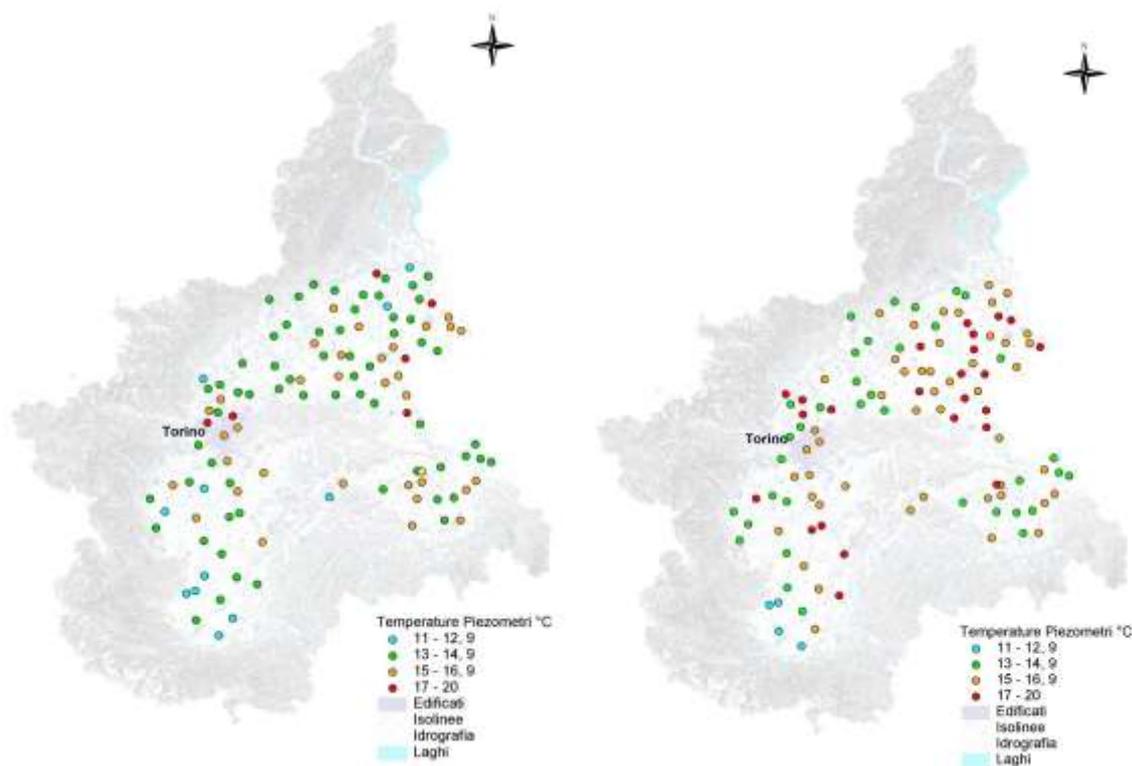


Fig. 24 – Studio geotermometrico ARPA Piemonte: prima campagna (a sx) e seconda campagna (a dx) condotta nel 2008 [69].

Tab. 3 –Temperature della falda idrica superficiale in alcuni piezometri della pianura cuneese, rilevate nello studio geotermometrico condotto da ARPA Piemonte [69].

Luogo	x UTM	y UTM	Quota	T <sub>min</sub>	T <sub>max</sub>	T <sub>med</sub>
Barge	368515	4954430	333	12.89	13.27	13.08
Beinette	392228	4913578	486	11.01	11.05	11.03
Bene Vagienna	406625	4933087	345	14.01	14.03	14.02
Bra	408535	4949031	275	15.32	15.32	15.32
Busca	379961	4929455	489	11.30	11.70	11.50
Caramagna Piemonte	399941	4960070	255	13.62	16.49	15.06
Cuneo	383550	4919411	515	11.10	12.70	11.90
Fossano (P4)	398869	4935731	355	13.23	13.71	13.47
Fossano (P23)	392630	4927079	410	12.85	13.05	12.95
Moretta	383615	4958095	252	13.03	13.10	13.07
Morozzo	397447	4920151	424	12.04	12.08	12.06
Racconigi	396181	4958533	257	12.95	13.23	13.09
Savigliano	393138	4944505	312	12.81	13.25	13.03
Scarnafigi	386505	4949465	289	12.88	13.06	12.97
Tarantasca	383355	4930476	450	11.20	11.20	11.20
Vottignasco	386855	4936185	387	11.70	11.83	11.77

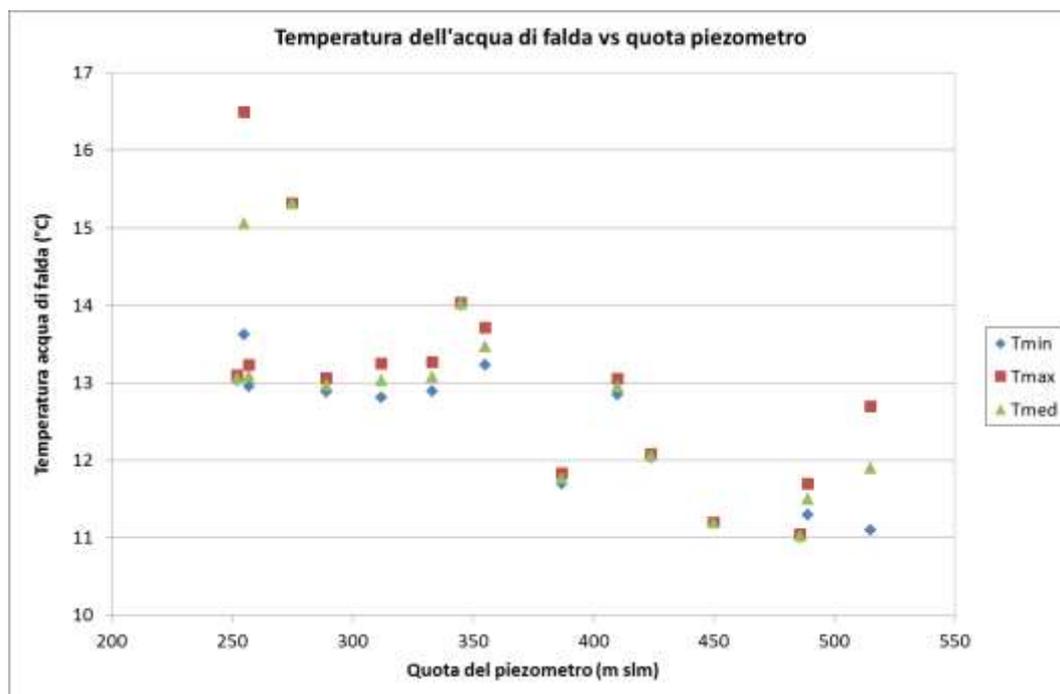


Fig. 25 – Correlazione tra le temperature minime, massime e medie dell'acqua di falda e la quota topografica [69].

La correlazione tra quota e temperatura dell'acqua di falda conferma quanto riportato in diverse fonti bibliografiche [59, 70]. Poiché vaste aree del territorio indagato sono prive di misurazioni di temperatura, è stato adottato il metodo proposto da Signorelli e Kohl (2004 [59]), che correla la temperatura del terreno alla quota topografica:

$$T_0 = 15.23 - 1.08 \cdot 10^{-2} \cdot Z + 5.61 \cdot 10^{-6} \cdot Z^2 + 1.5 \cdot 10^{-9} \cdot Z^3$$

Eq. 10

Il metodo è stato sviluppato per la mappatura delle temperature dell'aria e del terreno (misurate in sonde geotermiche) su un intervallo di quote che variano tra 197 e 1705 m s.l.m.. Secondo gli autori, l'equazione fornita non è affidabile a quote superiori ai 1500m s.l.m., poiché sottostima nettamente le temperature del terreno: ciò è dovuto all'effetto della copertura nevosa che, per un lungo periodo dell'anno, isola termicamente il terreno dall'aria, un effetto che non è tenuto in conto da questa formula. Seguendo questa indicazione, sono state escluse tutte le aree con quote superiori, che rappresentano una parte significativa del territorio (circa il 25%) ma una minima parte della popolazione, che si stima inferiore all'1%: i Comuni con capoluogo sopra i 1500m s.l.m. sono infatti appena 4 (Argentera, Elva, Pontechianale e Bellino, con una popolazione totale di 477 abitanti), mentre piccoli insediamenti sono presenti in altri Comuni montani.

Nel precedente Capitolo 3.3 è stato evidenziato come la formula empirica proposta da Signorelli e Kohl (2004 [59]) per la temperatura media annua dell'aria (Eq. 7) sottostimi i valori reali misurati in Provincia di Cuneo. E' ipotizzabile che ciò avvenga anche per le temperature del terreno, e che quindi l'utilizzo della formula di Signorelli e Kohl (Eq. 10) sia cautelativo nel dimensionamento di impianti di riscaldamento a sonde geotermiche.

In Fig. 26 si riporta la mappa delle temperature del suolo indisturbato calcolate con questo metodo e, in Tab. 4, i valori per i Comuni con popolazione non inferiore a 1000 abitanti. In base alla popolazione dei Comuni, si può affermare che circa il 90% della popolazione della Provincia di Cuneo vive in zone dove la temperatura del terreno è di 11÷14°C, che rappresentano un intervallo ottimale sia per l'utilizzo di riscaldamento, sia per il condizionamento, sia – a maggior ragione – per la combinazione di entrambi gli utilizzi, che rappresenta la modalità ottimale di sfruttamento della risorsa geotermica a bassa entalpia.

Tab. 4 –Valori della temperatura del suolo indisturbato, stimata con il metodo di Signorelli e Kohl (2004 [59]), nei Comuni della Provincia di Cuneo con popolazione superiore a 1000 abitanti).

Comune	Abitanti	Quota	T0 [°C]
CUNEO	55697	534	10.83
Alba	30925	172	13.53
Bra	29298	290	12.53
Fossano	24734	375	11.89
Mondovì	22277	395	11.75
Savigliano	21142	320	12.30
Saluzzo	16834	340	12.15
Borgo San Dalmazzo	12294	636	10.24
Busca	10217	500	11.05
Boves	9801	590	10.50
Cherasco	8802	288	12.55
Barge	7878	372	11.91

Comune	Abitanti	Quota	T0 [°C]
Dronero	7202	622	10.32
Caraglio	6754	575	10.59
Verzuolo	6445	420	11.57
Sommariva del Bosco	6346	298	12.47
Bagnolo Piemonte	6102	365	11.96
Villanova Mondovì	5814	526	10.88
Ceva	5811	376	11.88
Canale	5678	193	13.34
Peveragno	5505	570	10.62
Cervasca	4888	578	10.57
Dogliani	4803	295	12.49
Montà	4745	316	12.33

Studio e mappatura delle potenzialità della geotermia a bassa entalpia nella Provincia di Cuneo

Comune	Abitanti	Quota	T0 [°C]
Carrù	4481	364	11.97
Revello	4212	351	12.07
Moretta	4208	262	12.76
Santo Stefano Belbo	4074	170	13.55
Bernezzo	3929	575	10.59
Manta	3712	404	11.68
Chiusa di Pesio	3682	575	10.59
Diano d'Alba	3558	496	11.07
Narzole	3491	325	12.26
Guarene	3484	360	12.00
Neive	3405	308	12.39
Garessio	3340	621	10.33
Pocapaglia	3336	381	11.85
Beinette	3312	491	11.10
Vicoforte	3131	598	10.46
Marene	3057	310	12.38
Caramagna Piemonte	3045	257	12.80
Sanfrè	2985	272	12.68
Villafalletto	2939	431	11.50
Rocavione	2847	646	10.19
Sommariva Perno	2847	389	11.79
Paesana	2837	614	10.37
Piasco	2815	480	11.17
Santa Vittoria d'Alba	2758	346	12.10
La Morra	2751	513	10.96
Genola	2662	345	12.11
Vignolo	2517	630	10.28
Sanfront	2516	490	11.11
Sant'Albano Stura	2417	378	11.87
Cortemilia	2381	247	12.88
Robilante	2356	686	9.98
Magliano Alpi	2273	403	11.69
Monticello d'Alba	2271	320	12.30
Pianfei	2257	503	11.03
Veza d'Alba	2238	353	12.05
Trinità	2218	383	11.83
Govone	2196	301	12.45
Scarnafigi	2151	296	12.49
Roccaforte Mondovì	2124	574	10.60
Morozzo	2092	431	11.50
Ceresole Alba	2091	301	12.45

Comune	Abitanti	Quota	T0 [°C]
Corneliano d'Alba	2081	204	13.25
Monforte d'Alba	2081	480	11.17
Envie	2065	327	12.25
Magliano Alfieri	2049	328	12.24
Demonte	2045	780	9.51
Priocca	2027	253	12.83
Tarantasca	2012	451	11.36
San Michele Mondovì	2008	444	11.41
Farigliano	1751	263	12.75
Ormea	1695	736	9.72
Rocca de' Baldi	1693	414	11.61
Monteu Roero	1642	395	11.75
Roccabruna	1586	700	9.90
Roddi	1552	284	12.58
Frabosa Sottana	1513	641	10.22
Villar San Costanzo	1497	609	10.39
Venasca	1483	549	10.74
Casalgrasso	1481	240	12.94
Limone Piemonte	1467	1009	8.50
Margarita	1448	448	11.38
Lagnasco	1424	353	12.05
Santo Stefano Roero	1398	330	12.22
Monasterolo di Savigliano	1376	291	12.53
Saliceto	1371	389	11.79
Castelletto Stura	1352	447	11.39
Mango	1341	521	10.91
Monastero di Vasco	1323	508	10.99
Piobesi d'Alba	1268	194	13.33
Polonghera	1212	245	12.90
Vernante	1198	799	9.42
Cardè	1147	258	12.79
Brossasco	1111	606	10.41
Baldissero d'Alba	1089	380	11.85
Rifreddo	1071	433	11.48
Sampeyre	1056	976	8.64
Niella Tanaro	1053	371	11.92
Bagnasco	1039	483	11.15
Novello	1024	471	11.23
Piozzo	1011	327	12.25

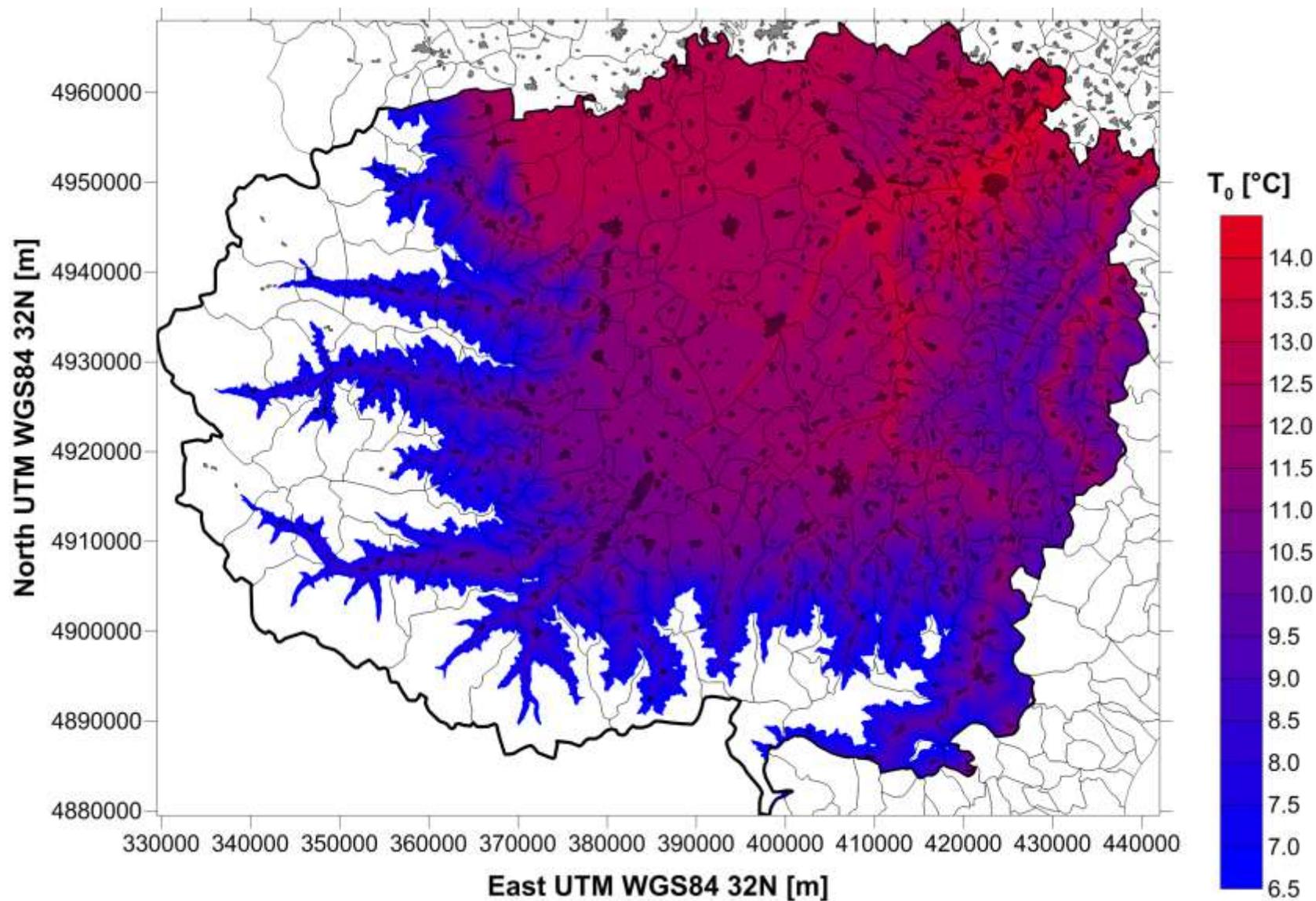


Fig. 26 – Mappa della temperatura del suolo indisturbato, stimata a partire dal DTM della Regione Piemonte con il metodo di Signorelli e Kohl (2004 [59]).

#### 4.4 Stima della potenzialità geotermica closed-loop (metodo G.POT.)

Come riportato nei paragrafi precedenti, i due fattori cruciali per il dimensionamento e per l'efficienza dei sistemi geotermici closed-loop sono la conducibilità termica e la temperatura indisturbata del terreno, mentre la capacità termica ha un'influenza limitata se si considera la sua ridotta variabilità.

Il flusso di falda può fornire un contributo molto importante al miglioramento delle performance, ma può essere tenuto in conto solo se sono disponibili dati affidabili, per evitare il rischio di un sottodimensionamento dell'impianto. Per questo motivo, in questo studio delle potenzialità geotermiche è stato ipotizzato uno scambio termico puramente conduttivo tra la sonda e il terreno circostante.

Il dimensionamento delle sonde geotermiche dipende inoltre dalla modalità operativa dell'impianto, ovvero se è per riscaldamento, per raffrescamento o per entrambi gli utilizzi. Solitamente, l'utilizzo in entrambe le modalità riduce lo squilibrio nel bilancio termico del terreno e, conseguentemente, sia l'impatto termico sia la lunghezza delle sonde che è necessario installare. Nel caso della Provincia di Cuneo, è stato considerato un utilizzo esclusivo per riscaldamento, come è realistico ipotizzare per la maggior parte delle utenze residenziali.

In letteratura esistono numerosi metodi per la stima delle potenzialità di scambio termico, tra i quali forse il più noto è il metodo fornito dalla normativa tedesca VDI 4640 [71] per gli impianti di potenza inferiore a 30 kW. Per ciascuna litologia, la normativa fornisce degli intervalli di potenza termica media per unità di lunghezza della sonda, secondo due valori di utilizzo annuo (1800 h/a e 2400 h/a) che possono essere paragonati alle zone climatiche "E" ed "F" dell'ENEA. Ad esempio, in un terreno sedimentario saturo è possibile scambiare 65÷80 W/m per 1800 h/a, che si riducono a 55÷65 W/m per 2400 h/a. Ciò significa che, data un'abitazione con un consumo termico di 12 MWh/anno, la potenza scambiata è pari a 6.67 kW con un utilizzo di 1800 h/a e di 5 kW per 2400 h/a: le rispettive lunghezze di sonda necessarie sono di 83÷103m nel primo caso (che corrisponde a un utilizzo più breve, ma più intenso) e di 77÷91m nel secondo caso.

Una limitazione di questo metodo è quella di non tenere conto della temperatura del terreno indisturbato che, come riportato nel paragrafo precedente, può variare molto nel territorio considerato. Per questo motivo, nell'ambito di questo progetto è stato sviluppato il metodo G.POT. (Geothermal POTential) per la stima del potenziale geotermico, che è descritto nel dettaglio in un recente articolo di Casasso e Sethi [72]. Il metodo G.POT. permette di calcolare la quantità di calore che è possibile estrarre dal terreno con una sonda di profondità  $L$ , in funzione dei seguenti parametri (sintetizzati in Fig. 27):

- proprietà termiche del terreno: conducibilità termica ( $\lambda$ ), capacità termica ( $\rho c$ ), temperatura indisturbata ( $T_0$ ). Queste proprietà fisiche sono state mappate e presentate nei paragrafi precedenti;
- proprietà della sonda: raggio della sonda  $r_b$ , numero ( $n$ ) e raggio ( $r_p$ ) dei tubi, conducibilità termica del riempimento della sonda ( $\lambda_{bf}$ );

- parametri operativi: durata della stagione di riscaldamento o raffreddamento ( $t_c$ ) e temperatura minima del fluido termovettore ( $T_{lim}$ ).

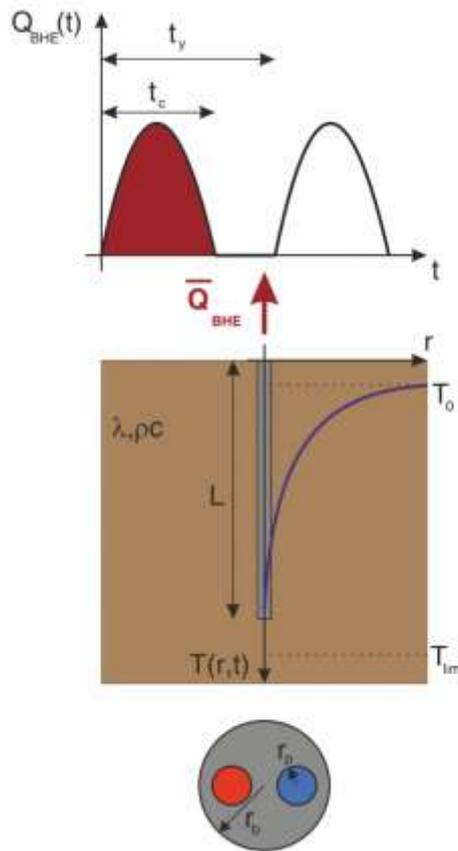


Fig. 27 – Parametri del modello G.POT utilizzato per la stima del potenziale geotermico.

Il potenziale geotermico  $\bar{Q}_{BHE}$  (MWh/anno) è espresso dalla seguente formula:

$$\bar{Q}_{BHE} = \frac{0.003504 \cdot (T_0 - T_{lim}) \cdot \lambda \cdot L \cdot t'_c}{g_1 \cdot \log(r_{p,eq}^2 / (4\alpha t_c)) + g_2 \cdot t'_c + g_3 + \lambda'_{bf} \cdot \log(r_b / r_{p,eq})}$$

Dove:

- $T_0$  (°C) è la temperatura del terreno indisturbato;
- $T_{lim}$  (°C) è la temperatura minima imposta per il fluido termovettore, che in questo caso è stata imposta pari a  $T_{lim} = -2^\circ C$ ;
- $L$  (m) è la profondità della sonda geotermica, posta pari a  $L = 100$  m;
- $\lambda$  ( $Wm^{-1}K^{-1}$ ) è la conducibilità termica del terreno (media sulla profondità della sonda);
- $\alpha = \lambda / (\rho c)$  ( $m^2s^{-1}$ ) è la diffusività termica del terreno, pari al rapporto tra la conducibilità termica  $\lambda$  e la capacità termica  $\rho c$  ( $Jm^{-3}K^{-1}$ );
- $r_b$  (m) è il raggio della sonda geotermica. Nello studio è stato imposto un valore  $r_b = 0.075$  m;

- $r_{p,eq} = \sqrt{n} \cdot r_p$  (m) è il raggio equivalente dei tubi della sonda, dove  $n$  è il numero di tubi della sonda ( $n = 2$  per una sonda a U singola,  $n = 4$  per una sonda a U doppia). In questo studio è stata ipotizzata una sonda a doppia U con raggio  $r_p = 0.016$  m, pertanto  $r_{p,eq} = 0.032$  m;
- $t_c$  (s) è la durata del ciclo di carico dell'impianto (stagione di riscaldamento o di raffrescamento). Per questo studio, è stato imposto un valore  $t_c = 183$  d (stagione di riscaldamento dal 15 ottobre al 15 aprile);
- $t'_c$  (adimensionale) è il rapporto tra  $t_c$  e la durata di un anno. In questo studio è stato quindi imposto un valore  $t'_c = \frac{183 \text{ d}}{365 \text{ d}} = 0.501$ ;
- $g_1 = -0.998$ ,  $g_2 = 1.397$  e  $g_3 = -0.880$  sono i coefficienti del modello semplificato di trasporto del calore, che fornisce il valore della massima alterazione termica del terreno sulla parete della sonda dato un carico termico annuo unitario (1 kWh/anno);
- $\lambda'_{bf} = \frac{\lambda - \lambda_{bf}}{\lambda_{bf}}$  (adimensionale) è un coefficiente che esprime la differenza relativa tra la conducibilità termica del terreno ( $\lambda$ ) e quella del grout geotermico ( $\lambda_{bf} = 2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ );

In Fig. 28 è rappresentata la mappa del potenziale geotermico risultante. Le aree di pianura sono quelle che presentano i valori maggiori di potenziale termico, pari a circa 10÷12 MWh/anno. Ciò è dovuto alla presenza di un terreno di conducibilità termica medio-alta (2÷2.3  $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ), a causa della ridotta soggiacenza di falda (inferiore a 15 m) che fa sì che gran parte della sonda sia installata in un terreno saturo, e alla temperatura del terreno più elevata (12÷14°C). In alcune aree della Pianura, come la zona pedemontana tra Dronero, Busca e Boves e la pianura tra Pesio ed Ellero, la falda superficiale presenta una elevata soggiacenza (da 30 a 70 m circa), pertanto il terreno è secco su gran parte dello spessore attraversato dalla sonda e la conducibilità termica è ridotta (circa 1.2÷1.5  $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ). Inoltre, la temperatura del terreno è inoltre più bassa (10÷12°C) rispetto al resto della pianura, a causa della maggiore quota altimetrica. Per queste aree si può però prendere in considerazione una soluzione tecnica detta BTES (Borehole Thermal Energy Storage) che consiste nell'accumulare nel terreno il calore prodotto con i pannelli solari termici durante l'estate e, nella stagione di riscaldamento, durante le ore più calde della giornata [73, 74]. Le Langhe e il Roero sono caratterizzate da litologie (marne e argille) con buona conducibilità termica e da una temperatura del terreno simile a quella della pianura (11÷13°C), con l'eccezione dell'Alta Langa dove le temperature sono di circa 10°C quando la quota del terreno supera i 600 m s.l.m.. La potenzialità di scambio geotermico è quindi discreta, con valori intorno a 9÷10 MWh/anno. Nelle valli, le litologie rocciose presenti (calcere, gneiss, granito ecc.) sono molto conduttive, ma la temperatura del terreno (inferiore a 10°C) rende di fatto sconveniente l'installazione di sonde geotermiche a quote superiori a 800 m s.l.m..

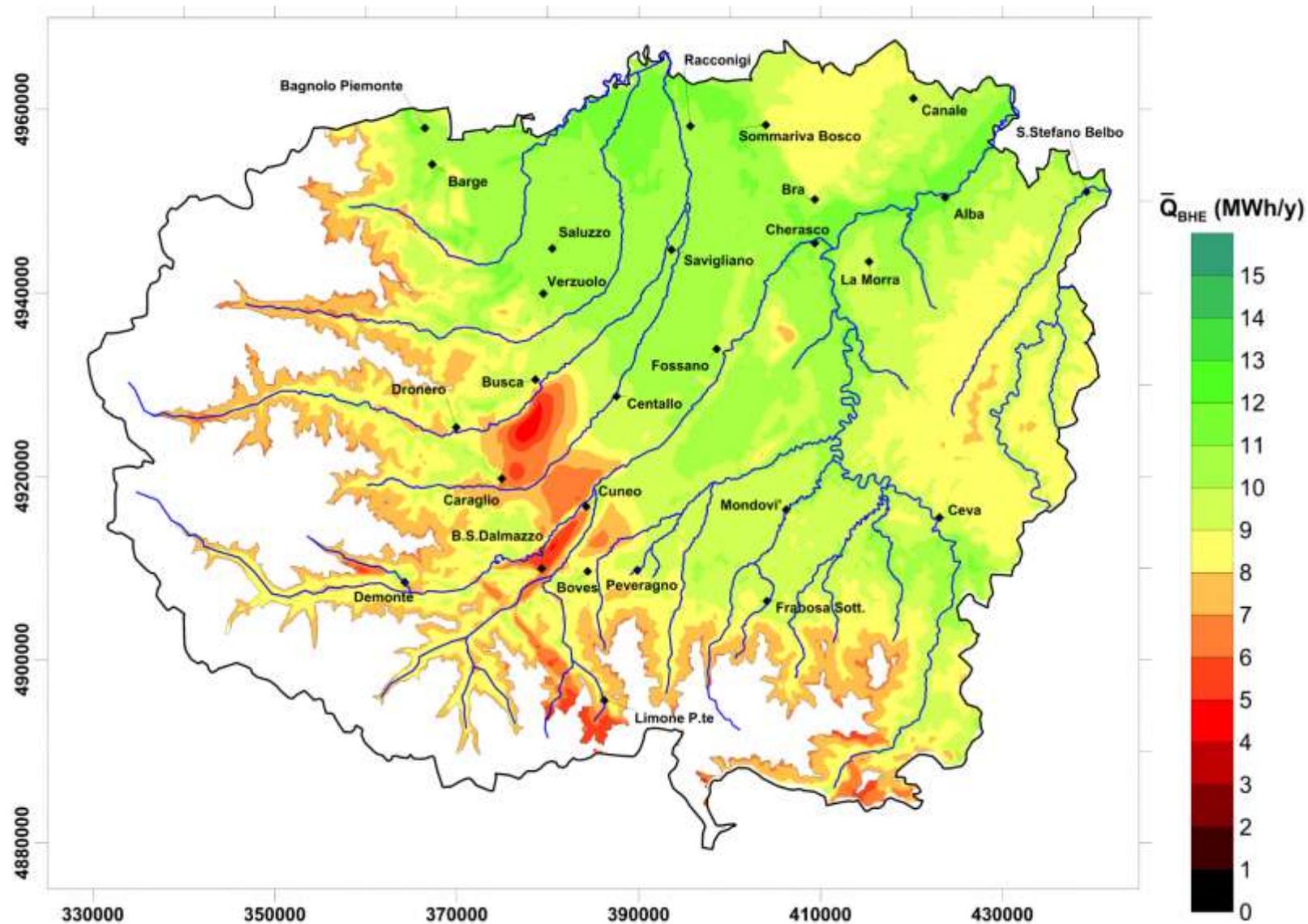


Fig. 28 – Mappa del potenziale geotermico stimato per una sonda di lunghezza pari a 100 m.

## 5 Mappatura del potenziale geotermico per impianti a circuito aperto

### 5.1 Mappatura dei parametri idrodinamici della falda

La progettazione degli impianti geotermici a circuito aperto, a differenza di quanto avviene per le sonde geotermiche, non si basa su metodi standardizzati, ma richiede uno studio che tenga conto del contesto idrogeologico locale. Vi sono infatti differenti problematiche che possono emergere con lo sfruttamento termico della falda:

- eccessiva riduzione del livello della falda idrica in corrispondenza del pozzo di prelievo che, in caso di prelievo senza reiniezione, può portare anche a un depauperamento della falda;
- nel caso sia prevista la reiniezione in falda, gli innalzamenti di livello conseguenti possono portare all'allagamento di scantinati e altri manufatti sotterranei o addirittura alla venuta a giorno della falda (*groundwater flooding*);
- sviluppo di plume termici a valle dell'impianto, con possibili effetti collaterali su:
  - o eventuali utilizzi termici della falda preesistenti, che comincia ad emergere in alcune grandi città, ad esempio Londra [75] e, in Italia, Torino e Milano;
  - o chimica e microbiologia dell'acqua di falda, un problema che però si riscontra perlopiù nei sistemi di stoccaggio termico in falda, come quelli utilizzati in Olanda (si vedano i lavori di Bonte *et alii* [44, 45]), dove le alterazioni termiche sono anche di decine di gradi. Nella Provincia di Cuneo e, in generale, in Italia, lo stoccaggio termico in falda non viene praticato e sarebbe tecnicamente molto difficile da realizzare. A causa dell'orografia, infatti, i flussi di falda sono in genere troppo forti per permettere di trattenere il calore in situ da una stagione all'altra;
  - o temperatura dell'acqua estratta per usi potabili da pozzi a valle;
- cortocircuitazione termica tra il pozzo di prelievo e il pozzo di restituzione, con progressiva deriva termica dell'acqua estratta e peggioramento delle performance della pompa di calore.

La potenzialità di scambio termico dell'acqua di falda e la sua efficienza dipendono dalle sue caratteristiche idrodinamiche: la conducibilità idraulica, lo spessore saturo (o il prodotto di questi due parametri, la trasmissività) e il gradiente idraulico, infatti, condizionano l'entità dell'alterazione piezometrica nel pozzo di prelievo e in quello di restituzione e quindi la portata scambiabile con l'acquifero. La soggiacenza di falda, invece, è importante per due aspetti fondamentali per la realizzabilità dell'impianto: l'incidenza del consumo della pompa per l'estrazione da pozzo, che potrebbe essere eccessiva per valori di soggiacenza molto elevati (es. 50m), e il rischio di allagamenti di manufatti sotterranei o la stessa emersione in superficie dell'acqua iniettata (*groundwater flooding*) nel caso sia prevista la reiniezione in falda a valle dello scambio termico.

E' inoltre necessario tenere in conto la chimica delle acque sotterranee, sia per la loro possibile azione di corrosione dei tubi, sia per la deposizione di cricche dovuta alla variazione della solubilità di alcuni composti disciolti, in particolare il calcare.

La mappatura riportata nei paragrafi che seguono riguarda, quindi:

- conducibilità idraulica, spessore saturo e trasmissività;
- gradiente idraulico della falda superficiale;
- parametri chimici delle acque sotterranee.

Si riporta infine una valutazione della potenzialità che, non potendosi basare su metodi standardizzati, è necessariamente qualitativa.

### **5.1.1 Bottom di falda e spessore saturo**

Lo spessore saturo dell'acquifero superficiale è la differenza tra la quota del livello di falda (tavola d'acqua) e il primo orizzonte impermeabile individuato. Mentre la determinazione del livello di falda è sostanzialmente concorde nelle varie fonti bibliografiche (con differenze che possono dipendere dall'epoca di acquisizione), il *bottom* della falda superficiale è ancora oggetto di continui aggiornamenti, poiché la stratigrafia dipende da quali sondaggi vengono presi in considerazione e dai criteri adottati nel trattamento dati. Negli ultimi 10 anni, i principali lavori pubblicati in questo campo sono lo studio sulla vulnerabilità intrinseca dell'acquifero superficiale, condotto da Civita et al. (2005 [57], 2011 [76]), e il Piano di Tutela delle Acque della Regione Piemonte (2007 [50]), con i successivi aggiornamenti da DGR n. 34-11524 del 3 giugno 2009 [77], della DD n.267 del 4 agosto 2011 [78] e della DD n.900 del 3 dicembre 2012 [79].

In Fig. 29 si riporta la cartografia del *bottom* della falda superficiale come da DD n.900 del 3 dicembre 2012 [79], mentre nelle figure successive si riportano le distribuzioni spaziali degli spessori di falda calcolato come la differenza tra le cartografie dei livelli di falda e delle quote del *bottom* (Fig. 30) tratte dal Piano di Tutela delle Acque della Regione Piemonte [50]. Nell'acquifero in Sinistra Stura, gli spessori maggiori si osservano nella fascia pedemontana, in particolare presso Dronero e Busca (fino a 100 m) e, in misura minore, Saluzzo e Caraglio. Nella parte centrale della pianura, lo spessore dell'acquifero superficiale è di circa 40÷50 m, con locali riduzioni a 20÷30 m in corrispondenza di Lagnasco e Cavallermaggiore. Nella porzione est della Stura, a nord di Fossano lo spessore dell'acquifero si riduce notevolmente (inferiore a 20 m) man mano che ci si avvicina alla confluenza con il Tanaro e al Roero (abitati di Cervere, Marene, Bra, Sanfrè, Sommariva Perno, Caramagna Piemonte). Nell'acquifero in Destra Stura, gli spessori massimi (40÷50 m) si osservano nella parte meridionale più prossima al fiume Stura (Comuni di Cuneo, Castelletto Stura, Montanera), mentre l'acquifero si assottiglia fino a valori inferiori ai 20 m avvicinandosi ai rilievi montani (Boves, Beinette, Margarita) e agli altipiani del Beinale (Magliano Alpi) e di Salmour. Non sono disponibili invece mappature dello spessore di falda nell'acquifero del Fondovalle Tanaro, ma i dati di letteratura evidenziano uno spessore saturo molto ridotto, compreso tra 5 e 20 m (PTA Piemonte [50]). In Fig. 31 si riporta la mappa della soggiacenza di falda nell'acquifero superficiale in Sinistra e Destra Stura, calcolato

come differenza tra le quote del piano campagna (Digital Terrain Model – DTM della Regione Piemonte, [80]) e dell'acquifero superficiale (PTA Piemonte [50]). Nell'area pedemontana a sud-ovest (area tra Busca, Villafalletto, Centallo, Cuneo, Cervasca e Caraglio nella Sinistra Stura; area tra Beinette e Cuneo nella Destra Stura) la soggiacenza raggiunge valori molto elevati, fino a circa 70 m. Nel resto della pianura, la soggiacenza è perlopiù inferiore a 10 m, con l'eccezione degli altopiani di Marene, del Beinale (Magliano Alpi) e della fascia a ridosso dei rilievi alpini e del Roero, dove il tetto della falda superficiale raggiunge profondità fino a 30 m.

Come riportato in precedenza nel Cap. 3.2, sono presenti altri acquiferi superficiali di ridotta estensione areale per i quali si è ritenuto di non procedere a una mappatura a causa della scarsità di dati disponibili, come gli acquiferi presenti tra il Pesio e l'Ellero e gli acquiferi alluvionali nelle valli.

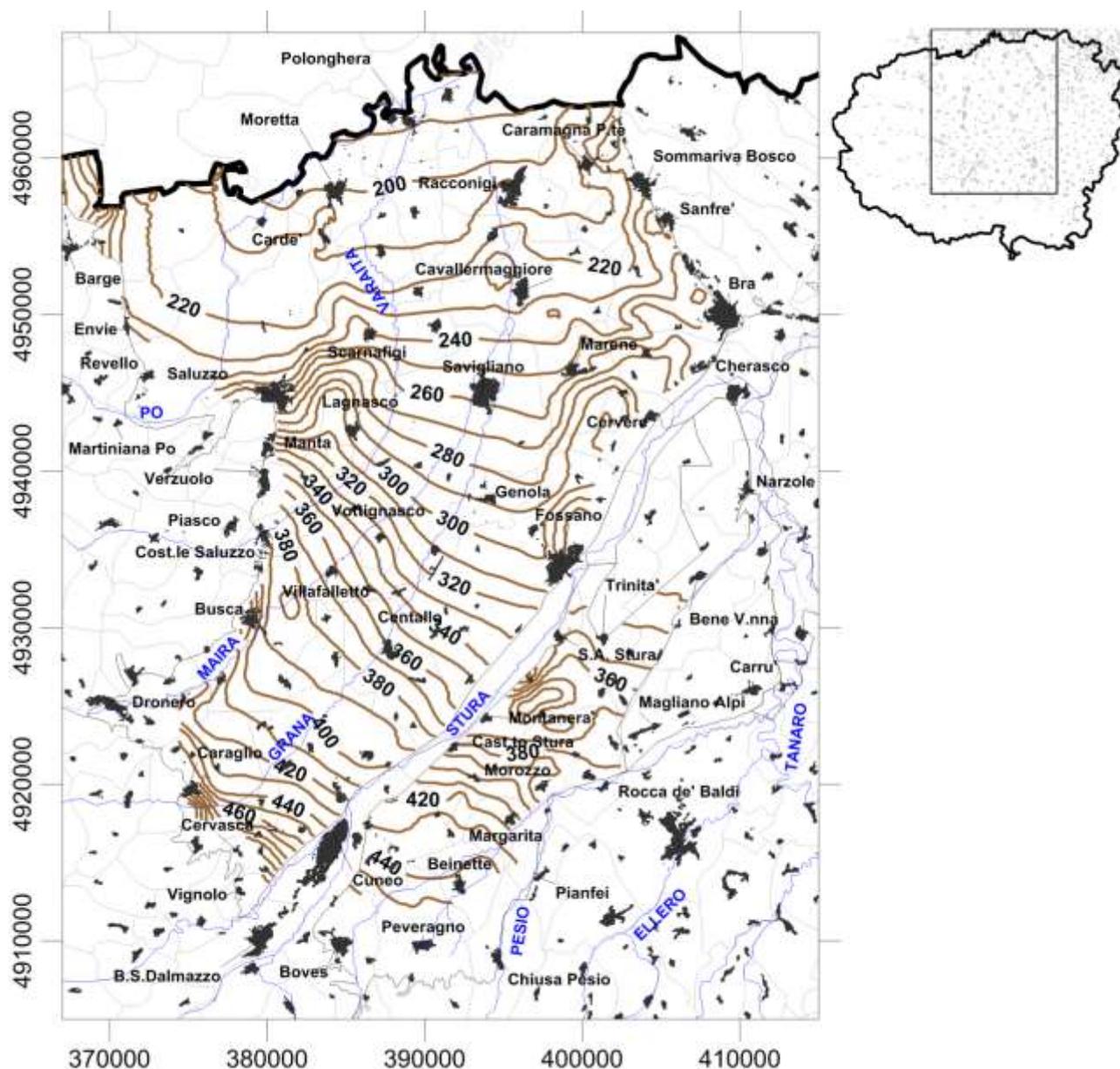


Fig. 29 – Mappa della quota del letto (bottom) dell'acquifero superficiale, tratta dall'ultimo aggiornamento disponibile del Piano di Tutela delle Acque del Piemonte ([50, 79]).

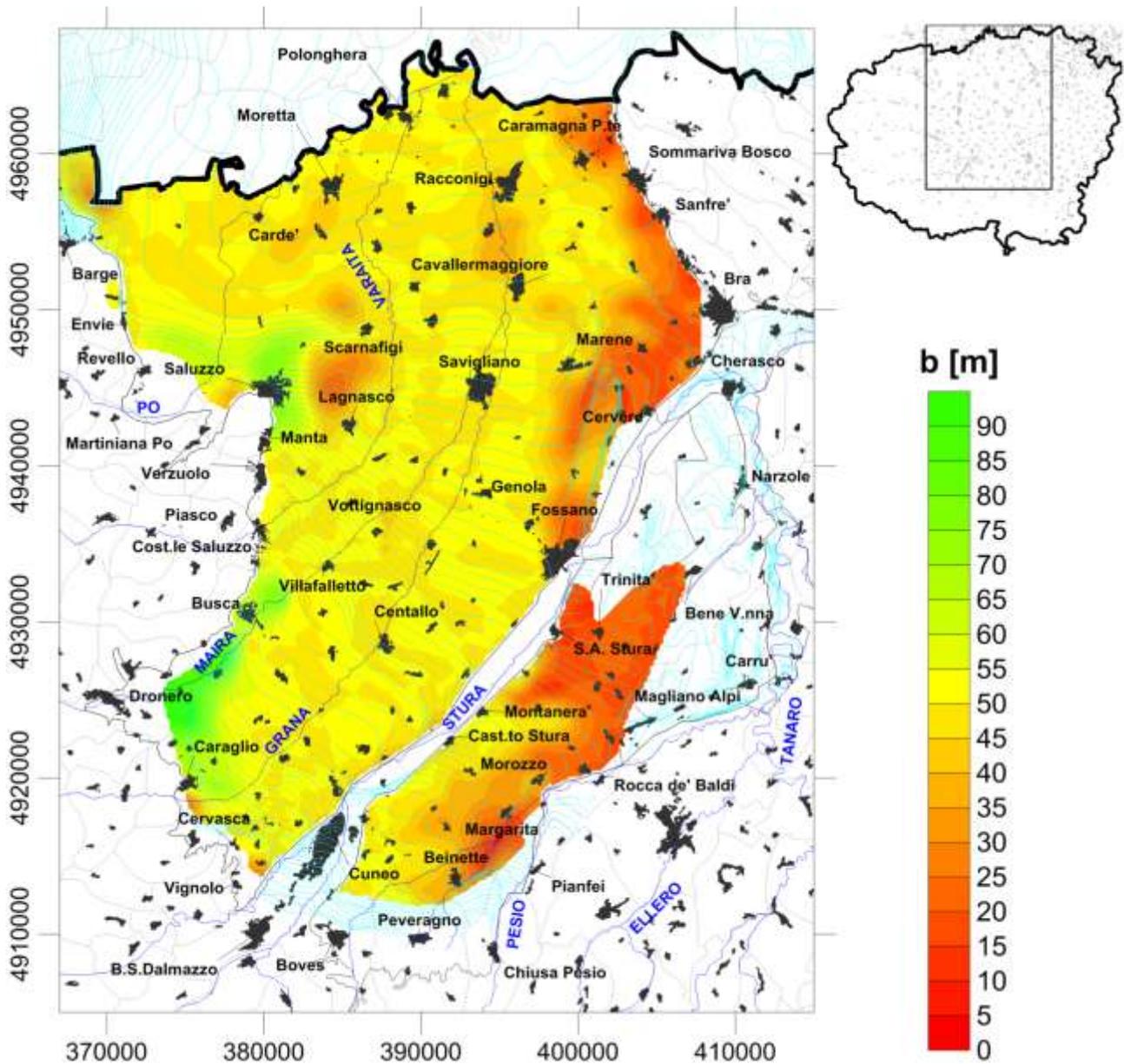


Fig. 30 – Mappa dello spessore dell'acquifero superficiale, calcolato per differenza tra la piezometria e la cartografia del bottom di falda contenute nel PTA Piemonte ([50, 79]).

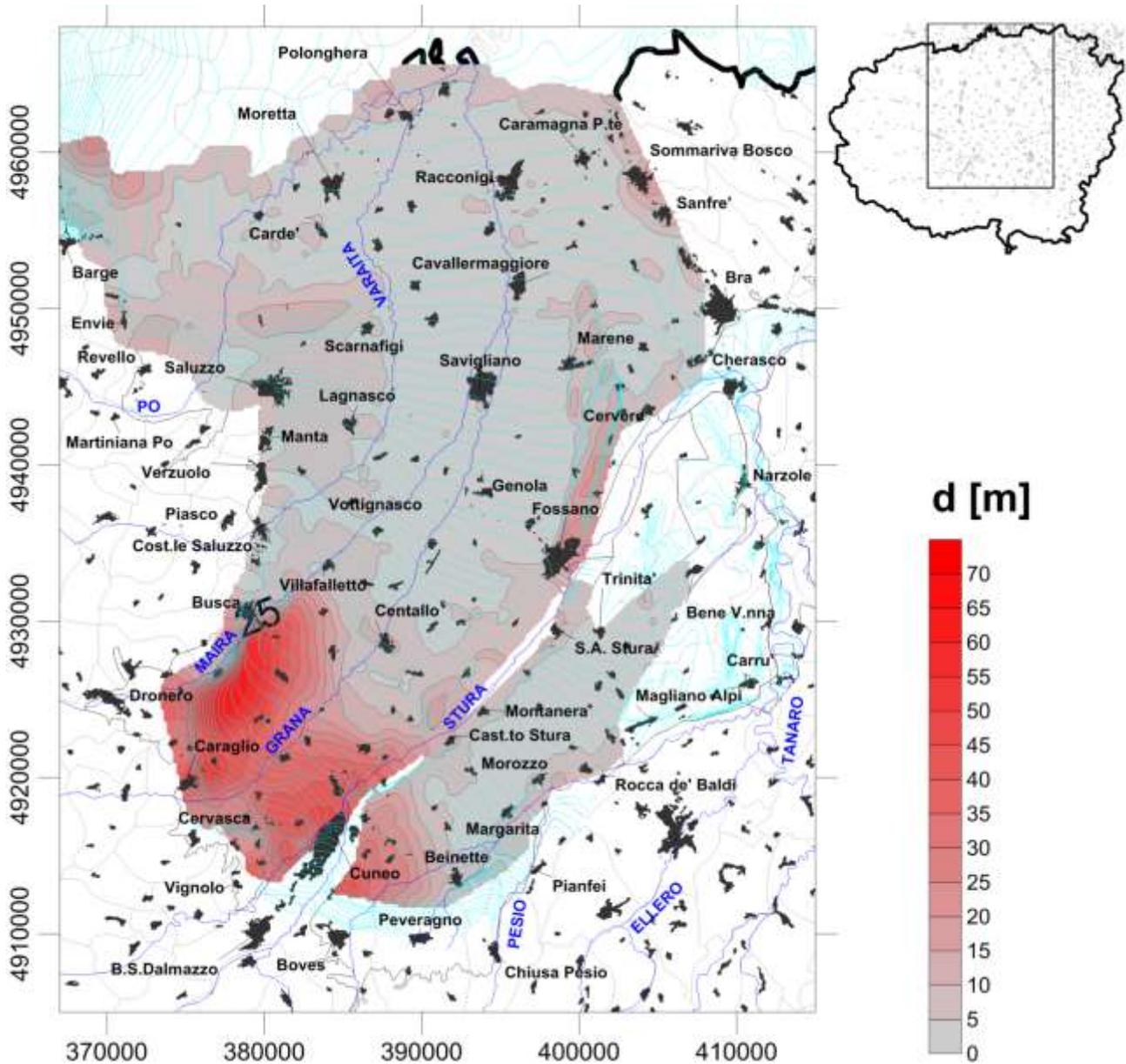


Fig. 31 – Mappa della soggiacenza di falda, calcolata per differenza tra le quote del terreno tratte dal DTM regionale e la piezometria del PTA Piemonte ([50, 79]).

### 5.1.2 Conducibilità idraulica e trasmissività

L'acquifero superficiale della pianura cuneese, sia in Sinistra Stura che in Destra Stura, è composto da sedimenti del Quaternario di origine fluviale [57] di differente granulometria e, quindi, di differente permeabilità. Nell'ambito del Piano di Tutela delle Acque della Regione Piemonte, sono stati resi disponibili dati sulla portata specifica dei pozzi terebrati in falda superficiale, pari al rapporto tra la portata estratta e l'abbassamento del carico idraulico di falda misurato nel pozzo stesso. A partire da questi dati sono state elaborate le cartografie di conducibilità idraulica (Fig. 32) e trasmissività (Fig. 33). A rigore, la portata specifica non è un parametro che può essere riferito esclusivamente all'acquifero, poiché risente anche della qualità di realizzazione del pozzo; tuttavia, in assenza di dati provenienti da prove di pompaggio *multi-well*, è possibile considerare che la trasmissività di un acquifero non confinato sia pari alla portata specifica in pozzo (Di Molfetta e Sethi, 2012 [81]).

In Fig. 32 si osserva che i valori della conducibilità idraulica dell'acquifero in Sinistra Stura sono generalmente compresi tra  $10^{-4}$  e  $10^{-3} \text{ ms}^{-1}$ , tipici delle litologie sabbiose, e tra  $10^{-3}$  e  $10^{-2} \text{ ms}^{-1}$ , tipici delle litologie ghiaiose, mentre sono più rari valori inferiori a  $10^{-4} \text{ ms}^{-1}$ , tipici delle sabbie fini o di sedimenti sabbiosi e ghiaiosi con presenza di materiale limoso-argilloso, che si riscontrano prevalentemente nella parte orientale (zona di Caramagna Piemonte, Sommariva Bosco, Bra, Cervere) e nella fascia pedemontana intorno a Verzuolo, Barge e Bagnolo. La trasmissività (Fig. 33) ha una distribuzione spaziale simile, con valori compresi tra  $3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  e  $3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  in buona parte del territorio, con valori inferiori ( $10^{-4} \div 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) lungo i confini occidentali e orientali.

L'acquifero in Destra Stura è caratterizzato da valori di trasmissività compresi tra  $10^{-3}$  e  $10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  lungo lo Stura (nel territorio comunale di Cuneo, Castelletto Stura, Montanera) mentre valori molto inferiori ( $10^{-5} \div 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) si osservano nella fascia pedemontana (Boves, Peveragno).

Il PTA del Piemonte non fornisce valori dei parametri idrodinamici di falda per l'acquifero del Fondovalle Tanaro. La piezometria di Foglino et al. (2013 [82]) assegna alla falda alluvionale nel territorio di Alba un intervallo di valori di conducibilità idraulica compreso tra  $10^{-4} \text{ m/s}$  e  $10^{-2} \text{ m/s}$  (sabbie e ghiaie da sciolte a medio sciolte).

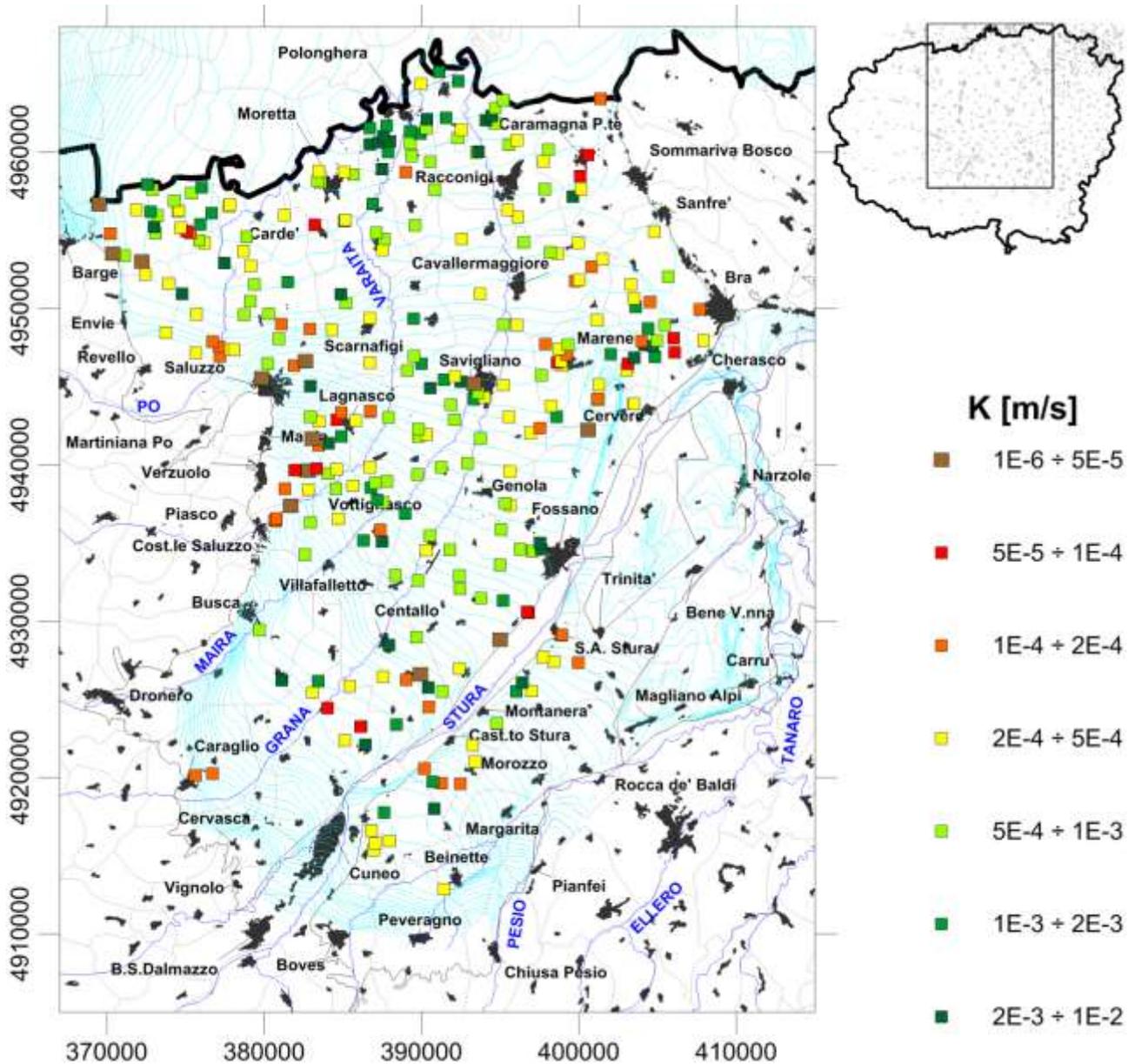


Fig. 32 –Mappa della conducibilità idraulica dell'acquifero superficiale, tratta dal database delle prove di pozzo esaminate nell'ambito del Piano di Tutela delle Acque del Piemonte ([50, 79]).

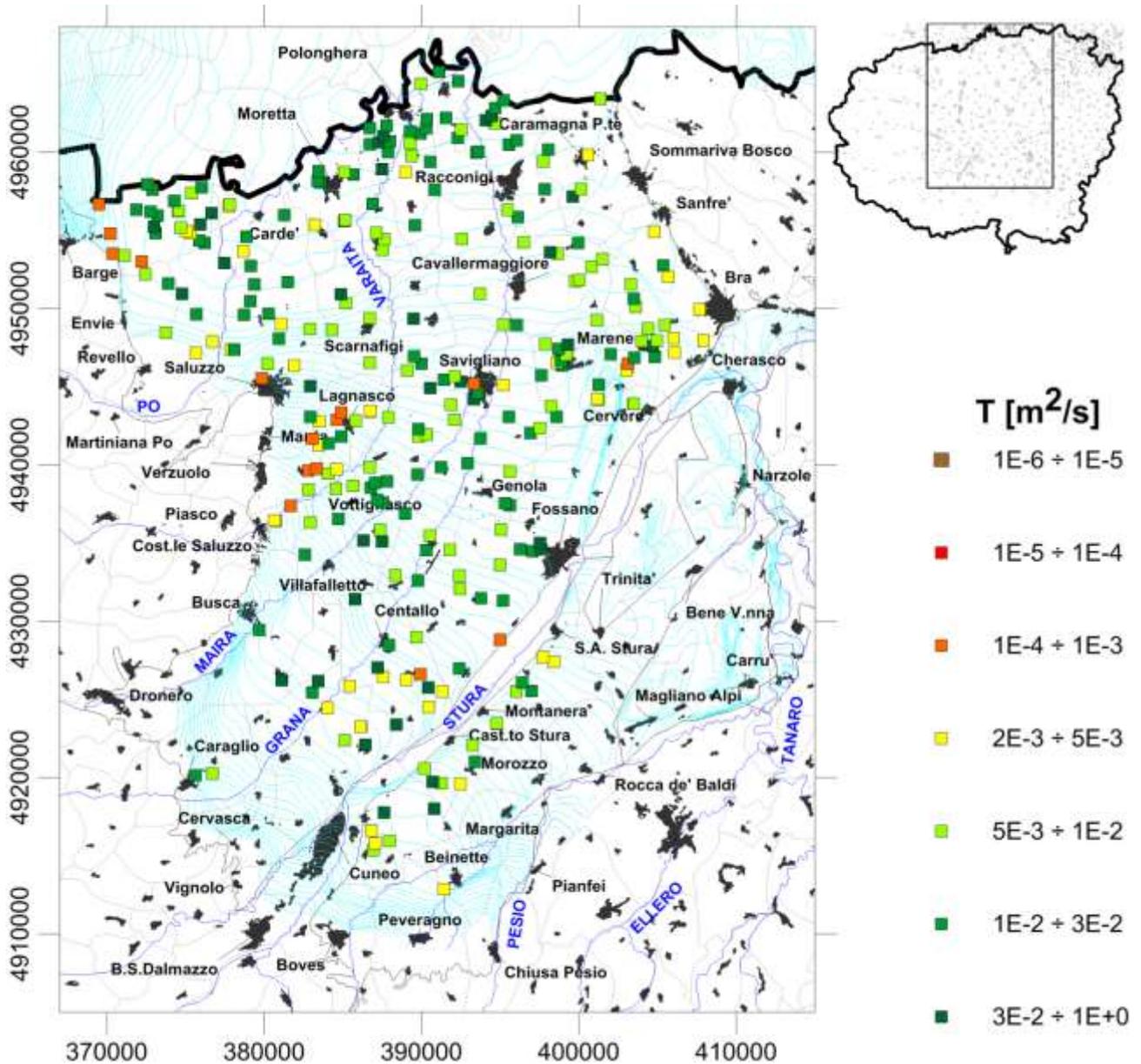


Fig. 33 – Mappa della trasmissività dell’acquifero superficiale, tratta dal database delle prove di pozzo esaminate nell’ambito del Piano di Tutela delle Acque del Piemonte ([50, 79]).

### **5.1.3 Gradiente idraulico di falda**

Il gradiente idraulico della falda superficiale risente fortemente della topografia e, pertanto, nella Provincia di Cuneo sono in genere presenti gradienti piezometrici piuttosto elevati. Come si osserva infatti in Fig. 34, nella fascia pedemontana e ai piedi degli altipiani di Cervere, Salmour e Beinale i valori della pendenza della tavola d'acqua arrivano a superare l'1%, mentre nella parte pianeggiante tali valori variano tra 0.1% e 0.7%. In alcuni casi è visibile la separazione attuata da alcuni corsi d'acqua come il Varaita, il Maira e il Grana nella Sinistra Stura e il Brobbio-Pesio e il Mondalavia nella Destra Stura.

La notevole pendenza della falda idrica nella pianura cuneese è un fattore positivo per lo sviluppo delle applicazioni geotermiche a circuito aperto, poiché contribuisce a ridurre l'entità della cortocircuitazione termica tra il pozzo di reiniezione e il pozzo di prelievo che, come evidenziato nel Cap. 1.4, è una delle principali problematiche tecniche da affrontare nella progettazione di questi impianti.

Il gradiente idraulico della falda superficiale nel Fondovalle Tanaro presenta una forte variabilità: secondo il Piano di Tutela delle Acque [50], i valori più frequenti sono compresi tra 0.5 e 2%, tuttavia nel Comune di Alba, dove risiede la maggior parte della popolazione, il gradiente è generalmente più ridotto e compreso tra 0.2 e 1%.

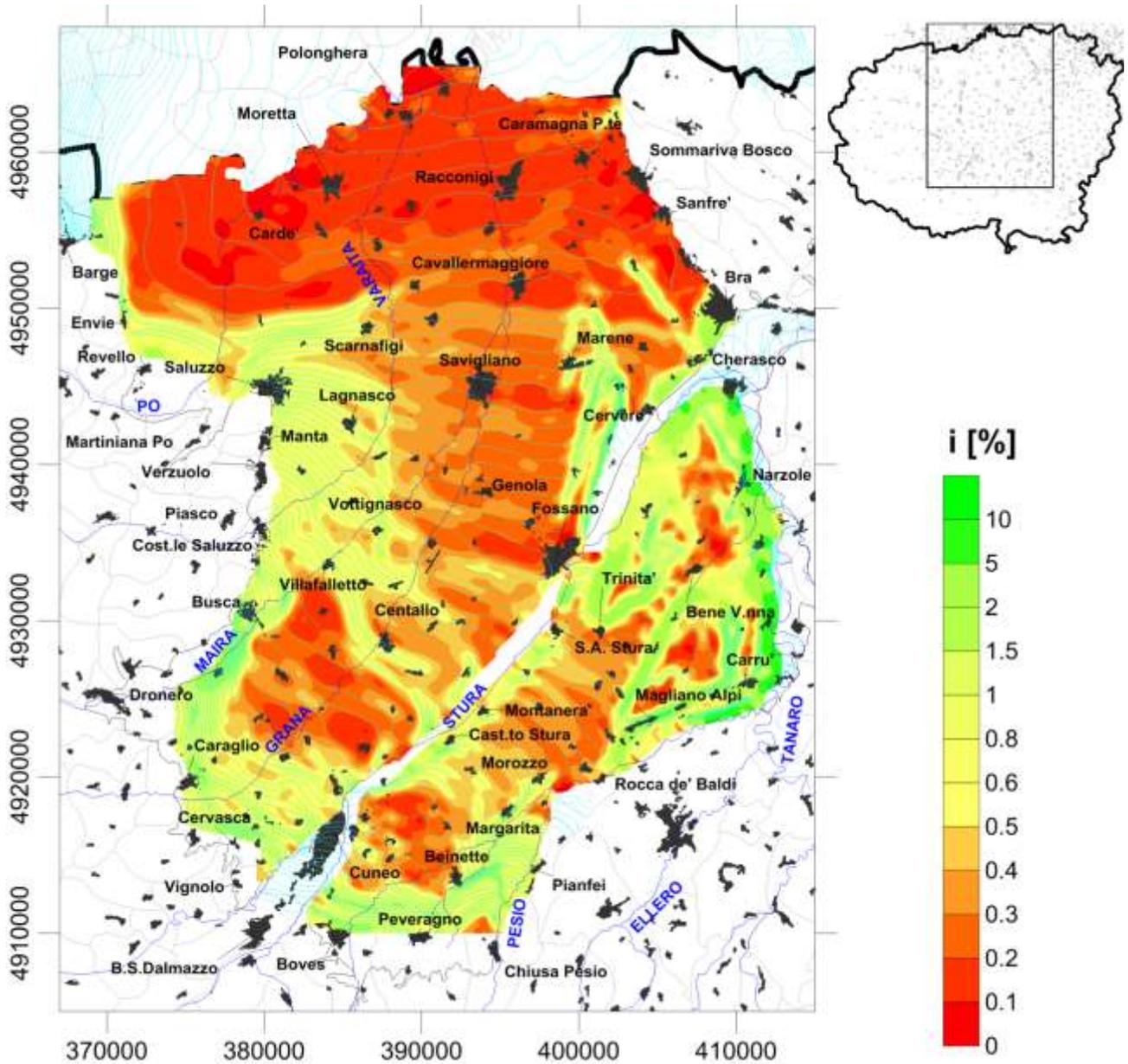


Fig. 34 – Mappa del gradiente idraulico della falda superficiale, calcolato a partire dalla piezometria del Piano di Tutela delle Acque del Piemonte ([50, 79]).

## 5.2 Valutazioni sul potenziale geotermico open-loop

Gli impianti geotermici a circuito aperto non possono essere progettati con metodologie standardizzate come avviene per le sonde geotermiche. Il loro dimensionamento dipende infatti non solo dalle caratteristiche dell'acquifero (conducibilità idraulica, spessore saturo dell'acquifero, gradiente idraulico naturale in falda) ma anche dalla geometria del sito, in base alla quale si stabiliscono le posizioni dei pozzi, e da una serie di scelte progettuali (reiniezione in falda completa o parziale o restituzione in corpo idrico superficiale, numero di pozzi ecc.) che vanno valutate caso per caso. Per fornire comunque un'indicazione quantitativa delle potenzialità di applicazione di questa tipologia, sono stati considerati quattro differenti aspetti progettuali:

- in un acquifero con gradiente idraulico apprezzabile, come quello presente nella pianura cuneese, l'acqua prelevata da pozzo proviene da una zona di cattura a monte, la cui ampiezza dipende dalla trasmissività della falda e dal gradiente idraulico. E' necessario quindi stimare l'ampiezza del fronte di cattura dei pozzi per valutare possibili interferenze tra impianti confinanti;
- l'estrazione di acqua dalla falda provoca un abbassamento del livello nel pozzo e nell'area circostante. Il valore dell'abbassamento in pozzo non può superare un margine di sicurezza sullo spessore saturo della falda, che limita quindi la portata che è possibile estrarre;
- la reiniezione in falda provoca un innalzamento del livello idrico, che non può superare la quota del piano campagna e, anzi, deve mantenere un margine di sicurezza sufficiente per evitare l'allagamento di cantine e altri manufatti sotterranei. Si tratta di un importante fattore limitante, considerato che la falda superficiale nella pianura Cuneese ha in genere una ridotta soggiacenza.

Sulla base dei dati disponibili, che sono stati presentati nei paragrafi precedenti, sono quindi state effettuate delle elaborazioni per calcolare:

- l'ampiezza del fronte di cattura per unità di portata estratta ( $L_{un}$ );
- la portata massima estraibile ( $Q_{max-abs}$ ) da un pozzo con determinate caratteristiche di efficienza, considerando un abbassamento massimo, misurato all'interno del pozzo, pari a 2/3 dello spessore saturo iniziale;
- la portata massima iniettabile ( $Q_{max-inj}$ ) da un pozzo con determinate caratteristiche di efficienza, considerando un livello finale massimo di falda pari a 3 m da piano campagna all'interno del pozzo.

Le elaborazioni presentate hanno lo scopo di fornire un'indicazione della potenza dell'impianto geotermico a circuito aperto che è possibile installare, date le caratteristiche della falda superficiale.

### 5.2.1 Ampiezza del fronte di cattura per unità di portata

Dato un acquifero con conducibilità idraulica  $K$  [m/s], spessore saturo  $b$  [m] e gradiente idraulico  $i$  [-], l'ampiezza del fronte di cattura ( $2y_{max}$ , si veda Fig. 35) è pari a:

$$2y_{max} = \frac{Q}{Kbi} = \frac{Q}{Ti}$$

Eq. 11

dove  $T = Kb$  [ $m^2/s$ ] è la trasmissività.

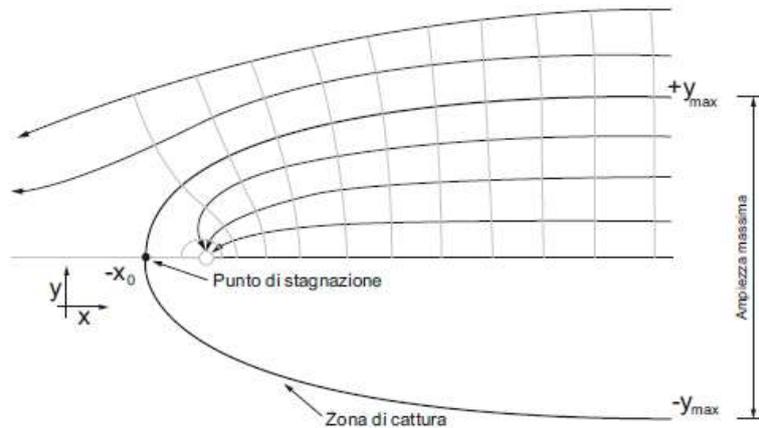


Fig. 35 – Ampiezza dell'area di cattura di un pozzo (Di Molfetta e Sethi, 2012 [81]).

Il rapporto tra l'ampiezza dell'area di cattura e la portata estratta è quindi:

$$L_{un} = \frac{2y_{max}}{Q} = \frac{1}{Ti}$$

Eq. 12

Il valore di  $L_{un}$  [ $s/m^2$ ] è un indicatore delle dimensioni dell'area a monte del pozzo di prelievo influenzata dal pompaggio e, analogamente, dell'area a valle del pozzo di reiniezione nella quale il livello di falda risulta alterato. In Fig. 36 è riportata la mappa con i valori di  $L_{un}$  espressi in metri di ampiezza per l/s di portata. Si osserva che la maggior parte dei valori di ampiezza del fronte di cattura è compresa tra 20m e 50m per l/s di portata estratta o iniettata. Nell'acquifero superficiale in Sinistra Stura, i valori più elevati dell'ampiezza unitaria del fronte di cattura sono osservati nella parte nord, dove il gradiente idraulico è più ridotto, in particolare nella fascia a Nord-Est a ridosso del Roero, dove la falda superficiale presenta spessori molto ridotti (inferiori a 15 m) e quindi valori più bassi di trasmissività. Per l'acquifero in Destra Stura, i dati disponibili sono perlopiù riferiti a una fascia piuttosto ristretta a ridosso dello Stura, nei Comuni di Montanera, Castelletto Stura e Sant'Albano Stura, dove lo spessore saturo è più elevato (circa 30÷50 m). Sono invece scarsi i dati relativi al resto dell'area in Destra Stura, là dove la falda si assottiglia notevolmente (spessori inferiori a 15 m) e dove quindi è ipotizzabile che l'ampiezza del fronte di cattura sia maggiore.

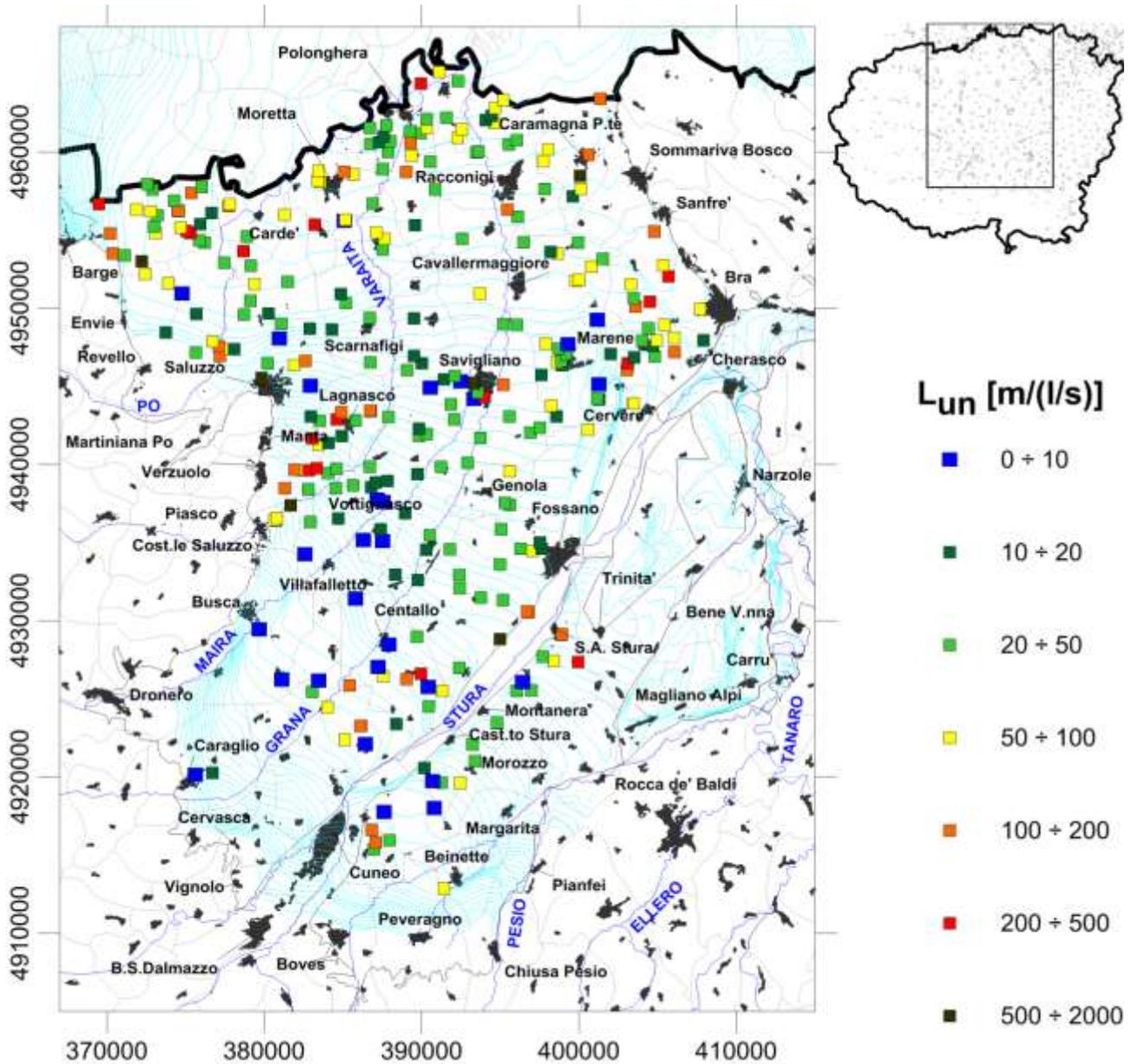


Fig. 36 – Valori di ampiezza del fronte di cattura a monte del pozzo, per unità di portata (in l/s).

### 5.2.2 Massima portata estraibile e iniettabile

L'estrazione di acqua da un pozzo provoca un abbassamento del livello idrico al suo interno, che è influenzato da due fattori:

- le caratteristiche idrodinamiche dell'acquifero (conducibilità idraulica, spessore saturo, coefficiente di immagazzinamento), che determinano l'andamento spaziale degli abbassamenti del livello di falda attorno al pozzo;
- l'efficienza del pozzo, che influenza le perdite di carico che avvengono all'interno del pozzo.

L'abbassamento misurato in pozzo  $s_m$  varia, a seconda della portata, con un andamento che è descritto dall'equazione di Jacob [52, 81]:

$$s_m = BQ + CQ^2$$

Eq. 13

dove  $B$  [ $\text{sm}^{-2}$ ] è il coefficiente che esprime le perdite di carico per flusso laminare e  $C$  [ $\text{s}^2\text{m}^{-5}$ ] è il coefficiente che esprime le perdite di carico per flusso turbolento. L'abbassamento del livello all'interno del pozzo è quindi dovuto a due contributi, dei quali il termine lineare ( $BQ$ ) è largamente prevalente per valori bassi di portata, mentre il termine quadratico  $CQ^2$  assume una maggiore importanza per valori più elevati di portata, fino a prevalere sul termine lineare. I coefficienti  $B$  e  $C$  vengono determinati con la prova di pozzo a gradini di portata, calibrando l'Eq. 13 con una serie di coppie (almeno 3, generalmente 4 o 5) di valori di portata  $Q$  e di abbassamento  $s_m$  (Fig. 37). La portata estratta in queste prove deve avere sempre un andamento crescente.

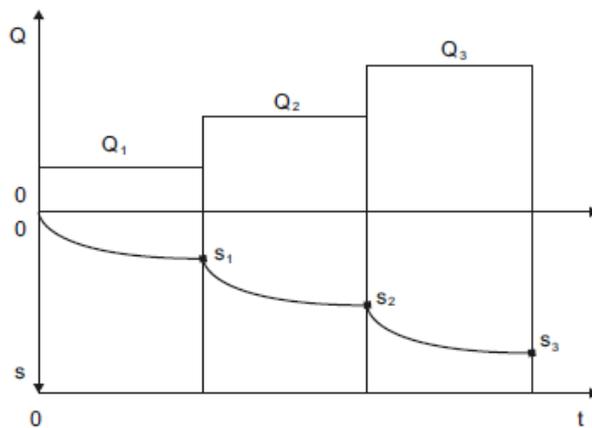


Fig. 37 –Schema di una prova di pozzo a gradini di portata: evoluzione temporale delle portate estratte e degli abbassamenti misurati. Da: Di Molfetta e Sethi, 2012 [81]

Il rapporto tra la portata estratta  $Q$  e l'abbassamento  $s_m$  prende il nome di portata specifica:

$$q_{sp} = \frac{Q}{s_m}$$

Eq. 14

Il valore di  $q_{sp}$  [ $m^2s^{-1}$ ] è variabile a seconda della portata estratta e, generalmente, per portata specifica del pozzo si intende il valore di  $q_{sp}$  misurato nel primo gradino di portata (Gorla, 2004 [52]), per il quale il valore del contributo del termine quadrato dell'Eq. 13 è trascurabile. Si può quindi affermare che:

$$s_m \approx BQ \Rightarrow q_{sp} = \frac{Q}{s_m} \approx \frac{1}{B}$$

Eq. 15

Alcuni autori hanno dimostrato che, in acquiferi non confinati, la portata specifica così definita può essere assimilata alla trasmissività dell'acquifero:

$$T = Kb \approx q_{sp}$$

Eq. 16

I dati forniti dal Piano di Tutela delle Acque (Regione Piemonte, 2007 [50]) si basano su questa approssimazione e sono stati ricavati da prove di pozzo a gradini di portata.

Nel calcolo della portata massima estraibile, è però necessario tenere in conto il termine quadratico dell'equazione di Jacob, e stabilire un abbassamento massimo della falda, che può essere una frazione  $m$  dello spessore saturo iniziale  $b$ . Il valore della portata massima estraibile è quindi dato dalla soluzione dell'equazione:

$$\frac{1}{T} \cdot Q_{max-abs} + C \cdot Q_{max-abs}^2 = m \cdot b$$

Eq. 17

E quindi:

$$Q_{max-abs} = \frac{-\frac{1}{T} + \sqrt{\frac{1}{T^2} + 4 \cdot C \cdot m \cdot b}}{2C}$$

Eq. 18

Per il calcolo della portata massima estraibile, è stato utilizzato un parametro  $C = 3800s^2m^{-5}$ , che rappresenta il limite massimo di accettabilità oltre il quale si può affermare che il pozzo presenta seri problemi di funzionamento (Di Molfetta e Sethi ([81])). Per l'abbassamento massimo, è stato utilizzato un valore  $m = 0.5$ , vale a dire un abbassamento massimo in pozzo pari al 50% dello spessore saturo iniziale. Per evitare l'infiltrazione d'aria è però necessario che la parte del pozzo dotata di filtri sia posta al di sotto del livello minimo previsto.

La portata massima iniettabile  $Q_{max-abs}$  dipende invece dalla soggiacenza della falda in condizioni indisturbate ( $d$ ) e dal franco  $d_{min}$  richiesto per evitare sia la venuta a giorno della falda, sia l'allagamento di cantine e altri manufatti sotterranei. Nell'analisi effettuata, è stato assunto un valore  $d_{min} = 3m$ .

L'Eq. 17 viene quindi così modificata:

$$\frac{1}{T} \cdot Q_{max-abs} + C \cdot Q_{max-abs}^2 = d - d_{min}$$

Eq. 19

E quindi:

$$Q_{max-abs} = \frac{-\frac{1}{T} + \sqrt{\frac{1}{T^2} + 4 \cdot C \cdot (d - d_{min})}}{2C}$$

Eq. 20

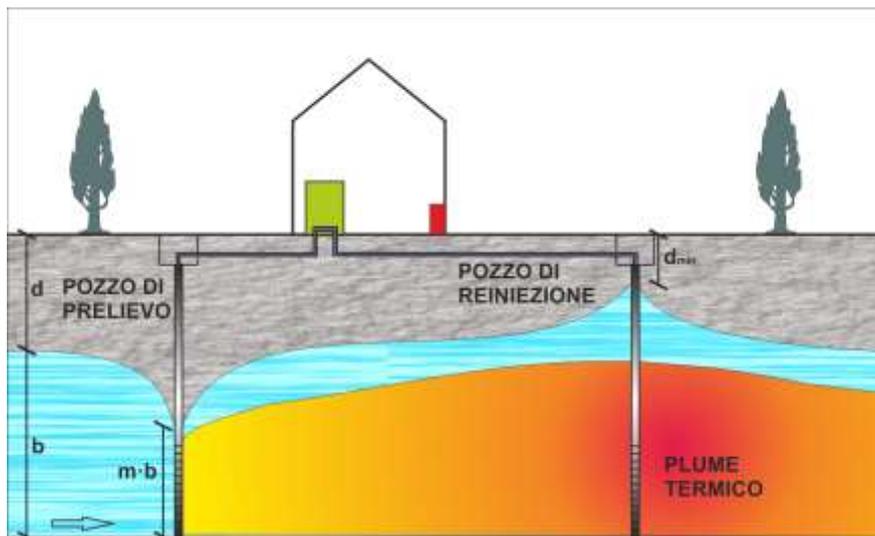


Fig. 38 – Valori limite di spessore saturo residuo ( $m \cdot b$ ) nel pozzo di prelievo e di soggiacenza minima ( $d_{min}$ ) nel pozzo di reiniezione. Modificata da Casasso e Sethi, 2013 [10].

In Fig. 39 si riporta la distribuzione spaziale delle portate massime estraibili. Nella pianura in Sinistra Stura si osservano in genere valori piuttosto elevati, compresi tra 20 e 100 l/s, con l'eccezione di alcune porzioni caratterizzate da una minore trasmissività (inferiore a  $10^{-3} \text{ ms}^{-2}$ ) e spessore (inferiore a 15 m), poste nella fascia pedemontana tra Verzuolo, Saluzzo e Barge, e nella porzione a ovest di Bra. Nella pianura in Destra Stura, si osserva una buona potenzialità, portate tra 20 e 50 l/s, nella parte più a ridosso del fiume Stura tra Cuneo e Morozzo, Castelletto Stura e Montanera, e diminuisce procedendo verso Nord-Est (Sant'Albano Stura).

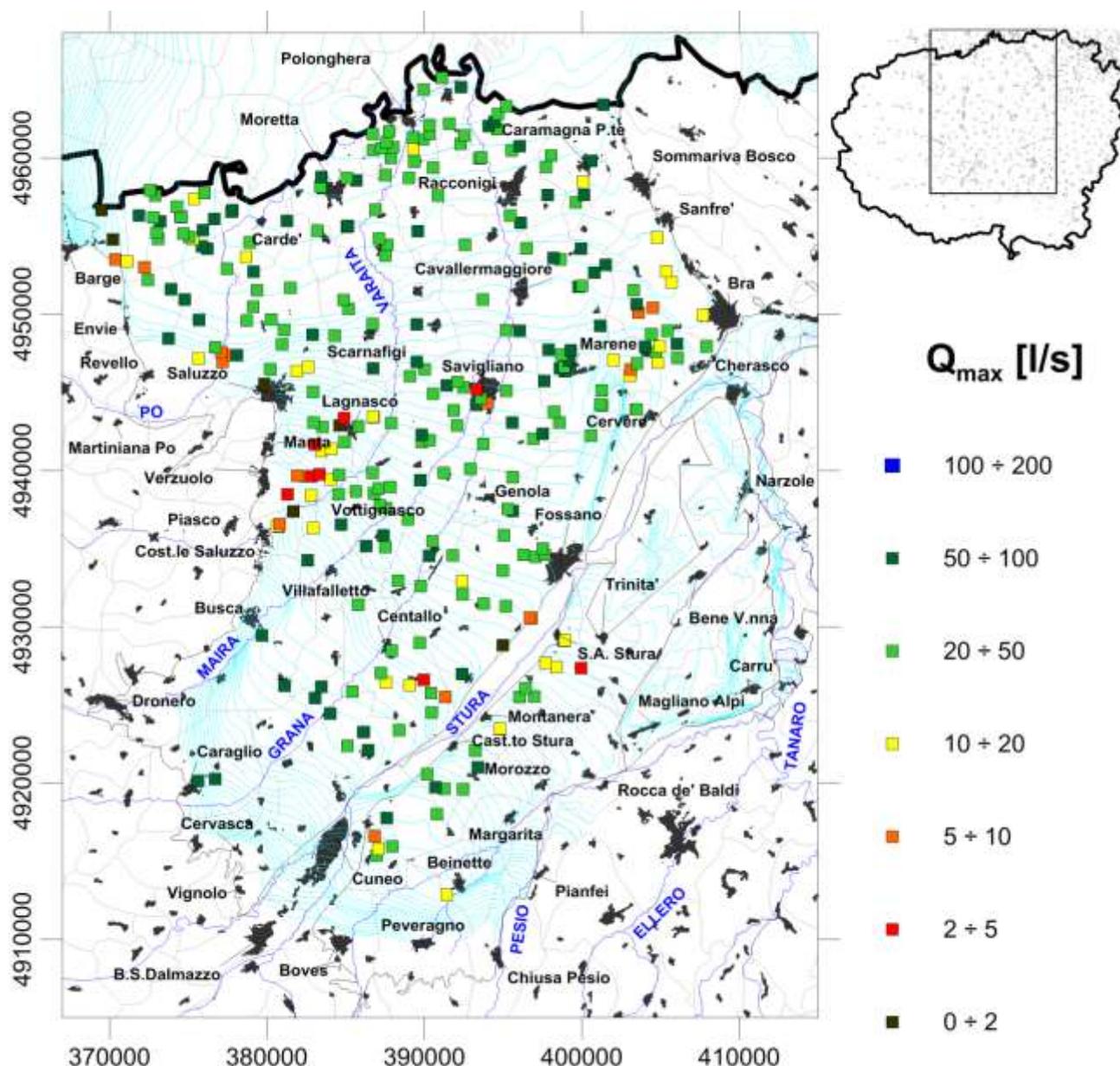


Fig. 39 – Valori di portata massima estraibile con un abbassamento in falda pari a metà dello spessore saturo.

In Fig. 40 si riporta la distribuzione spaziale delle portate massime iniettabili in falda. Nella pianura in Sinistra Stura si osserva un trend di diminuzione da Ovest verso Est, da oltre 100 l/s iniettabili nell'area di Barge e Bagnolo fino a settori, a ridosso del fiume Stura, nei quali le portate iniettabili sono inferiori a 5 l/s. Tale andamento è dovuto sia all'assottigliarsi dell'acquifero in corrispondenza del terrazzo di Marene e a ridosso delle colline del Roero, sia soprattutto alla riduzione della soggiacenza dall'area pedemontana all'area di pianura, dove è inferiore a 5 m. Nella pianura in Destra Stura si osservano valori della portata iniettabile inferiori rispetto alla Sinistra Stura, soprattutto a causa della ridotta soggiacenza di falda (inferiore ai 10 m).

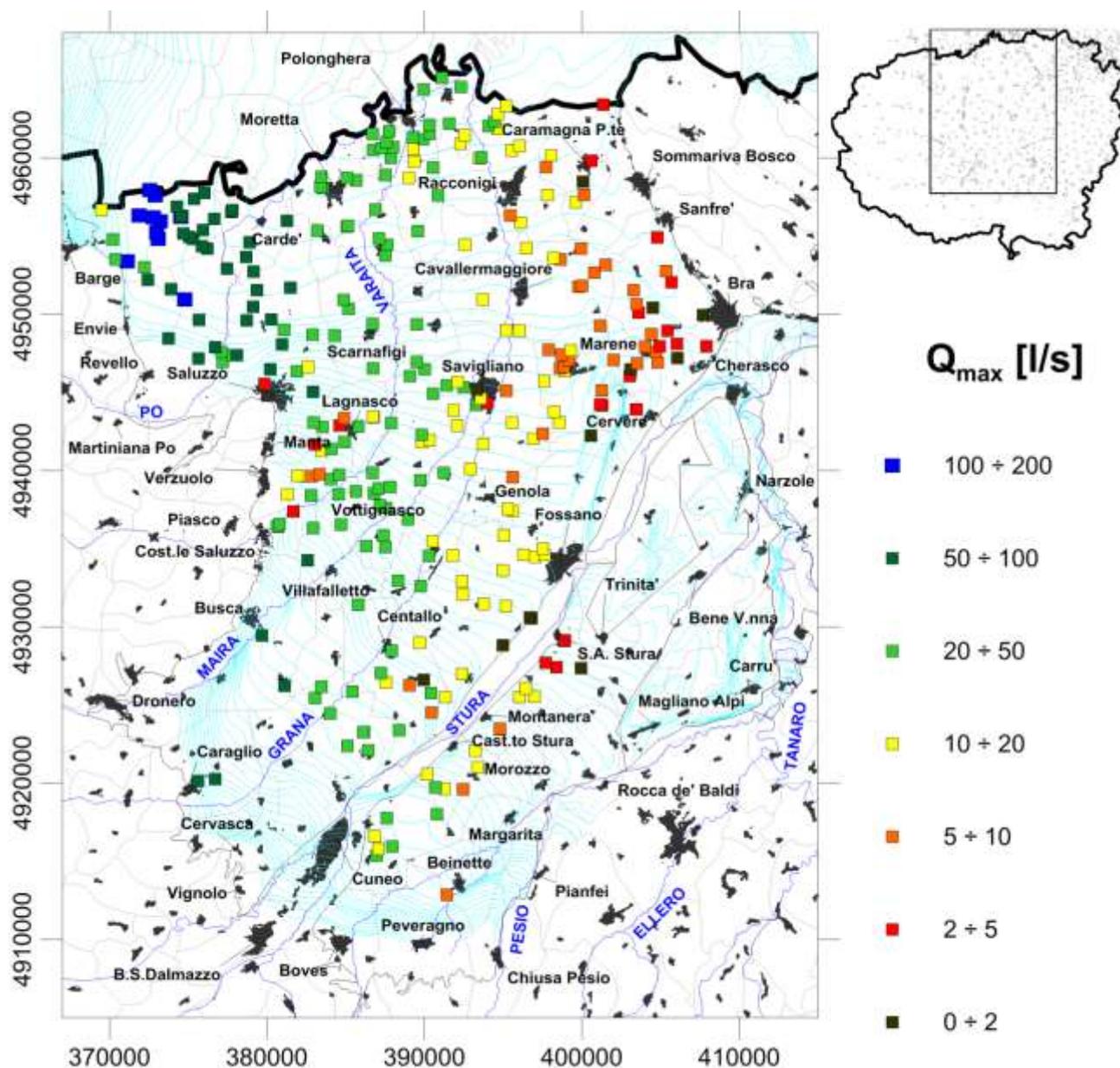


Fig. 40 – Valori di portata massima iniettabile con un franco di 3m rispetto al piano campagna.

### 5.2.3 Potenza massima

Nel paragrafo precedente è stata analizzata la produttività dell'acquifero superficiale per lo scambio termico, valutando quali sono i limiti di portata estraibile e iniettabile. Il più basso tra questi due valori è il limite massimo di portata che è possibile scambiare con la falda, a meno di effettuare l'estrazione o la reiniezione con più pozzi. La potenza dell'impianto dipende inoltre dalla differenza di temperatura tra il prelievo e la reiniezione, che ha valori tipici compresi fra 3°C e 6°C e che è stata imposta pari a  $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ . La massima potenza scambiabile con la falda è quindi pari a:

$$P = \min(Q_{max-abs}; Q_{max-inj}) \cdot (\rho c)_w \cdot \Delta T$$

Eq. 21

In Fig. 41 è rappresentata la mappa della potenza termica installabile, dati i parametri idrodinamici della falda. Nella pianura in Sinistra Stura, si osserva un trend spaziale di decrescita della potenza installabile, dalla fascia pedemontana a Ovest e Sud-Ovest verso i terrazzi antichi tra Fossano e Bra. Tale diminuzione è dovuta principalmente alla riduzione dello spessore saturo e alla diminuzione progressiva del gradiente idraulico della falda. Le potenze installabili sono superiori a 1000 kW nella fascia pedemontana tra Caraglio, Busca e Centallo e tra Saluzzo, Barge e Bagnolo, dove la falda è profonda e caratterizzata da un'elevata trasmissività. Nella parte centrale della pianura di Sinistra Stura, le potenze installabili sono perlopiù comprese tra 200 e 1000 kW. Nell'area tra Fossano, Bra e Sommariva Bosco, il potenziale geotermico per impianti a circuito aperto si riduce a valori compresi tra 20 e 100 kW. Nella pianura in Destra Stura, le potenze installabili sono generalmente comprese tra 100 e 500 kW, con l'eccezione dell'area di Sant'Albano Stura. In quest'area, infatti, la falda ha una soggiacenza ridotta che limita fortemente la possibilità di reiniettare l'acqua a valle dello scambio termico.

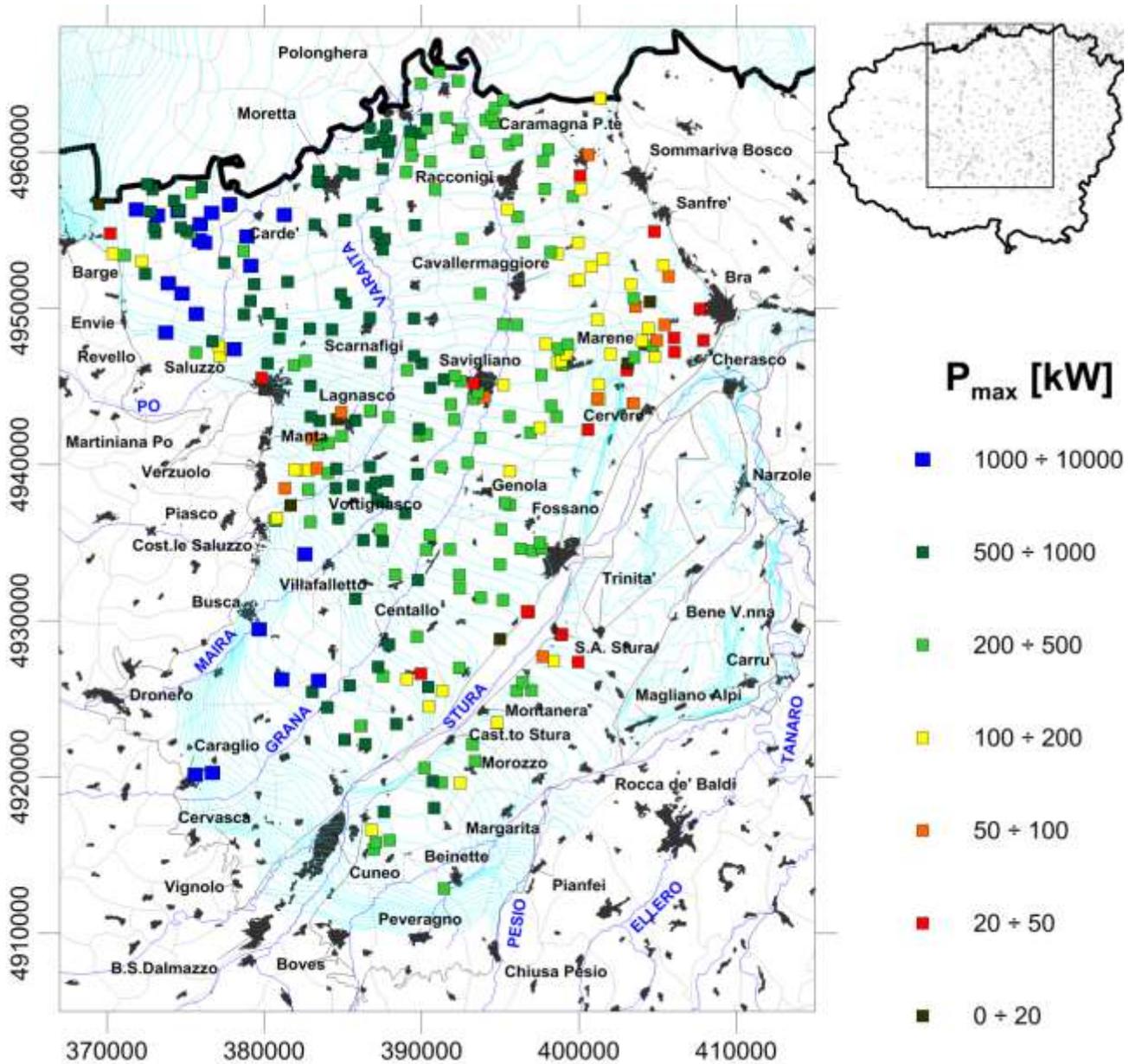


Fig. 41 – Potenza installabile per un impianto a circuito aperto

### 5.3 Considerazioni sulla chimica delle acque sotterranee

Un aspetto importante da tenere in conto nell'utilizzo termico delle acque sotterranee è la durezza dell'acqua, che esprime il contenuto di sali di calcio e di magnesio.

Secondo Rafferty (1999 [83]), un'acqua di falda con contenuto di  $\text{CaCO}_3$  inferiore a 100 ppm (pari a 10 gradi francesi) non provoca deposizione di cricche, mentre se il valore è compreso tra 10 e 20°F tale evento è possibile e al di sopra di 20°F è probabile.

In Fig. 42 si riporta la mappa di Ansaldi e Maffeo (1981 [84]) della durezza totale delle acque sotterranee nella pianura in Sinistra Stura. Si osserva come una vasta porzione della pianura sia caratterizzata da valori piuttosto elevati, compresi tra 20°F e 40°F. Recentemente, Civita et al. (2005 [57]) hanno effettuato una vasta campagna di analisi chimiche dell'acqua di falda superficiale, di cui si riporta una breve sintesi in Tab. 5. I dati riportati sono simili, per quanto riguarda la durezza dell'acqua nella pianura in sinistra Stura, a quelli di Ansaldi e Maffeo (1981 [84]). Nella Destra Stura la durezza dell'acqua è inferiore, con l'eccezione della zona di Benevagienna, caratterizzata anche da un'elevata conducibilità elettrica.

I dati riportati permettono di concludere che è sicuramente consigliabile l'installazione di uno scambiatore termico tra il circuito primario della pompa di calore e il circuito secondario dei pozzi, evitando lo scambio termico diretto.

**Tab. 5 – Valori medi ( $\pm$  scarto quadratico medio) del pH, della conducibilità elettrica e della durezza dell'acqua di falda superficiale nelle pianure in Sinistra e Destra Stura. Tratto da Civita et al., 2005 [57].**

Area	Sub-area	n° punti	pH	CE [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] a 20°C	Durezza [°F]
Sinistra Stura	-	119	7.25 $\pm$ 0.64	618.59 $\pm$ 213.33	31.66 $\pm$ 12.23
Destra Stura	Morozzo	32	6.93 $\pm$ 0.46	364.76 $\pm$ 88.36	17.12 $\pm$ 3.69
	Cherasco	3	6.87 $\pm$ 0.32	467.33 $\pm$ 192.76	24.19 $\pm$ 9.74
	Salmour	2	7.10	581.80	25.50
	Bene Vagienna	4	6.98 $\pm$ 0.13	983.75 $\pm$ 524.41	41.74 $\pm$ 14.52
	Beinale	4	7.10 $\pm$ 0.08	658.75 $\pm$ 314.23	27.57 $\pm$ 9.27
	Narzole	2	6.85	473.50	23.67
	Piozzo	2	7.10	436.00	20.92
	Mondovì	12	6.95 $\pm$ 0.31	368.25 $\pm$ 97.95	17.94 $\pm$ 4.58
	Villanova M.vì	11	7.47 $\pm$ 0.37	502.36 $\pm$ 255.18	21.22 $\pm$ 11
	San Biagio	5	6.94 $\pm$ 0.14	331 $\pm$ 18.47	15.85 $\pm$ 1.83
	Pianfei	4	7.44 $\pm$ 0.40	399 $\pm$ 107.25	17.96 $\pm$ 6.06
	Beinette	2	7.27	342.50	17.50
Roracco	3	7.80 $\pm$ 0.46	460 $\pm$ 57.26	19.58 $\pm$ 4.57	

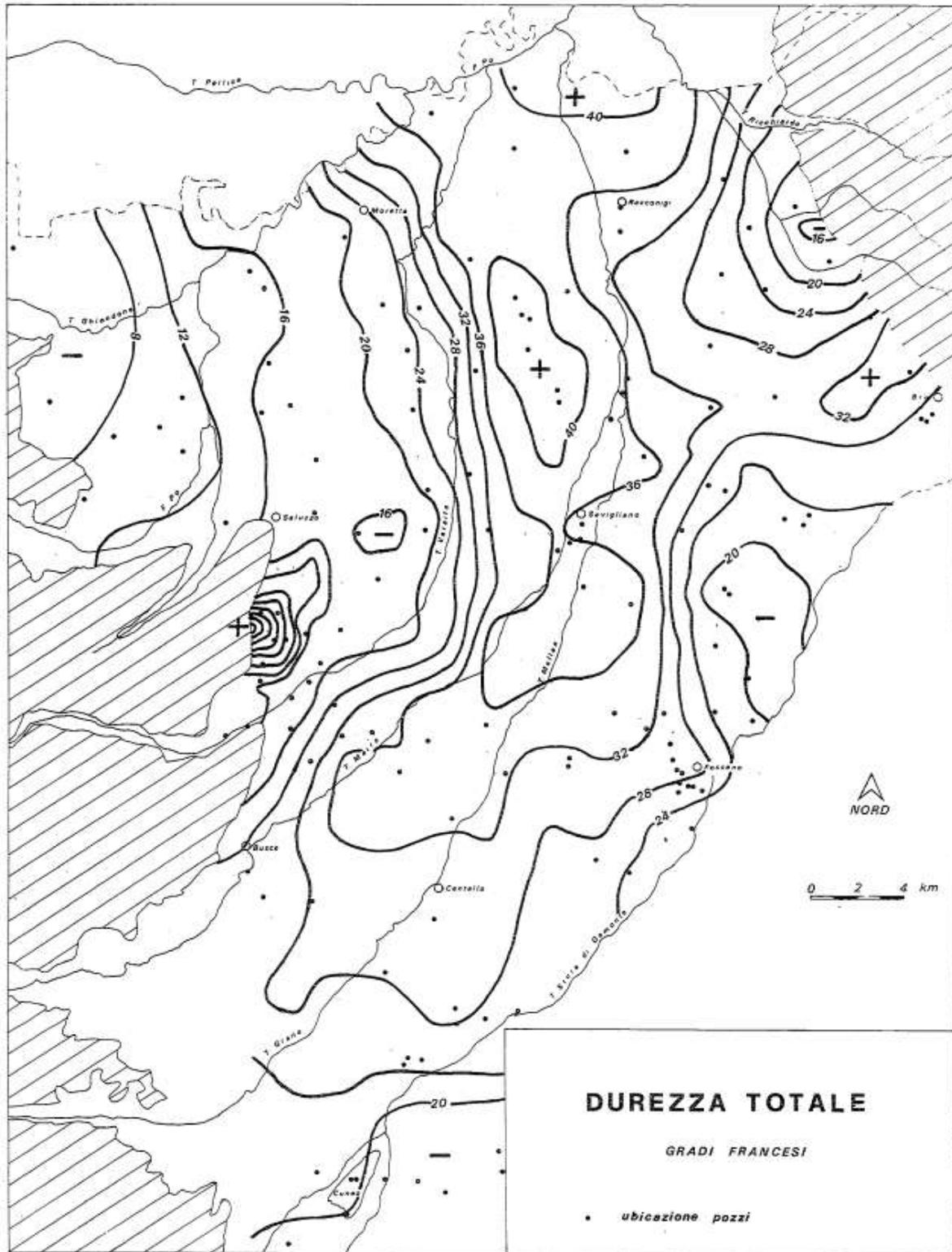


Fig. 6.5 - Mappa delle isoline della durezza totale delle acque sotterranee della Pianura Cuneese

Fig. 42 – Durezza totale delle acque sotterranee della Pianura Cuneese in Sinistra Stura. Da Ansaldo e Maffeo, 1981 [84].

## **6 Conclusioni**

Le pompe di calore geotermiche possono dare un grande contributo per la riduzione delle emissioni di gas serra e inquinanti e per il risparmio energetico. L'efficienza e la convenienza economica di questo tipo di impianti dipendono però fortemente dalle caratteristiche del terreno e, in alcuni casi, dell'acquifero presente nel sito di installazione. Da questa considerazione è scaturita la motivazione per questo lavoro di studio e mappatura delle potenzialità della geotermia a bassa entalpia nel territorio cuneese nel quale, come nel resto d'Italia, la diffusione di questa tecnologia è ancora piuttosto ridotta.

Le pompe di calore geotermiche si possono suddividere in due grandi categorie:

- gli impianti a circuito chiuso, nei quali lo scambio termico con il terreno avviene tramite la circolazione di un fluido termovettore all'interno di un circuito idraulico installato in una perforazione verticale (sonda geotermica);
- gli impianti a circuito aperto, in cui lo scambio termico viene effettuato sull'acqua di falda prelevata da un pozzo e, solitamente, reimpressa nella stessa falda con un pozzo posizionato a valle.

I due tipi di impianto hanno quindi uno scambio termico con il terreno molto differente: di conseguenza, anche il potenziale geotermico, ovvero la potenza che è possibile scambiare in modo sostenibile con il terreno, dipende da fattori molto differenti.

Per gli impianti a circuito aperto, la potenza scambiabile dipende dalle caratteristiche idrodinamiche della falda (conducibilità idraulica, trasmissività, gradiente), dallo spessore saturo e dalla soggiacenza, che influenzano le tre principali problematiche che vengono tenute in conto nella progettazione:

- l'abbassamento del carico idraulico nel pozzo di prelievo;
- l'innalzamento del carico idraulico nel pozzo di reimmissione;
- il cortocircuito termico tra il pozzo di reimmissione e il pozzo di prelievo.

Il ruolo dei parametri termici del terreno è marginale, a differenza di quanto avviene per gli impianti a circuito chiuso, il cui funzionamento dipende dalla conducibilità termica del terreno, dalla sua temperatura iniziale e, in misura minore, dalla capacità termica. La presenza di una falda idrica può rappresentare un notevole vantaggio per il rendimento delle sonde geotermiche, poiché il moto di falda instaura un meccanismo di advezione e dispersione termica che si somma alla conduzione, distribuendo il disturbo termico della sonda su un'area più grande e riducendone l'entità.

Lo studio delle potenzialità geotermiche della Provincia di Cuneo è quindi partito dalla mappatura dei parametri più rilevanti per ciascuna tipologia d'impianto, per poi trarre conclusioni basate su modelli matematici. Tali parametri sono:

- per la tipologia a circuito chiuso, la conducibilità termica, la capacità termica e la temperatura indisturbata del terreno;

- per la tipologia a circuito chiuso, la trasmissività, lo spessore saturo e la soggiacenza dell'acquifero superficiale.

Nell'ambito del progetto, è stato ideato un metodo per la stima del potenziale delle sonde geotermiche, con il quale è stato determinato il carico termico annuale scambiabile con una sonda di lunghezza standard pari a 100 m. Le aree di pianura sono quelle che presentano i valori maggiori di potenziale termico, pari a circa 10÷12 MWh/anno. Fanno eccezione alcune aree, come la zona pedemontana tra Dronero, Busca e Boves e la pianura tra Pesio ed Ellero, dove la falda superficiale presenta una elevata soggiacenza e la temperatura del terreno è più bassa rispetto al resto della pianura, posto a quota inferiore. La combinazione di questi due fattori riduce notevolmente la capacità di scambio termico del terreno e la convenienza degli impianti con sonde geotermiche per il riscaldamento di edifici. E' però possibile, in queste situazioni, utilizzare il terreno della zona insatura dell'acquifero per lo stoccaggio di calore accumulato durante l'estate, ad esempio con pannelli solari termici, con una soluzione detta BTES (Borehole Thermal Energy Storage, stoccaggio di calore con sonde). Con questa tecnologia, infatti, la scarsa conducibilità termica del terreno e la mancanza di una falda idrica diventano un vantaggio, permettendo una maggiore efficienza di stoccaggio. Le Langhe e il Roero sono caratterizzate da litologie (marne e argille) con buona conducibilità termica e da una temperatura del terreno di poco inferiore a quella della pianura (11÷12°C), con l'eccezione dell'Alta Langa dove le temperature possono scendere sotto i 10°C quando la quota del terreno supera i 600 m s.l.m.. La potenzialità di scambio geotermico è quindi discreta, con valori intorno a 9÷10 MWh/anno. Nelle valli, le litologie rocciose presenti (calcere, gneiss, granito ecc.) sono molto conduttive, ma la temperatura del terreno (inferiore a 10°C) rende di fatto sconveniente l'installazione di sonde geotermiche a quote superiori a 800 m s.l.m..

Per la tipologia a circuito aperto, nelle aree di pianura di Sinistra e Destra Stura sono stati stimati i valori di portata estraibile (che dipende dalla trasmissività e dallo spessore saturo) e iniettabile (che dipende dalla trasmissività e dalla soggiacenza) da un pozzo perforato nell'acquifero superficiale. Da questi valori sono state ricavate le potenze massime scambiabili con la falda, in riscaldamento o in raffrescamento, utilizzando una coppia di pozzi (prelievo e reiniezione). Dalle stime effettuate, è possibile realizzare impianti di medio-grande potenza (200÷1000 kW) in gran parte della pianura in Sinistra Stura e nella porzione più produttiva dell'acquifero in Destra Stura. Lo spessore limitato della falda sembra invece impedire, in aree come l'altipiano tra Fossano e Bra e la zona di Sant'Albano Stura, la realizzazione di impianti con potenze superiori a 100 kW. Nel territorio cuneese sono inoltre presenti altre falde superficiali, la più estesa delle quali è il Fondovalle Tanaro. Dai pochi dati disponibili, però, risulta una modesta produttività della falda che sembra precludere l'installazione di impianti geotermici a circuito aperto, se non per utenze di potenza ridotta.

Riassumendo, la Provincia di Cuneo presenta delle buone potenzialità per l'installazione delle pompe di calore geotermiche, in particolare nelle aree di pianura là dove si concentra quasi tutta la sua popolazione,

ma anche nelle colline di Langhe e Roero. Nella zona montana la bassa temperatura del terreno rende invece questo tipo di installazione meno conveniente. Nella pianura cuneese vi sono inoltre interessanti margini di sviluppo per la tecnologia a circuito aperto, grazie alla buona produttività della falda superficiale e al forte flusso sotterraneo.

Questo studio sulle potenzialità della geotermia in Provincia di Cuneo è, per quanto a conoscenza degli autori, il primo che viene effettuato su questa scala territoriale. Il lavoro svolto serve per fornire indicazioni utili a chi effettua la pianificazione energetica negli Enti locali, ai progettisti termotecnici, agli energy manager e, in generale, a chi è interessato alle fonti di energia rinnovabile termica. Nel progetto non è stato possibile effettuare misurazioni in situ, considerata anche la vastità del territorio indagato. Pertanto, tra i futuri possibili sviluppi del lavoro svolto, si può senz'altro considerare:

- uno studio più accurato della stratigrafia del territorio provinciale, eventualmente effettuato su scale più ristrette (es. a scala urbana nelle principali città);
- la raccolta di dati sulla temperatura del terreno, eventualmente provenienti da impianti geotermici in attività e da rilevazione delle temperature in falda;
- una campagna di caratterizzazione termica dei terreni, sia con Thermal Response Test, sia con misure su campioni di terreno e di roccia.

## **Bibliografia**

- [1] EIA, US Energy Information Administration - International Energy Statistics., in, 2009.
- [2] ENI, Il bilancio energetico in Italia, in, 2014.
- [3] Eurostat, Share of renewable energy in gross final energy consumption, in, 2015.
- [4] EUROBSERV'ER, The state of renewable energies in Europe. Edition 2013. 13th EurObserv'ER Report., in, EUROBSERV'ER, 2013.
- [5] EUROBSERV'ER, The state of renewable energies in Europe - 11th EurObserv'ER Report, in, EUROBSERV'ER, 2011, pp. 254.
- [6] R. Bertani, Geothermal Energy Use, Country Update for Italy, in: EGC, Pisa, 2013, pp. 1-7.
- [7] AEEG, Energia: da luglio applicabile la tariffa di rete per i consumi ad alta efficienza, in, 2014.
- [8] Regione Lombardia, Regolamento Regionale 15 febbraio 2010 n°7 - Regolamento regionale per l'installazione di sonde geotermiche che non comportano il prelievo di acqua, in attuazione dell'art. 10 della L.R. 11 dicembre 2006 n° 24 (Norme per la prevenzione e la riduzione delle emissioni in atmosfera a tutela della salute e dell'ambiente), in: R. Lombardia (Ed.) RR 7/2010, 2010, pp. 3-9.
- [9] A. Casasso, R. Sethi, Sonde geotermiche a doppia U: analisi di sensitività del rendimento energetico, *Geoingegneria Ambientale e Mineraria*, 141 (2014) 51-62.
- [10] A. Casasso, R. Sethi, Tecnologia e potenzialità dei sistemi geotermici a bassa entalpia, *Geoingegneria Ambientale e Mineraria*, 138 (2013) 13-22.
- [11] A.M. Gustafsson, L. Westerlund, Heat extraction thermal response test in groundwater-filled borehole heat exchanger - Investigation of the borehole thermal resistance, *Renewable Energy*, 36 (2011) 2388-2394.
- [12] F. Delaleux, X. Py, R. Olives, A. Dominguez, Enhancement of geothermal borehole heat exchangers performances by improvement of bentonite grouts conductivity, *Applied Thermal Engineering*, 33-34 (2012) 92-99.
- [13] T. Klotzbücher, A. Kappler, K.L. Straub, S.B. Haderlein, Biodegradability and groundwater pollutant potential of organic anti-freeze liquids used in borehole heat exchangers, *Geothermics*, 36 (2007) 348-361.
- [14] P. Eskilson, Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes, in, Lund University (Sweden), 1987.
- [15] P. Eskilson, J. Claesson, Simulation model for thermally interacting heat extraction boreholes, *Numerical Heat Transfer*, 13 (1988) 149-165.
- [16] G. Hellstrom, B. Sanner, *Earth Energy Designer, User Manual Version 2.0*, 2000.
- [17] J.D. Spitler, GLHEPRO - A design tool for commercial building ground loop heat exchangers, in: 4th International Heat Pumps in Cold Climates Conference, Aylmer, Quebec, 2000.
- [18] L. Lamarche, S. Kaji, B. Beauchamp, A review of methods to evaluate borehole thermal resistances in geothermal heat-pump systems, *Geothermics*, 39 (2010) 187-200.
- [19] D. Bauer, W. Heidemann, H. Müller-Steinhagen, H.J.G. Diersch, Thermal resistance and capacity models for borehole heat exchangers, *International Journal of Energy Research*, 35 (2011) 312-320.
- [20] A. Casasso, R. Sethi, Efficiency of closed loop geothermal heat pumps: A sensitivity analysis, *Renewable Energy*, 62 (2014) 737-746.
- [21] A. Casasso, R. Sethi, Sensitivity Analysis on the Performance of a Ground Source Heat Pump Equipped with a Double U-pipe Borehole Heat Exchanger, *Energy Procedia*, 59 (2014) 301-308.
- [22] S. Gehlin, Thermal Response Test - Method Development and Evaluation, in: Department of Environmental Engineering, Lulea University of Technology, Lulea (Sweden), 2002, pp. 191.
- [23] S.P. Kavanaugh, K. Rafferty, *Ground-Source Heat Pumps - Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings*, ASHRAE, 1997.
- [24] M. Philippe, M. Bernier, D. Marchio, Sizing calculation spreadsheet: Vertical geothermal borefields (zip file), *ASHRAE Journal*, 52 (2010) 20-28.
- [25] UNI, UNI 11466:2012 Sistemi geotermici a pompa di calore - Requisiti per il dimensionamento e la progettazione, in, 2012.
- [26] H.J.G. Diersch, FEFLOW. Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2014.
- [27] D. Pahud, M. Hubbuch, Measured Thermal Performances of the Energy Pile System of the Dock Midfield at Zurich Airport, in: European Geothermal Congress, Unterhaching (Germany), 2007, pp. 7.

- [28] M. Caleffi, F. Guidetti, S. Casarino, A. Crimella, M. Doninelli, M. Doninelli, D. Mazzetti, R. Planca, A. Soldarini, C. Tadini, M. Tadini, M. Tomasoni, Impianti a pompe di calore geotermiche, in: *Idraulica Caleffi*, Poligrafica Moderna S.r.l. Novara, Novara, 2010, pp. 1-44.
- [29] M. Caleffi, F. Guidetti, S. Casarino, A. Crimella, M. Doninelli, D. Mazzetti, R. Planca, A. Soldarini, C. Tadini, M. Tadini, M. Tomasoni, Impianti a pompe di calore geotermiche, in: *Idraulica Caleffi*, 2010.
- [30] VDI, VDI 4640 - Thermal use of underground, in: Blatt 1-4, 2000.
- [31] P. Howsam, Biofouling in Wells and Aquifers, *Water and Environment Journal*, 2 (1988) 209-215.
- [32] D. Banks, Thermogeological assessment of open-loop well-doublet schemes: a review and synthesis of analytical approaches, *Hydrogeol J*, 17 (2009) 1149-1155.
- [33] DHI-WASY, FEFLOW User Manual, DHI-Wasy, Berlin, 2002.
- [34] USGS, User's Guide to SEAWAT: A Computer Program for Simulation of Three-Dimensional Variable-Density, USGS, 2002.
- [35] D. Banks, An introduction to 'thermogeology' and the exploitation of ground source heat, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 42 (2009) 283-293.
- [36] USGS, A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model, USGS, 1988.
- [37] R. Sethi, A. Di Molfetta, Heat transport modeling in an aquifer downgradient a municipal solid waste landfill in Italy, *American Journal of Environmental Sciences*, 3 (2007) 106-110.
- [38] J. Hecht-Mendez, N. Molina-Giraldo, P. Blum, P. Bayer, Evaluating MT3DMS for Heat Transport Simulation of Closed Geothermal Systems, *Ground Water*, 48 (2010) 741-756.
- [39] A. Casasso, R. Sethi, Modelling thermal recycling occurring in groundwater heat pumps (GWHPs), *Renewable Energy*, 77 (2015) 86-93.
- [40] A. Di Molfetta, R. Sethi, *Ingegneria degli acquiferi*, Springer-Verlag Italia, Milano, 2012.
- [41] S. Lo Russo, C. Boffa, M.V. Civita, Low-enthalpy geothermal energy: An opportunity to meet increasing energy needs and reduce CO<sub>2</sub> and atmospheric pollutant emissions in Piemonte, Italy, *Geothermics*, 38 (2009) 254-262.
- [42] D. Saner, R. Juraske, M. Kübert, P. Blum, S. Hellweg, P. Bayer, Is it only CO<sub>2</sub> that matters? A life cycle perspective on shallow geothermal systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (2010) 1798-1813.
- [43] H. Brielmann, C. Griebler, S.I. Schmidt, R. Michel, T. Lueders, Effects of thermal energy discharge on shallow groundwater ecosystems, *FEMS Microbiology Ecology*, 68 (2009) 273-286.
- [44] M. Bonte, P.J. Stuyfzand, A. Hulsmann, P. van Beelen, Underground thermal energy storage: Environmental risks and policy developments in the Netherlands and European Union, *Ecology and Society*, 16 (2011).
- [45] M. Bonte, B.M. Van Breukelen, P.J. Stuyfzand, Environmental impacts of aquifer thermal energy storage investigated by field and laboratory experiments, *Journal of Water and Climate Change*, 4 (2013) 77-89.
- [46] UNI, UNI 11468:2012 Sistemi geotermici a pompa di calore - Requisiti ambientali, in, 2012.
- [47] UNI, UNI 11467:2012 Sistemi geotermici a pompa di calore - Requisiti per l'installazione, in, 2012.
- [48] Ministero dell'Ambiente, Modifica ed integrazione degli allegati del decreto 25 novembre 2008 di disciplina delle modalità di erogazione dei finanziamenti a tasso agevolato del Fondo rotativo., in: M. dell'Ambiente (Ed.), 2011.
- [49] Regione Piemonte, Richiesta di chiarimenti riguardo alla disciplina normativa in materia di sonde geotermiche - vs. nota pro. n.61 del 23/05/2013, in: R.P.-D.A.-A.L.e. Amministrativa (Ed.) 8987/DB10.11, Torino, 2013, pp. 2.
- [50] Regione Piemonte, Piano di Tutela delle Acque della Regione Piemonte, in, Regione Piemonte, 2007.
- [51] UNI, UNI/TS 11300: Parte 4. Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per riscaldamento di ambienti e preparazione acqua calda sanitaria., in, 2012.
- [52] M. Gorla, Pozzi per acqua. Manuale tecnico di progettazione, Dario Flaccovio Editore, 2010.
- [53] G. Ansaldi, B. Maffeo, Carta idrogeologica della Provincia di Cuneo - note illustrative, in: P.d. Cuneo (Ed.), Provincia di Cuneo, Cuneo, 1979.
- [54] G. Stampfli, G.D. Borel, R. Marchant, J. Mosar, Western Alps geological constraints on western Tethyan reconstructions, *Journal of the Virtual Explorer*, 8 (2002) 77-106.

- [55] AA.VV., Dominio Pennidico, in: Wikipedia (Ed.), 2015.
- [56] ARPA Piemonte, Carta della litologia - scala 1:100000, in: ARPA Piemonte (Ed.), ARPA Piemonte.
- [57] M.V. Civita, B. Vigna, M. De Maio, A. Fiorucci, S. Pizzo, M. Gandolfo, C. Banzato, S. Menegatti, M. Offi, D. Musciacchio, M. Agnello, Studio e valutazione della vulnerabilità intrinseca delle acque sotterranee in Provincia di Cuneo, Provincia di Cuneo, 2005.
- [58] G. Bono, M. Barbero, Carta ecologica della Provincia di Cuneo, in: R.P.-A.a.e. foreste (Ed.), 1976.
- [59] S. Signorelli, T. Kohl, Regional ground surface temperature mapping from meteorological data, *Global and Planetary Change*, 40 (2004) 267-284.
- [60] P. Claps, P. Giordano, G. Laguardia, Spatial distribution of the average air temperatures in Italy: Quantitative analysis, *J Hydrol Eng*, 13 (2008) 242-249.
- [61] P. Blum, G. Campillo, T. Kölbl, Techno-economic and spatial analysis of vertical ground source heat pump systems in Germany, *Energy*, 36 (2011) 3002-3011.
- [62] A. Casasso, Low enthalpy geothermal systems: coupled flow and heat transport modelling of the long-term performances of Borehole Heat Exchangers, in: DIATI, Politecnico di Torino, Torino, 2012, pp. 112.
- [63] A.C. Chiasson, S.J. Rees, J.D. Spitler, A Preliminary Assessment of the Effects of Ground-Water Flow on Closed-Loop Ground-Source Heat Pump Systems, *ASHRAE Transactions*, 106 (2000) 380-393.
- [64] S.E. Dehkordi, R. Schincariol, Effect of thermal-hydrogeological and borehole heat exchanger properties on performance and impact of vertical closed-loop geothermal heat pump systems, *Hydrogeol J*, 22 (2014) 189-203.
- [65] E. Di Sipio, A. Galgaro, E. Destro, G. Teza, S. Chiesa, A. Giaretta, A. Manzella, Subsurface thermal conductivity assessment in Calabria (southern Italy): a regional case study, *Environmental Earth Sciences*, (2014) 1-19.
- [66] W. Zhan, W. Ju, S. Hai, G. Ferguson, J. Quan, C. Tang, Z. Guo, F. Kong, Satellite-Derived Subsurface Urban Heat Island, *Environ Sci Technol*, 48 (2014) 12134-12140.
- [67] K. Menberg, P. Bayer, K. Zosseder, S. Rumohr, P. Blum, Subsurface urban heat islands in German cities, *Science of the Total Environment*, 442 (2013) 123-133.
- [68] K. Menberg, P. Blum, A. Schaffitel, P. Bayer, Long-Term Evolution of Anthropogenic Heat Fluxes into a Subsurface Urban Heat Island, *Environ Sci Technol*, 47 (2013) 9747-9755.
- [69] ARPA Piemonte, Indagine geotermometrica sui piezometri della rete di monitoraggio quantitativa regionale, in, 2009, pp. 1-35.
- [70] M. Ouzzane, P. Eslami-Nejad, M. Badache, Z. Aidoun, New correlations for the prediction of the undisturbed ground temperature, *Geothermics*, 53 (2015) 379-384.
- [71] VDI, VDI 4640 - Thermal use of underground, in: Blatt 1: Fundamentals, approvals, environmental aspects, 2010.
- [72] A. Casasso, R. Sethi, G.POT: a quantitative method for the assessment and mapping of the shallow geothermal potential, sottomessa a *Energy*, (2015).
- [73] N. Giordano, Ground Thermal Energy Storage: analogical and numerical modeling coupled with geophysical monitoring from laboratory to field scale, in, Università di Torino, Torino, 2015, pp. 236.
- [74] N. Giordano, C. Comina, G. Mandrone, The First Italian Experience of Ground Thermal Energy Storage: an Integrated Approach for Design and Monitoring, from Laboratory to Field Scale, in: World Geothermal Congress, Melbourne (Australia), 2015, pp. 1-12.
- [75] V.A. Fry, Lessons from London: Regulation of open-loop ground source heat pumps in central London, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 42 (2009) 325-334.
- [76] M.V. Civita, B. Vigna, M. De Maio, A. Fiorucci, S. Pizzo, M. Gandolfo, C. Banzato, S. Menegatti, M. Offi, B. Moitre, *Le acque sotterranee della pianura e della collina cuneese*, Scribo, 2011.
- [77] Regione Piemonte, D.G.R. n. 34-11524 del 3 Giugno 2009 - Cartografia della base dell'acquifero superficiale -, in: G.R.d. Piemonte (Ed.), 2009.
- [78] Regione Piemonte, D.D. n. 267 del 4/8/2011 - Aggiornamento della cartografia della base dell'acquifero superficiale, in: R. Piemonte (Ed.), 2011.
- [79] Regione Piemonte, D.D. n. 900 del 3/12/2012 - Aggiornamento della cartografia della base dell'acquifero superficiale, in: R. Piemonte (Ed.), 2012.

- [80] Regione Piemonte, Modelli digitali del terreno da CTRN 1:10000 (passo 10mt) - Modello altezze filtrato, in: Open Data Regione Piemonte, Regione Piemonte, Torino, 2000.
- [81] A. Di Molfetta, R. Sethi, Ingegneria degli Acquiferi, Springer, 2012.
- [82] F. Luigi, Comune di Alba (CN) - Piano Regolatore Generale Comunale - Allegato 4.1.4 (Carta geoidrologica), in, Comune di Alba, Alba, 2013.
- [83] K. Rafferty, Scaling in Geothermal Heat Pump Systems, in: U.D.o. Energy (Ed.), US Department of Energy - Idaho Operations Office Idaho Falls, 1999.
- [84] G. Ansaldo, B. Maffeo, Inventario delle risorse idriche della Provincia di Cuneo - Parte VI - Le acque sotterranee della pianura cuneese (alla sinistra della Stura di Demonte), in: P.d. Cuneo (Ed.), 1981, pp. 117.