

GEOSCAMBIO NELLA PROVINCIA AUTONOMA DI TRENTO

Progetto GEOTERM

Metodi e strumenti di analisi e monitoraggio
per la caratterizzazione del comportamento termofisico del sottosuolo



GEOSCAMBIO NELLA PROVINCIA AUTONOMA DI TRENTO

Progetto GEOTERM

Metodi e strumenti di analisi e monitoraggio
per la caratterizzazione del comportamento termofisico del sottosuolo

Progetto finanziato dall'Agenzia Provinciale per l'Incentivazione Attività Economiche (APIAE) con provvedimento del Dirigente nr. 315 di data 31 maggio.

Progetto

Coordinatore

Fondazione Bruno Kessler
Centro Materiali e Microsistemi - CMM
Unità ARES | Applied Research on Energy Systems
Via Sommarive, 18
38123 Trento

Partner

Università degli Studi di Padova
Dipartimento di Geoscienze
Via Gradenigo, 6
35131 Padova

Gruppo di lavoro tecnico

Diego Viesi, Fondazione Bruno Kessler
Luigi Crema, Fondazione Bruno Kessler
Alberto Zanetti, Fondazione Bruno Kessler
Antonio Galgaro, Università degli Studi di Padova
Paolo Scotton, Università degli Studi di Padova

In collaborazione con

Servizio Geologico della Provincia Autonoma di Trento
Si ringrazia in particolare la Geol. Paola Visintainer, responsabile del settore Geotermia

ISBN 978-88-98989-26-3
e-ISBN 978-88-98989-25-6

Il presente testo è rilasciato nei termini della licenza Creative Commons Attribuzione - Non Commerciale - Non opere derivate 3.0 Italia (CC BY-NC-ND 3.0 IT : <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/it/legalcode>)

Nel caso di riproduzione, anche parziale, di immagini, testi e/o contenuti della presente opera si raccomanda esplicita citazione in questa forma:
Viesi D., Galgaro A., Visintainer P., Crema L. (2016). Progetto GEOTERM: Geoscambio nella Provincia Autonoma di Trento

© FBK, Trento 2016

Indice

1	Premessa	6
2	Il terreno come sorgente di energia	9
2.1	La capacità termica: abilità di immagazzinare calore	10
2.2	Movimento di calore	10
2.2.1	Conduzione	11
2.2.2	Convezione	11
2.3	Il gradiente geotermico	12
3	Il sistema di geoscambio	13
3.1	Scambiatore di calore con il terreno	14
3.1.1	Scambiatori orizzontali	14
3.1.2	Scambiatori verticali	15
3.1.3	Ground Response Test (GRT)	18
3.1.4	Circuito aperto con acqua di falda	18
3.2	Pompa di calore	19
3.3	I terminali di impianto per il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici	21
3.4	Lo storage termico nel sottosuolo, i sistemi UTES	23
3.5	Il geoscambio in Provincia di Trento: normativa e numerosità degli impianti	24
4	Inquadramento geologico ed idrogeologico della Provincia di Trento	27
4.1	L'idrogeologia della Valle dell'Adige	29
5	Progetto GEOTERM: metodologia e banca dati	30
5.1	Database climatico	32
5.2	Database idrogeologico	33
5.3	Database litostratigrafico	35
6	Progetto GEOTERM: cartografia	38
6.1	Caratteristiche climatiche	38
6.2	Radiazione solare globale	42
6.3	Potenza termica e fabbisogni energetici per il riscaldamento	43
6.4	Caratteristiche idrogeologiche	48
6.5	Proprietà termofisiche del sottosuolo	56
6.6	Flusso di calore e gradiente geotermico superficiale	63
6.7	Potenziale di geoscambio per impianti a sonde geotermiche verticali (SGV)	64
6.8	Potenziale di geoscambio per impianti a circuito aperto	71
6.9	Potenziale per l'accumulo di calore solare nel sottosuolo	72
7	Appendici	75

7.1	Analisi delle proprietà termofisiche delle principali unità litostratigrafiche del Comune di Trento ...	75
7.1.1	Il campionamento	75
7.1.2	Taglio dei campioni	77
7.1.3	Sezioni sottili	77
7.1.4	Misure di densità e porosità	78
7.1.5	Analisi termiche	79

Bibliografia	80
---------------------------	-----------

1 Premessa

Il progetto GEOTERM si propone di valutare **l'idoneità e le potenzialità del territorio della Provincia Autonoma di Trento ad ospitare diffusamente impianti di scambio termico con il sottosuolo accoppiati a pompa di calore per la climatizzazione (sistemi di geoscambio)** e di fornire, in forma cartografica, i risultati del lavoro. La realizzazione della **mappa del potenziale di geoscambio** del territorio provinciale rappresenta appunto uno degli obiettivi dello studio, costituendo uno strumento flessibile e dinamico, utile alla corretta progettazione degli impianti di geoscambio, nonché allo sviluppo responsabile e sostenibile di questa tecnologia.

La differenza di temperatura tra l'aria ed il sottosuolo rende quest'ultimo una risorsa energetica che può essere valorizzata non solo in inverno come conveniente fonte di calore, ma anche in estate come possibile serbatoio freddo per il raffrescamento degli edifici. Ai fini della climatizzazione, la pompa di calore è la macchina termica che consente il trasferimento di calore da e verso il sottosuolo. Con elevata efficienza energetica è in grado di **soddisfare interamente, in ogni stagione dell'anno, i fabbisogni di riscaldamento, raffrescamento e acqua calda sanitaria** dell'edificio asservito.

La soluzione geotermica è tra le opzioni più valide per **ridurre la dipendenza dall'importazione di risorse energetiche fossili, ridurre le emissioni clima-alteranti e migliorare l'efficienza energetica nella climatizzazione** degli edifici. I risultati del Progetto GEOTERM rappresentano anche un ottimo punto di partenza per affermare il nuovo paradigma energetico legato alla **generazione diffusa e distribuita di energia da fonti rinnovabili locali**.

In Provincia di Trento, il Piano energetico-ambientale (PEAP) 2013-2020 [1] delinea per le pompe di calore uno scenario che prevede l'incremento di produzione di energia termica da 1 a 10 ktep nell'ipotesi prudenziale e da 1 a 25 ktep secondo una configurazione ottimistica, sempre al 2020. Ne viene quindi riconosciuto un ruolo di forte sviluppo, ruolo che dovrà ulteriormente rafforzarsi per il raggiungimento degli ancor più ambiziosi obiettivi fissati dalla strategia energetica dell'Unione Europea per il 2030 (- 40 % gas a effetto serra rispetto ai livelli del 1990 [2]) e per il 2050 (- 80 ÷ 95 % gas a effetto serra rispetto ai livelli del 1990 [3]).

Le pompe di calore forniscono il necessario fabbisogno di climatizzazione prelevandolo da una fonte esterna rinnovabile (sottosuolo, acqua di falda, aria), attraverso un processo termodinamico di evaporazione e condensazione che richiede il consumo di elettricità o gas per compiere lavoro presso il compressore. Nella Provincia di Trento la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili, in particolare grazie all'abbondante

risorsa idroelettrica, eccede la domanda. Da qui, la possibilità di elettrificare la domanda termica degli edifici può costituire un'ottima opportunità nel processo di transizione energetica, svincolando totalmente, nel medio-lungo periodo, il territorio trentino dall'utilizzo di fonti fossili climalteranti (prodotti petroliferi, gas).

Le pompe di calore geotermiche sono già una realtà consolidata da alcuni decenni in diversi Paesi Europei, primi tra tutti la Svizzera, la Svezia, l'Austria e la Germania. Solo recentemente in Italia si è destato un certo interesse, che appare crescente, verso tale soluzione tecnica. L'interesse è strettamente legato ad una maggior conoscenza della tecnologia sia da parte dei tecnici che del pubblico, a forme di incentivazione che la rendono economicamente attraente, a normative per la progettazione energetica degli edifici nuovi o sottoposti a ristrutturazioni rilevanti che ne premiano la sostenibilità.

In Provincia di Trento esiste una normativa di settore (per i sistemi geotermici a circuito chiuso) dal 2009, comprensiva di una cartografia che ne vincola la collocazione in virtù di principi di tutela idrogeologica. Dal 2009 gli impianti realizzati e funzionanti sono ormai centinaia e il trend di realizzazione appare costante, nonostante la crisi economica.

Nel nostro Paese, la **promozione dell'efficienza energetica e delle energie rinnovabili** trova un ruolo rilevante anche nelle pompe di calore, sostenute mediante:

- gli incentivi previsti dal DM 28 dicembre 2012, cosiddetto "Conto Termico", ora "Conto Termico 2.0";
- i Titoli di Efficienza Energetica (TEE), anche noti come Certificati Bianchi;
- le agevolazioni fiscali per il risparmio energetico (attualmente al 65% fino al 31.12.2016);
- la possibilità di installare un contatore elettrico dedicato per le pompe di calore e la possibilità di accedere alla sperimentazione tariffaria D1.

In campo edilizio le normative stanno indirizzando la **progettazione energetica degli edifici nuovi o sottoposti a ristrutturazioni rilevanti** verso il **progressivo incremento dell'integrazione delle fonti rinnovabili**. In base al Dlgs 28/2011 dal 1° gennaio 2017 gli impianti di produzione di energia termica devono essere progettati e realizzati in modo da garantire il contemporaneo rispetto della copertura, tramite il ricorso ad energia prodotta da impianti alimentati da fonti rinnovabili, del 50% dei consumi previsti per l'acqua calda sanitaria, il riscaldamento e il raffrescamento. Per gli edifici pubblici gli obblighi di integrazione sono incrementati del 10%. In tal senso le pompe di calore geotermiche garantiscono un'elevata integrazione di fonti rinnovabili (anche oltre il 70%) per i fabbisogni di climatizzazione e acqua calda sanitaria, possono essere applicate pressoché ovunque, non risentono di fluttuazioni di produzione giornaliere o stagionali

(come ad esempio la risorsa solare o eolica), sono economicamente attrattive (nel caso possano usufruire di incentivazioni).

Alla luce sia degli impegni nella transizione energetica che degli obblighi normativi sempre più stringenti, nonché considerando le potenzialità nella sinergia tra l'utilizzo delle pompe di calore geotermiche e l'abbondante generazione elettrica rinnovabile del territorio trentino, **i risultati del presente lavoro potranno costituire un importante strumento di pianificazione energetica** per gli anni a venire.

Numerose cartografie ad elevata risoluzione spaziale e un ampio database arricchiscono questo studio: l'analisi microclimatica e della radiazione solare, la valutazione della potenza termica e dei fabbisogni energetici per il riscaldamento, la caratterizzazione delle proprietà termofisiche e termo-idrogeologiche del sottosuolo (conducibilità termica, capacità termica, gradiente geotermico, temperatura indisturbata e assetto termico ed idraulico degli acquiferi superficiali nella Valle dell'Adige). Da esse è stato valutato il **potenziale di geoscambio per impianti a sonde geotermiche verticali, per impianti a circuito aperto e per l'accumulo di calore solare nel sottosuolo.**

L'intero studio rappresenta non solo un valido **strumento di supporto per la progettazione geotermica** ma anche un **contributo alla conoscenza e tutela del sottosuolo**. Infatti, ogni possibile utilizzo del sottosuolo, nello specifico della risorsa geotermica, deve essere opportunamente disciplinato e deve prevedere una specifica analisi dell'impatto sull'ambiente sotterraneo, che può essere condotto solo con una adeguata conoscenza delle caratteristiche geologiche ed idrogeologiche locali, al fine di poterne garantire la sostenibilità.

2 Il terreno come sorgente di energia

È indispensabile introdurre una prima precisazione sul significato di **geotermia**, che può indicare lo sfruttamento di un flusso termico derivante da fenomeni di carattere geologico o vulcanologico (sorgenti termali, soffioni...), utilizzabile per sola differenza di temperatura, oppure lo scambio di un flusso termico con il sottosuolo, inteso come massa di grande capacità termica e utilizzato come sorgente in un ciclo termodinamico, dal quale estrarre calore durante la stagione invernale ed al quale cederne durante quella estiva. Il primo tipo di geotermia concerne principalmente la **produzione di energia elettrica** o le **acque termali**, mentre il secondo tipo riguarda la possibilità di **climatizzare un edificio**, sia in regime di riscaldamento, che di raffrescamento (Figura 1) [4].



Figura 1: Possibili usi dell'energia geotermica, in base alla temperatura dei fluidi disponibili [4]

Grazie alla sua **elevata inerzia termica**, con l'aumentare della profondità il terreno risente in modo sempre più smorzato e sfasato nel tempo delle fluttuazioni termiche giornaliere e stagionali dell'aria esterna. La sua **temperatura** può essere considerata, in prima approssimazione e al di sotto di qualche metro di profondità, pressoché **costante tutto l'anno**: l'ampiezza dell'escursione termica giornaliera si riduce a un decimo a circa 3,5 m di profondità, mentre quella dell'escursione termica stagionale si riduce dello stesso fattore a circa 6 m di profondità (Figura 2) [5].

In termini più elementari si può osservare come, a partire da una certa profondità, il terreno risulti più caldo dell'aria esterna in inverno e più freddo durante i mesi estivi; dunque si rivela conveniente sfruttare questa circostanza, facendo in modo di trasferire il calore all'interno dell'edificio o da questo al terreno secondo le esigenze stagionali. Il livello termico a cui si trova il sottosuolo non è però quasi mai sufficiente a garantire la completa copertura delle esigenze termo-frigorifere dell'utenza, risultando quindi necessario il contributo

della pompa di calore per la quota energetica mancante, che spesso si aggira attorno al 25% del fabbisogno, essendo il restante 75% fornito dal sottosuolo [4].

Poiché ciò che avviene è un vero e proprio scambio di energia termica da e verso il sottosuolo (che, nell'arco di funzionamento annuale ha la capacità di rigenerarsi), si preferisce usare il termine **“sistema di geoscambio”**.

2.1 La capacità termica: abilità di immagazzinare calore

La **capacità** di un mezzo (solido, liquido o gas) di **immagazzinare calore** è definita come **capacità termica specifica (S_C)**. Questa è la quantità di calore racchiusa nel mezzo per ogni grado Kelvin di temperatura (misurata in $J K^{-1} kg^{-1}$) [6]. Possiamo anche esprimere la capacità termica per unità di volume. In questo caso si parla di **capacità termica volumetrica (S_{VC})** e la conversione è data da:

$$S_{VC} = \rho * S_C$$

dove ρ è la densità del materiale in questione. Per l'acqua, S_{VC} è circa $4,2 MJ K^{-1} m^{-3}$ a $15 - 20 ^\circ C$, mentre la maggior parte delle rocce e sedimenti saturi presenta valori di S_{VC} nell'intervallo $1,9 - 2,5 MJ K^{-1} m^{-3}$. Quindi, da ogni metro cubo di roccia, possiamo accumulare o rilasciare fino a 10 MJ di energia, semplicemente facendo salire o scendere la sua temperatura di circa 4 K.

Si noti che, poiché la S_{VC} dell'acqua è particolarmente elevata, l' S_{VC} di rocce porose, suoli e sedimenti sciolti dipende fortemente dal contenuto di umidità. Rocce e sedimenti saturi possono raggiungere capacità termiche volumetriche elevate, fino a $2,5 MJ K^{-1} m^{-3}$, se invece in condizioni anidre presentano valori molto bassi, anche inferiori a $1,5 MJ K^{-1} m^{-3}$.

2.2 Movimento di calore

Non è sufficiente sapere che nel sottosuolo le rocce, i sedimenti e le acque sotterranee immagazzinano calore, abbiamo anche bisogno di capire come il sottosuolo assorbe e cede calore, e come possiamo indurre il calore a trasferirsi nei luoghi e nei modi da poter essere utilizzato. Il calore può muoversi mediante tre meccanismi principali: conduzione, convezione, radiazione.

Nel sottosuolo più superficiale, la conduzione attraverso le matrici solide minerali e la convezione operata dalle acque sotterranee costituiscono i due principali meccanismi di flusso di calore.

2.2.1 Conduzione

La **conduzione termica** descrive il processo attraverso il quale il **calore si diffonde** attraverso un solido, liquido o gas **per processi di interazione molecolare, legata alla trasmissione di moti vibrazionali senza spostamento di massa**. È questo processo che la **legge di Fourier** descrive mediante l'equazione:

$$Q = -\lambda * A * \frac{d\theta}{dx}$$

dove:

Q = flusso di calore in Joule al secondo, che equivale a Watt ($J s^{-1} = W$);

λ = conducibilità termica del materiale ($W m^{-1} K^{-1}$);

A = sezione trasversale del materiale attraverso cui avviene il flusso di calore (m^2);

θ = temperatura ($^{\circ}C$ o K);

x = distanza nella direzione di diminuzione della temperatura (si noti che il flusso di calore avviene in direzione di temperatura decrescente: da qui il segno negativo nell'equazione);

$\frac{d\theta}{dx}$ = gradiente di temperatura ($K m^{-1}$).

La conducibilità termica descrive l'attitudine di un mezzo nel condurre calore: la conducibilità termica delle rocce tende a rientrare in un intervallo piuttosto ristretto, tipicamente tra 1 e 3 $W m^{-1} K^{-1}$. Tra i minerali che più comunemente formano le rocce, il quarzo ha fra i più elevati valori di conducibilità termica, circa 7 $W m^{-1} K^{-1}$. La conducibilità termica dei minerali è in generale abbastanza buona, l'acqua ha una conducibilità termica inferiore (0,6 $W m^{-1} K^{-1}$), mentre l'aria presenta valori molto bassi (0,024 $W m^{-1} K^{-1}$). Così, i migliori conduttori geologici sono rocce a bassa porosità, con una struttura cristallina ad alto contenuto di quarzo, come il granito (valor medio 3,2 $W m^{-1} K^{-1}$). Sedimenti sciolti porosi, dove i pori sono saturi d'acqua, sono conduttori intermedi, con valori che rientrano generalmente nell'intervallo 1,8 – 2,4 $W m^{-1} K^{-1}$. I peggiori conduttori sono sedimenti porosi anidri, con valori medi nell'intervallo 0,4 – 0,5 $W m^{-1} K^{-1}$.

2.2.2 Convezione

I fluidi immagazzinano calore: per esempio, l'acqua è in grado di immagazzinare 4180 $J L^{-1}$ per ogni $^{\circ}C$ di temperatura di aumento. Il **trasporto di calore** che si verifica **per effetto dello spostamento di massa** è definito **convezione**. Generalmente tale sistema di trasporto termico viene operato dai fluidi che occupano

gli spazi intergranulari dei sedimenti o le fratture di sistemi rocciosi, il cui moto è generato da un gradiente idraulico gravitazionale.

2.3 Il gradiente geotermico

La temperatura del sottosuolo più superficiale è ampiamente controllata dalla temperatura media annua dell'aria, il calore che si estrae con un sistema di geoscambio in modalità riscaldamento è in gran parte derivato dall'energia solare assorbita dalla superficie terrestre. La superficie terrestre agisce come un enorme collettore solare. Tuttavia, vi è anche una componente minore legata al **flusso di calore geotermico**, proveniente dal mantello e dal nucleo terrestre. Ciò si manifesta come un gradiente di temperatura geotermico, sovrapposto alla temperatura media annuale dell'aria esterna (Figura 2).

Il **gradiente geotermico**, o “aumento della temperatura del sottosuolo con la profondità”, al di fuori di aree attive anomale, ricade normalmente nell'intervallo $0,01 - 0,03 \text{ } ^\circ\text{C m}^{-1}$, cioè circa **1 - 3 $^\circ\text{C}$ ogni 100 m**. L'intervallo di intensità corrispondente del flusso di calore geotermico si attesta a circa $40 - 100 \text{ m W m}^{-2}$.

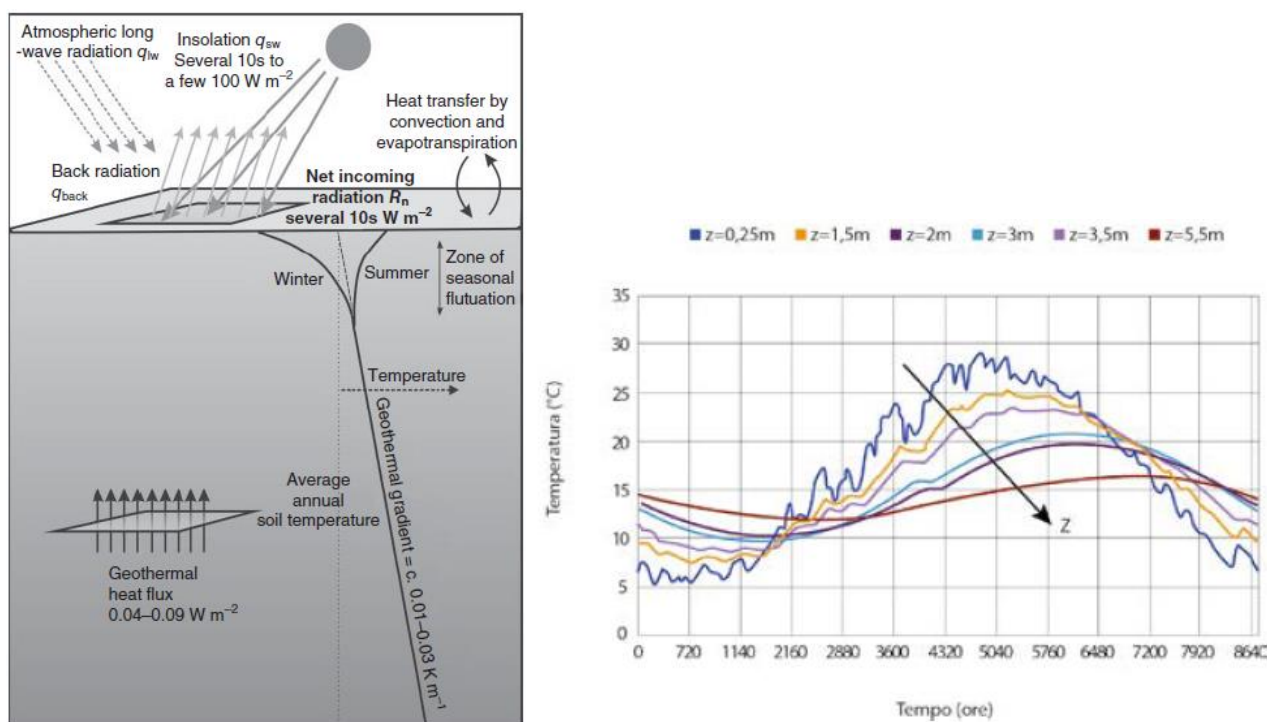


Figura 2: A sinistra: blocco schematico dei flussi di calore e delle temperature che coinvolgono il sottosuolo più superficiale [6]. A destra: profili di temperatura a varie profondità (z) nelle diverse stagioni dell'anno [5]

3 Il sistema di geoscambio

Un impianto che si avvale degli scambi termici con il sottosuolo per la climatizzazione di edifici è detto sistema di geoscambio ed è sostanzialmente composto da (Figura 3) [4]:

- **scambiatore di calore** con il terreno, oppure **pozzo** per le acque sotterranee;
- **pompa di calore** che scambia calore con il fluido termovettore lato sorgente e lato utenza;
- **accumulo termico** per sopperire all'impossibilità di poter produrre istantaneamente tramite pompa di calore il fabbisogno termico richiesto;
- **sistema di distribuzione ed erogazione del calore o del freddo**, comprendente i terminali di impianto (ventilconvettori, pavimenti radianti, etc.).

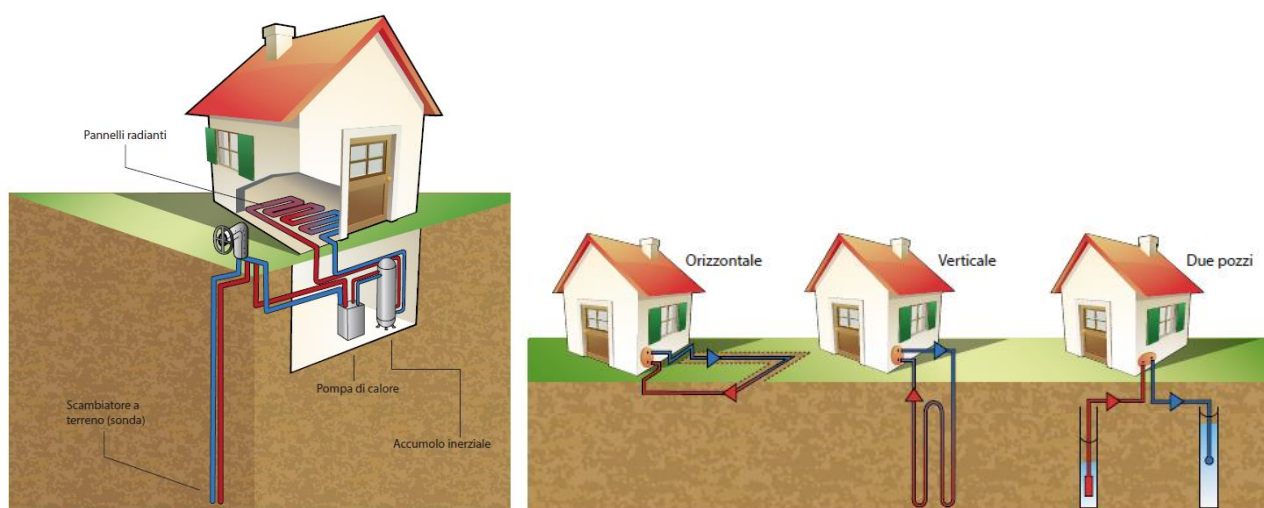


Figura 3: A sinistra: Tipica configurazione di un sistema GSHP con sonda geotermica verticale. A destra: Esempi di scambiatori di calore con il terreno (da sx): orizzontale, verticale, pozzi di estrazione e restituzione di acque sotterranee [4]

Diffusamente applicate da ormai più di una decina d'anni in diversi Paesi europei (primi tra tutti Svizzera, Svezia, Austria, Germania), queste soluzioni tecnologiche stanno sempre più iniziando ad affermarsi anche in Italia, specialmente sulla scia di normative sempre più stringenti per la progettazione energetica degli edifici nuovi o sottoposti a ristrutturazioni rilevanti. In tal senso le pompe di calore geotermiche garantiscono un'elevata integrazione di fonti rinnovabili (anche oltre il 70%) per soddisfare i fabbisogni di climatizzazione e acqua calda sanitaria, possono essere applicate pressoché ovunque, non risentono di fluttuazioni di produzione giornaliere o stagionali (come ad esempio la risorsa solare o eolica), possono risultare economicamente attrattive se ben dimensionate e nel caso possano accedere a forme incentivanti.

3.1 Scambiatore di calore con il terreno

Lo scambiatore di calore con il terreno consiste di tubi in polietilene percorsi da un fluido termovettore e sepolti nel terreno, disposti in una configurazione orizzontale in trincea alla profondità tipica di 1,2-2,0 m (scambiatore di calore orizzontale), oppure in una configurazione verticale all'interno di un foro trivellato della profondità tipica compresa tra 50 e 150 m (scambiatore di calore verticale). Un'altra opzione è costituita dai pozzi per le acque sotterranee, in cui il calore è estratto da (o ceduto a) l'acqua pompata dal terreno (sistemi aperti) [4].

3.1.1 Scambiatori orizzontali

Una delle forme più economiche di circuito chiuso è l'utilizzo di **scambiatori orizzontali**, installati in una trincea. La **profondità ottimale** per tale trincea viene considerata **1,2-2 m**. Questa tipologia è:

- facilmente installabile con un escavatore meccanico;
- abbastanza in profondità per fornire un sufficiente (anche se modesto) accumulo termico in grado di sostenere un riscaldamento in regime invernale e per evitare che il circuito congeli a causa delle condizioni termiche più critiche del periodo invernale;
- non troppo profondo da impedire al calore solare di penetrare e ricostituire l'accumulo termico durante i mesi estivi.

Come regola generale, un **singolo tubo diritto in PE**, installato in una trincea, è giudicato in grado di supportare una capacità alla pompa di calore di 15 - 30 W m⁻¹ in modalità riscaldamento (ossia **33 - 67 m per kW** installato), a seconda del tipo di terreno, del contenuto di umidità e della lunghezza del periodo di riscaldamento [6].

Per aumentare questa resa, è pratica comune seppellire non semplicemente un singolo tubo in PE nella trincea, ma bobine di tubi sovrapposti. Questa disposizione va sotto il nome di **“slinky”**. Tali dispositivi sono formati da tubi in PE a spirale e sono in genere installati in relativamente ampie trincee, con un diametro della bobina di circa 0,6-1 m. Diverse fonti sostengono rese piuttosto diverse per le slinkies, di solito si citano valori di circa **10 - 15 m di trincea slinky per kW** di pompa di calore installata. Nei casi in cui è installata più di una trincea slinky, le trincee parallele dovrebbero essere distanti almeno 3 m, preferibilmente 5 m [6].

Quando il circuito orizzontale viene usato principalmente per il raffreddamento piuttosto che per riscaldare, un approccio più cauto deve essere necessario, in quanto (1) il tubo interrato deve essere sufficiente per

cedere sia il calore emesso dal compressore che quello estratto dall'edificio e (2) lo scarico del calore nel terreno può tendere a disidratare il terreno, riducendo la sua conducibilità termica e la sua capacità termica.



Figura 4: Esempi di circuito chiuso con scambiatori orizzontali: singolo tubo diritto (sx), slinky (dx)

3.1.2 Scambiatori verticali

Nonostante gli scambiatori orizzontali siano caratterizzati da un minor costo, la maggior parte dei sistemi installati utilizza **scambiatori verticali**, i quali sono in grado di assicurare **migliori prestazioni** e, soprattutto, hanno **richieste di spazio libero in superficie di gran lunga inferiori**.

Negli scambiatori verticali, tipicamente, il materiale utilizzato per la realizzazione dei tubi, a singola o doppia U con diametro esterno generalmente compreso tra 26 e 40 mm, è polietilene ad alta densità (HDPE), che ne garantisce una **vita media di almeno 50 anni alle condizioni tipiche di pressione e temperatura di esercizio**.

Il fluido termovettore è acqua o una soluzione di acqua e fluido antigelo se è previsto di raggiungere temperature inferiori ai 0°C. L'**antigelo** può essere glicole etilenico, glicole propilenico, metanolo, etanolo, cloruro di sodio, cloruro di calcio, acetato di potassio. Punti di congelamento compresi tra - 10 e - 20 °C sono tipici; una soluzione con glicole etilenico ha un punto di congelamento di - 11 °C al 25% e - 18 °C al 33%. Risulta comunque preferibile l'utilizzo di glicole propilenico (o meglio sola acqua) in quanto meno tossico e più ecocompatibile nel raro caso di danneggiamento delle sonde e perdita di fluido termovettore nel sottosuolo.

La **portata** e il diametro del tubo sono selezionati in modo tale che:

- condizioni di flusso transitorio-turbolento vengano raggiunte nel fluido termovettore che circola nelle sonde a terreno (condizioni turbolente facilitano il trasferimento di calore dal terreno al fluido o viceversa);

- perdite di carico idraulico (e quindi energia spesa nella circolazione di pompaggio) siano mantenute accettabilmente basse;
- la portata sia compatibile con il miglior funzionamento della pompa di calore, in modo che questa possa soddisfare la domanda di riscaldamento/raffrescamento dell'edificio con le migliori performance energetiche complessive dell'impianto.

Sono tipiche portate di 3-3,5 L min⁻¹ per ogni kW di calore trasferito. Sotto tipiche condizioni operative di picco in modalità riscaldamento, sarebbe opportuno non superare un minimo nella temperatura media del fluido termovettore compreso tra 0 e - 2 °C. Ad esempio, la temperatura di mandata potrebbe essere compresa tra - 3 e - 4 °C e la temperatura di ritorno circa 0 °C.

Si noti che **vi è sempre un compromesso tra la temperatura di circolazione lato sottosuolo e l'efficienza della pompa di calore**. Nella modalità riscaldamento, le temperature basse aumentano la conduzione di calore nel sottosuolo (maggior resa per metro di tubo), ma ciò si traduce in un inferiore COP_H della pompa di calore. In ultima analisi esiste un compromesso tra il costo capitale (metri di scambiatore di calore installato nel terreno) e i costi di gestione / emissioni di CO₂.

Lo spazio tra il tubo a U e la parete del foro (con diametro tipico di 120-150 mm) è solitamente colmato con apposita **malta di riempimento** che permette di isolare tra loro le formazioni acquifere, impedendo la loro interconnessione. Una buona malta di riempimento dovrebbe aderire bene sia al tubo sia alle pareti del foro, senza lasciare cavità che potrebbero indebolire anche considerevolmente il trasporto di calore. Sono disponibili sul mercato malte speciali, con dichiarate conducibilità termiche.

Attualmente, la realizzazione di sonde geotermiche verticali è offerta da vari operatori con soluzioni standard, testate e certificate. Anche le malte di riempimento, i tubi di connessione, i collettori e le pompe di circolazione sono progettati specificatamente per l'applicazione geotermica.

Progetto, installazione e messa in esercizio di tutti i tipi di scambiatori di calore con il terreno sono descritti in dettaglio nello **standard tedesco VDI 4640** [7], di cui è disponibile la traduzione in inglese. Una versione semplificata di alcune delle norme VDI 4640 è stata incorporata nel nuovo standard UNI EN 15450 "*Sistemi di riscaldamento degli edifici – Progetto di sistemi con pompe di calore*" [8]. Inoltre, paesi in cui il mercato è maturo hanno proprie regolamentazioni, è il caso di Svezia e Svizzera. In Italia, una fonte gratuita di informazioni tecniche è fornita dalle linee guida per la progettazione dei campi geotermici per pompe di calore, edito dall'RSE [9].

Le **performance di un sistema geotermico a circuito chiuso** dipendono essenzialmente dai seguenti aspetti:

1. Conducibilità termica, capacità termica e temperatura del sottosuolo;
2. Caratteristiche degli eventuali acquiferi intercettati dalle sonde (geometria, direzione e velocità);
3. Modello operativo del campo sonde: ad esempio il numero di ore equivalenti a picco di potenza per la stagione di riscaldamento invernale e per la stagione di raffrescamento estiva e la durata delle fasi a picco di potenza a base giornaliera;
4. La temperatura del fluido termovettore nelle sonde geotermiche;
5. L'efficienza della pompa di calore;
6. L'interferenza tra le sonde geotermiche.

Le linee guida tedesche VDI 4640 indicano come, in condizioni operative standard di riscaldamento, uno scambiatore verticale giunge a una potenza nell'unità di lunghezza di **20-70 W/m**, in funzione della **geologia del sottosuolo e della saturazione degli acquiferi**. Nel caso in cui esista un rilevante **flusso di acque sotterranee**, è possibile giungere a valori di scambio termico in sonda anche superiori ai **100 W/m**.

Nel momento in cui si installano più scambiatori verticali è necessario considerare l'effetto di **interferenza termica** fra le diverse sonde che compongono il campo di geoscambio. Ciò comporta di norma un sovradimensionamento tanto più elevato quanto più vicini sono fra loro gli scambiatori, in funzione della conducibilità termica del sottosuolo, della profondità delle sonde e del grado di saturazione del terreno. **L'esperienza svizzera** consiglia una **distanza dai 7-8 fino ai 10 m**. Ipotizzando l'installazione di campi sonde molto consistenti, in una configurazione a nido d'ape, lo spazio di superficie dedicata necessario per l'installazione di ogni sonda è pari ad almeno 50 m².



Figura 5: Campo di sonde geotermiche verticali immediatamente dopo il completamento

Infine, esistono alcuni pacchetti software atti alla progettazione di sistemi geotermici, fra questi può annoverarsi **Earth Energy Designer (EED)**, sviluppato dall'Università di Lund (Svezia), nel quadro di una collaborazione tedesco-svedese [10].

3.1.3 Ground Response Test (GRT)

Nei sistemi a circuito chiuso di potenza elevata, dove un sovradimensionamento degli scambiatori di calore a terreno potrebbe dar luogo a forti penalizzazioni dei costi, e viceversa una sottostima potrebbe comprometterne la funzionalità e l'efficienza, **le proprietà termiche del terreno e le capacità di scambio termico del sistema sonda-terreno, possono essere sperimentalmente analizzate mediante un Ground Response Test (GRT)** [4]. In genere, un GRT viene svolto dopo qualche settimana dalla realizzazione della prima SGV, ovvero una volta che il materiale di cementazione della sonda geotermica si è stabilizzato e posto in equilibrio termico con il terreno al suo intorno. Lo scopo di tale prova sperimentale di campo consiste nel fornire le informazioni indispensabili per poter dimensionare correttamente il campo sonde in relazione ai carichi termo-frigoriferi che il campo stesso dovrà supportare.

La prova GRT consiste nel sollecitare il terreno con un impulso termico a potenza il più possibile costante e per un periodo di tempo tale da assicurare che il sistema sonda-terreno raggiunga una situazione stazionaria di equilibrio termico. La **durata** raccomandata è pari ad **almeno 72 ore**. Durante un GRT, una potenza termica costante viene trasferita al fluido termovettore (acqua) che circola in una SGV. Durante la prova vengono misurati portata, potenza termica, temperatura del fluido in ingresso ed uscita alla sonda. Viene inoltre preliminarmente misurata la temperatura media del terreno in condizioni indisturbate, misurando la temperatura del fluido all'interno della sonda, che si trova in condizioni di equilibrio termico con il sottosuolo, con semplice circolazione del fluido termovettore senza stimolazione termica. La conducibilità termica efficace e la resistenza termica della SGV sono due parametri che possono essere ricavati dalla prova GRT mediante un'approssimazione di tipo "sorgente lineare" (approccio analitico), oppure possono essere stimati, con un approccio più complesso e rigoroso, mediante adattamento dei risultati dei transienti di temperatura, ottenuti mediante simulazione numerica, a quelli misurati sperimentalmente (metodo cilindrico).

3.1.4 Circuito aperto con acqua di falda

Tra le sorgenti termiche per le pompe di calore, laddove disponibile, **l'acqua sotterranea rappresenta una valida soluzione**, in alcuni casi la miglior soluzione sia dal punto di vista energetico che economico. Ciò che differenzia tale tipologia di sistemi da quelli a circuito chiuso è la possibilità di impiegarli nei soli casi in cui vi sia nella località di interesse una falda acquifera convenientemente utilizzabile (chimismo, profondità, portata ammissibile, compatibilità idropotabile, etc.).

Uno dei fattori limitanti l'impiego della risorsa idrica sotterranea, non di tipo geologico, è di tipo burocratico-amministrativo, necessitando di concessione specifica che richiede un iter complesso e articolato,

caratterizzato da lunghi tempi di risposta. Una nota a parte riguarda lo scarico dell'acqua di falda a valle dell'impiego geotermico, che, secondo prassi di preservazione quantitativa della risorsa, richiederebbe la restituzione nella stessa falda di prelievo, ma che nei vari casi può essere effettuato anche in collettori superficiali, qualora sussistano le condizioni locali di idoneità. Va notato che al momento non esistono norme nazionali di riferimento dedicate alla specifica materia, e che tali impieghi andrebbero disciplinati secondo normative certe e chiare.

Questo tipo di sistemi è relativamente semplice da realizzare ed è in grado di offrire una quantità di energia molto importante, tant'è che viene generalmente adottato in impianti di potenza rilevante. Particolare attenzione va riservata alla **potenziale degradazione termica dell'acquifero utilizzato**, nei casi di utilizzo con forte scompenso dei carichi termo-frigoriferi, nonché all'impatto nei pozzi vicini a causa dell'alterazione del locale assetto idrogeologico dovuta alle azioni di emungimento/restituzione.

Il calore viene estratto dai volumi di acqua emunta o, in modalità raffrescamento, scaricato in essi. In modalità raffrescamento non è sempre necessario utilizzare una pompa di calore: acque sotterranee a temperature prossime ai 10°C possono infatti essere fatte circolare direttamente all'interno degli edifici, fornendo il cosiddetto "freecooling".

3.2 Pompa di calore

La pompa di calore è una macchina termica ed è così chiamata perché, in analogia alle pompe idrauliche che sollevano acqua da un serbatoio a quota minore ad un serbatoio a quota maggiore, **pompa calore da un corpo a temperatura minore ad un corpo a temperatura maggiore**; ciò non può avvenire in maniera spontanea altrimenti sarebbe violato il secondo principio della termodinamica. Per ottenere questo risultato è quindi **necessario compiere del lavoro**, consumare cioè dell'energia.

In linea generale si possono distinguere pompe di calore elettriche che compiono lavoro consumando energia elettrica e pompe di calore ad assorbimento (a gas) che compiono lavoro consumando energia termica. Attualmente il mercato è dominato dalle pompe di calore elettriche.

Il "sistema pompa di calore" permette il movimento del calore attraverso uno scambio termico tra tre fluidi distinti: **due termovettori esterni alla macchina**, che collegano la pompa di calore rispettivamente all'ambiente esterno e a quello da climatizzare, ed uno **interno alla pompa di calore detto "frigorigeno"**, che permette lo scambio termico tra i precedenti e che, cambiando di stato, costituisce parte integrante del ciclo frigorifero (comprendente i processi di evaporazione, compressione, condensazione ed espansione; vedi Figura 6). Le pompe di calore di norma sono **reversibili**: in funzionamento invernale il refrigerante assorbe

calore dall'ambiente esterno per cederlo all'ambiente interno da climatizzare, mentre in funzionamento estivo il refrigerante assorbe calore dall'ambiente interno da climatizzare cedendolo all'ambiente esterno. Bisogna porre particolare attenzione al dimensionamento dell'impianto quando esso deve operare sia in regime di riscaldamento che di raffreddamento: il dimensionamento dovrà essere fatto in funzione della situazione più gravosa.

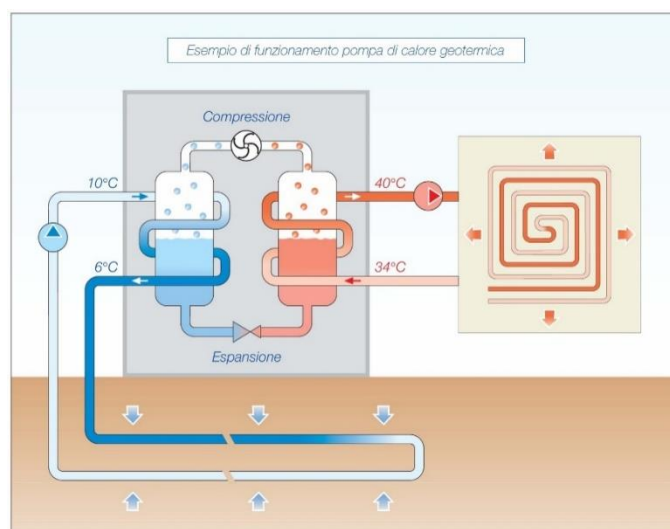


Figura 6: Schema di funzionamento di una pompa di calore geotermica in modalità riscaldamento (tratto catalogo Caleffi)

È fondamentale cercare di utilizzare la migliore sorgente termica disponibile: l'aria esterna è sicuramente la più semplice da impiegare ma è la meno favorevole dal punto di vista termodinamico poiché il carico termico di riscaldamento aumenta al diminuire della temperatura dell'aria esterna e viceversa per il carico termico di raffreddamento. È quindi **efficiente** orientarsi verso sorgenti alternative quali il **terreno** e le **acque superficiali e sotterranee**.

La pompa di calore è caratterizzata da un ciclo termodinamico che opera fra due livelli di temperatura T_1 e T_2 , con $T_2 > T_1$. Sia in modalità riscaldamento che in modalità raffreddamento è possibile definire un **coefficiente di prestazione energetica (COP)**¹ che valuta il rapporto fra l'energia utile prodotta e l'energia consumata.

L'efficienza energetica di una pompa di calore è strettamente correlata con la temperatura sia della sorgente sia dell'utenza (Figura 7) [6]. Tanto più vicini sono i due livelli di temperatura tanto più elevato sarà il valore

¹ Di norma i dati di catalogo delle pompe di calore presentano due definizioni diverse per le prestazioni in raffreddamento e in riscaldamento: in raffreddamento al posto del termine COP si impiega il termine EER (Energy Efficiency Ratio); in riscaldamento resta invece impiegato il termine COP.

del COP. Ecco perché è così importante da un lato ricercare la sorgente termica disponibile alla temperatura più adeguata, dall'altro accoppiare le pompe di calore con un impianto a bassa temperatura per il riscaldamento e relativamente ad alta temperatura per il raffrescamento. Quindi nella scelta di una pompa di calore va valutato non solo il valore di catalogo del COP ma anche a quali temperature di esercizio questo valore è riferito.

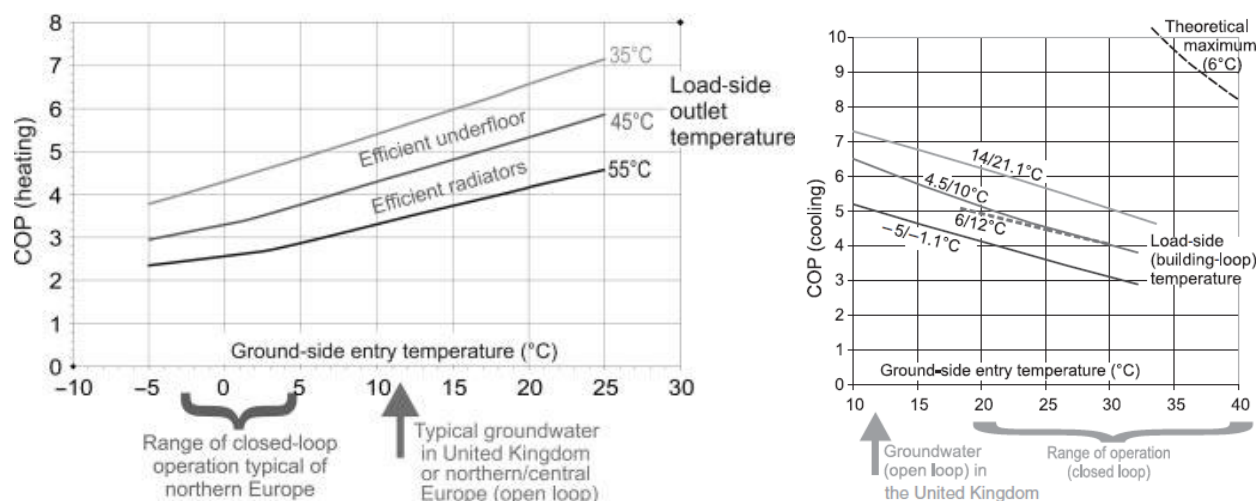


Figura 7: Curve di performance di una tipica pompa di calore domestica in modalità riscaldamento (sx) e raffrescamento (dx) [6]

3.3 I terminali di impianto per il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici

Esemplificando possiamo dire che un impianto di riscaldamento/raffrescamento è un impianto composto da due parti: una **produzione del calore/del fresco**, una **erogazione del calore/del fresco**.

Nell'edilizia convenzionale la produzione del calore viene effettuata generalmente da una caldaia. La caldaia produce acqua calda che poi viene inviata ai terminali di riscaldamento (radiatori, pannelli radianti ventilconvettori etc.). Un impianto geotermico in modalità riscaldamento è un impianto che produce calore, quindi compie la stessa funzione di una caldaia, cioè produce acqua calda che viene poi inviata agli opportuni terminali.

In modalità riscaldamento, minore è la temperatura di esercizio dei terminali, migliore sarà la resa dell'impianto geotermico. Affinché i terminali di riscaldamento trasferiscano agli ambienti l'energia necessaria perché la temperatura all'interno degli stessi si mantenga a livello di comfort vale la regola che quanto più è bassa la temperatura di lavoro tanto maggiore deve essere la superficie radiante. Generalmente i radiatori lavorano a temperature di 60/70°C. Queste temperature e terminali non sono generalmente adatti per un impianto geotermico, preferendo sistemi a pannelli radianti (a pavimento, a parete, a soffitto) o ventilconvettori, solitamente in grado di lavorare a temperature che non superano i 45°C (Figura 8).



Figura 8: Tipologie usuali di terminali di riscaldamento, da sinistra: radiatore, ventilconvettore, pannelli radianti

Analogamente a quanto visto per il riscaldamento, anche per il raffrescamento possiamo distinguere una produzione (rappresentata nell'edilizia tradizionale da gruppi frigo generalmente posti sui balconi o esterni alle finestre) ed una distribuzione (di solito mobiletti split o pannelli radianti). L'impianto geotermico va in questo caso a sostituire i gruppi frigoriferi esterni, essendo integrato nella funzione reversibile della pompa di calore.

L'eliminazione dei gruppi frigo esterni permette di risolvere due problemi non secondari:

- Il primo problema consiste nel riscaldamento dell'aria nell'intorno immediato dell'edificio. Questo fenomeno, assolutamente trascurabile se isolato, può influire negativamente sulla temperatura dell'ambiente delle città in cui la presenza contemporanea di migliaia di pompe di calore ad aria amplifica il fenomeno denominato **"isola termica"**: la temperatura dei centri urbani arriva ad essere superiore anche di parecchi gradi rispetto alle zone agricole circostanti.
- Il secondo problema è il non trascurabile **impatto visivo ed acustico** degli antiestetici gruppi frigo. Nei centri di interesse storico tali apparecchiature non possono, per tali motivi, venire installate (Figura 9).



Figura 9: Gli antiestetici gruppi frigo possono essere eliminati con un impianto geotermico

3.4 Lo storage termico nel sottosuolo, i sistemi UTES

La possibilità di **immagazzinare energia termica** permette di **massimizzare il potenziale delle energie rinnovabili**. Infatti lo storage può disaccoppiare la disponibilità di energia rinnovabile dal momento in cui è prodotta, aumentando così il periodo in cui può essere utilizzata dall'utenza [11].

Le tecnologie che utilizzano il **sottosuolo** per lo **storage termico** rientrano nell'acronimo UTES, “Underground Thermal Energy Storage”. Questa tecnologia si suddivide a sua volta in tre branche principali: ATES (“Aquifer Thermal Energy Storage”), BTES (“Borehole Thermal Energy Storage”), CTES (“Cavern Thermal Energy Storage”). Lo scopo dei sistemi UTES è lo stoccaggio dell'energia termica per **lunghi periodi**, rappresentando un'ottima soluzione in presenza di climi freddi, dove il bilancio energetico del suolo può essere deficitario. In questo contesto l'assetto termico annuale del sottosuolo può essere bilanciato e riequilibrato attraverso l'immissione di calore, prodotto ad esempio da fonte solare.

La tecnologia **ATES** è un particolare tipo di accumulo termico che sfrutta l'**acqua del sottosuolo come serbatoio** prelevandola da due diversi pozzi sufficientemente distanti. Durante la stagione estiva, l'acqua di falda viene estratta dal “pozzo freddo” ed utilizzata per il raffreddamento, per poi essere successivamente reimpressa nel sottosuolo nel “pozzo caldo”. Durante il periodo invernale avviene l'opposto, il prelievo avviene dal “pozzo caldo” e la reimmissione nel “pozzo freddo”. Questa tecnologia può essere proficuamente adottata in presenza di bassa o nulla velocità di falda.

La tecnologia **BTES** si distingue da quella ATES appena descritta configurandosi piuttosto come uno sviluppo dei convenzionali sistemi geotermici che utilizzano **scambiatori**. Questi sono disposti nel sottosuolo in modo da immagazzinare o estrarre calore stagionalmente (Figura 10).



Figura 10: Fotografia aerea della Drake Landing Solar Community (sx) e configurazione dello storage BTES, fonte Rehau (dx)

3.5 Il geoscambio in Provincia di Trento: normativa e numerosità degli impianti

La norma che disciplina lo sfruttamento della risorsa geotermica per l'installazione di sonde a circuito chiuso, **art. 30 bis del D.P.G.P. 26.01.1987, n. 1- 41/Legisl** [12], è stata introdotta nel codice provinciale alla fine del 2007, modificata e disciplinata con successive deliberazioni della Giunta provinciale nel corso del 2009.

Con **deliberazione n. 2154 di data 03 settembre 2009** [13] la Giunta provinciale, in attuazione delle disposizioni contenute nell'art. 30 bis (sonde geotermiche) del decreto del Presidente della Giunta provinciale 26 gennaio 1987 n. 1-41/Legisl, ha individuato le aree del territorio provinciale che presentano un potenziale rischio ambientale a seguito dell'installazione di sonde geotermiche. I criteri per l'individuazione di tali aree fanno riferimento all'instabilità dei versanti ed alla elevata vulnerabilità delle falde per fenomeni di inquinamento; su tali aree la Giunta provinciale ha posto il divieto di installazione di sonde geotermiche. Con lo stesso provvedimento, al fine di agevolare il cittadino nell'individuazione di tali aree, la Giunta provinciale ha approvato un'apposita cartografia, denominata **“Carta delle limitazioni per l'installazione di sonde geotermiche a circuito chiuso”**, la quale riporta le aree nelle quali viene fatto divieto di installare sonde geotermiche. Le aree interdette sono state raggruppate in 4 distinte categorie:

- a) aree potenzialmente interessate da **manifestazioni geotermiche**, idrotermali o minerali già sfruttate e/o sfruttabili;
- b) aree di **rispetto idrogeologico** delle sorgenti, dei pozzi e delle acque superficiali utilizzati a scopo potabile con qualsiasi portata, comprese le sorgenti di acque minerali in concessione, nonché le sorgenti ritenute strategiche per le peculiari caratteristiche di qualità, quantità e vulnerabilità, ancorché non sfruttate per uso umano, che potrebbero costituire riserve future, così come riportate nella “Carta delle risorse idriche” adottata ai sensi del Piano Urbanistico Provinciale;
- c) aree caratterizzate da **frane** superficiali, rotazionali, traslative e da deformazioni gravitative profonde di versante (DGPV), che per la loro natura sono caratterizzate da movimenti del terreno che potrebbero comportare la rottura (nel sottosuolo) delle sonde geotermiche;
- d) aree prossime a **faglie sismiche** presunte attive.

La Giunta provinciale, sempre con deliberazione n. 2154/2009, ha inoltre stabilito che, in caso di aggiornamento della Carta sopra indicata, sarà compito del servizio provinciale competente in materia di geologia curare l'istruttoria e provvedere alle modifiche dell'elaborato cartografico, sentito il parere dell'Agenzia provinciale per la Protezione dell'Ambiente ed il servizio provinciale competente in materia di utilizzazione delle acque pubbliche. In data **2 agosto 2013** è stata approvata dalla Giunta Provinciale la

Delibera n. 1593 inerente il primo aggiornamento della “Carta delle limitazioni per l’installazione di sonde geotermiche a circuito chiuso” [14] (Figura 11).

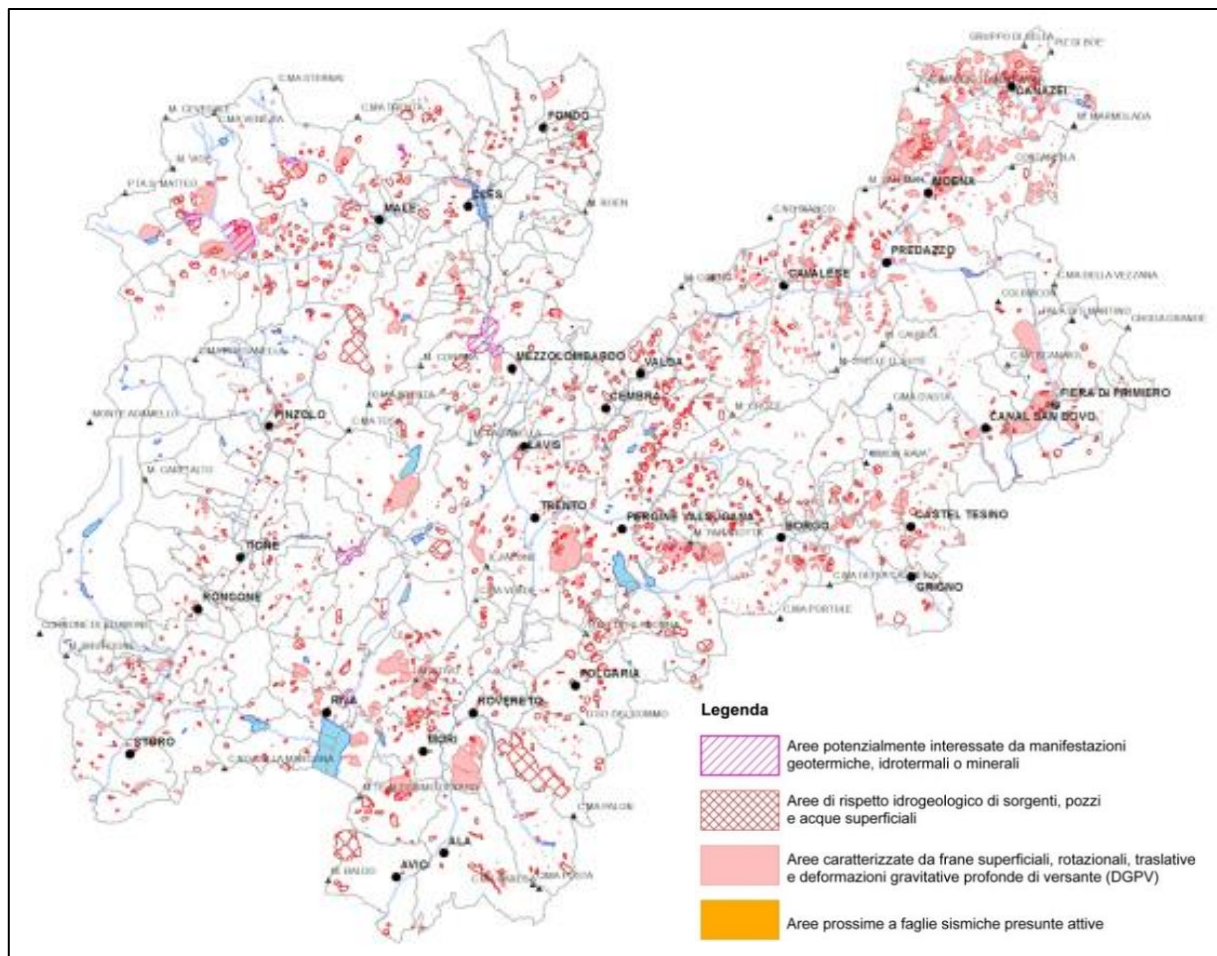


Figura 11: Carta delle limitazioni per l’installazione di sonde geotermiche a circuito chiuso

In data **28 dicembre 2009**, la **Legge Provinciale n. 19** (Legge Finanziaria provinciale 2010), all’art. 36 comma 2 ha sostituito l’art 30 bis sonde geotermiche del D.P.G.P. 26 gennaio 1987 con un nuovo dettato normativo [15]. La nuova normativa si basa su cinque punti:

- 1) L’installazione di sonde geotermiche nel sottosuolo per lo sfruttamento dell’energia geotermica è ammessa su tutto il territorio provinciale, previa **comunicazione preventiva**, da presentare almeno **sessanta giorni prima** dell’inizio dei lavori alla struttura provinciale competente in materia di geologia, fatti salvi i divieti e le limitazioni di cui al comma 2.
- 2) Al fine di garantire la salvaguardia qualitativa e quantitativa delle acque sotterranee, in particolare di quelle destinate al consumo umano, la Giunta provinciale individua le aree nelle quali è vietata o limitata l’installazione di sonde geotermiche (Figura 11).

- 3) Trascorsi sessanta giorni dalla data di presentazione della comunicazione, l'interessato può procedere all'installazione della sonda geotermica.
- 4) Entro il termine di sessanta giorni dalla data di presentazione della comunicazione, la struttura provinciale competente in materia di geologia può condizionare l'installazione della sonda a prescrizioni tecniche, anche relative alle modalità di installazione, e richiedere prove e verifiche tecniche oppure vietare l'installazione.
- 5) L'interessato, terminati i lavori e prima dell'attivazione della sonda geotermica, deve darne comunicazione al Servizio Geologico utilizzando l'apposito **modulo consuntivo** e allegando la documentazione tecnica richiesta.

Per quanto riguarda i **circuiti aperti con prelievo di acque sotterranee** la competenza è dell'APRIE (Agenzia provinciale per le risorse idriche e l'energia). Il prelievo di acqua viene trattato come una concessione e regolato dal Piano Generale per l'Utilizzazione delle Acque Pubbliche (PGUAP) reso esecutivo dal decreto del Presidente della Repubblica del 15 febbraio 2006 [16]. Per la destinazione delle acque di scarico viene sentito il parere del Servizio Geologico. In linea generale non è ammessa la reimmissione direttamente in falda, ad esempio con un pozzo realizzato vicino a quello di prelievo, mentre è pensabile una reimmissione in corsi d'acqua superficiali, oppure nel terreno previo passaggio in trincea disperdente o nella rete delle acque bianche.

Nell'analisi della **numerosità degli impianti di geoscambio** in Provincia di Trento bisogna innanzitutto considerare che l'obbligo di comunicarne la realizzazione è in vigore solo a partire dal 28 dicembre 2009, introdotto con la Legge Provinciale n. 19 [15]. Dai dati contenuti nell'apposito catasto delle comunicazioni preventive e consuntive del Servizio Geologico della PAT si può attualmente considerare una media realizzativa di circa una ventina di impianti/anno.

In totale, il numero di impianti di geoscambio attualmente realizzati e comunicati in Provincia di Trento, dal 2009, ha raggiunto le 134 unità. Il rapporto $n.\text{impianti}/1000$ abitanti è pari a 0,25 mentre il rapporto $n.\text{impianti}/\text{km}^2$ è pari a 0,022. Si tratta di valori ancora molto bassi, soprattutto se confrontati con i paesi leader nel settore (dati EGECE 2007 [17]): Svezia (circa 34 impianti/1000 ab. e circa 0,7 impianti/ km^2), Svizzera (circa 7 impianti/1000 ab. e circa 1,3 impianti/ km^2) e Austria (circa 6 impianti/1000 ab. e circa 0,6 impianti/ km^2).

4 Inquadramento geologico ed idrogeologico della Provincia di Trento

Dal punto di vista geologico, il territorio della Provincia di Trento è caratterizzato dalla presenza di due grandi unità strutturali della catena Alpina: le Alpi calcaree meridionali (Sudalpino) e l'Austroalpino. Il confine tra queste due unità è costituito dal Lineamento Periadriatico detto anche Linea Insubrica, un fascio di linee tettoniche ad andamento essenzialmente E-W che attraversa longitudinalmente l'intero orogeno alpino e che in Trentino si prolunga attraverso il passo del Tonale e la Val di Sole (prendendo il nome di linea del Tonale e linea delle Giudicarie nord) [18].

Il **Sudalpino**, che si trova a sud del Lineamento Periadriatico, è caratterizzato da uno stile tettonico a pieghe e scaglie tettoniche con una pronunciata vergenza verso sud. È costituito in prevalenza da rocce sedimentarie calcareo-dolomitiche e marnoso-arenacee seguite, in ordine di abbondanza, da formazioni vulcaniche; vengono, infine, le rocce metamorfiche (quasi solo del tipo nettamente scistoso) e le rocce intrusive (graniti, granodioriti, monzoniti, ecc.) che si equivalgono approssimativamente tra loro come estensione.

Tra le formazioni vulcaniche la più rappresentativa è la **Piattaforma Porfirica Atesina** del Permiano Inferiore che occupa una buona parte del settore centro orientale del territorio trentino ed è costituita da ignimbriti, duomi e colate riolitiche o riodacitiche.

Da segnalare inoltre la presenza del **Batolite dell'Adamello**, un complesso plutonico composto in prevalenza da rocce granitiche e granodioritiche (età Eocene Medio – Oligocene) che si trova all'estremità centro occidentale del Trentino, a sud della linea del Tonale.

Il settore che si estende a nord del Lineamento Periadriatico, detto **Austroalpino**, è costituito da una struttura a falde di ricoprimento nord vergenti (europa-vergenti) ed interessa solo una piccola porzione del territorio situata tra la Val di Sole ed il confine con la Provincia Autonoma di Bolzano. È caratterizzato da una netta prevalenza di rocce scistoso-cristalline e da un assetto strutturale complesso con presenza di sistemi tettonici piuttosto articolati, pieghe, sovrascorrimenti e faglie listriche.

Anche l'assetto idrogeologico della Provincia di Trento risulta piuttosto complesso a causa delle variabili ed eterogenee caratteristiche geologico strutturali e morfologiche del territorio. La presenza di rilievi montuosi a composizione petrografica e mineralogica sensibilmente diverse, e di profonde incisioni di origine fluvio-glaciale, costituiscono elementi di condizionamento della molteplicità di sistemi acquiferi sotterranei, rappresentando un patrimonio di notevole rilevanza sia sotto il profilo ambientale sia socio economico.

Le principali **unità idrogeologiche** del territorio trentino sono elencate in Tabella 1. Esse comprendono litotipi di età diversa ma con caratteristiche idrauliche affini e hanno sempre a letto un acquiclude la cui importanza può essere puntuale o areale [18].

Tabella 1: Unità idrogeologiche del territorio Trentino: cronologia, caratteristiche idrogeologiche e litologia

Unità idrogeologiche	Cronologia	Caratteristiche idrogeologiche	Litologia
I	QUATERNARIO	conducibilità idraulica per porosità con K fra 10-1 e 10-5 cm/s	alluvioni, detrito di falda, depositi morenici
II	MIOCENE-OLIGOCENE	conducibilità idraulica per fratturazione e localmente per porosità	conglomerati carbonatici, calcareniti con intercalazioni marnose
	EOCENE SUPERIORE	acquiclude (serie lombarda)	marne
III	EOCENE MEDIO	conducibilità idraulica per fratturazione e localmente per porosità	calcari
	EOCENE INFERIORE	acquiclude (serie lombarda e serie dolomitica)	vulcaniti, marne
IV	CRETACEO SUPERIORE	conducibilità idraulica per fessurazione e carsismo	calcari, calcari dolomitici e marnosi
	CRETACEO MEDIO ED INFERIORE	acquiclude (serie lombarda e serie dolomitica)	argilliti e tufiti, scisti bituminosi, marne calcaree
V	GIURESE SUPERIORE	conducibilità idraulica per fessurazione e carsismo	calcari
	GIURESE MEDIO	acquiclude (serie lombarda)	calcari marnosi, marne
VI	RETICO	conducibilità idraulica per fessurazione e carsismo	calcari, dolomie
	RETICO	acquiclude (serie lombarda e serie dolomitica)	scisti bituminosi
VII	NORICO	conducibilità idraulica per fessurazione e carsismo	calcari, dolomie
	WERFENIANO	acquiclude regionale	siltiti, argilliti, arenarie, marne
VIII	PERMIANO	impermeabile, locale permeabilità secondaria corticale	arenarie, marne, conglomerati, argilloscisti
IX	VULCANITI PERMIANE, MASSICCI INTRUSIVI, COMPLESSI METAMORFICI	impermeabili, conducibilità idraulica ridotta nelle falde di limitata estensione nella copertura eluviale	vulcaniti, magmatiti, metamorfiti

I termini della serie idrogeologica sono variamente articolati in elementi geometricamente definiti, o **strutture acquifere**, costituite dall'insieme roccia serbatoio-substrato impermeabile, il cui numero e forma dipende dai processi genetici e dalle successive azioni deformative sviluppatesi nel corso della storia geologica locale.

Ne consegue che alle unità idrogeologiche descritte precedentemente competono diverse strutture acquifere, in funzione del tipo e grado di conducibilità idraulica, dei caratteri deposizionali, dei rapporti con le litologie che le confinano, e delle deformazioni di tipo tettonico-strutturale subite, che condizionano il loro assetto attuale. I numerosi tipi di idrostrutture, sulla base delle loro caratteristiche di affinità, vengono qui raggruppati nelle seguenti tre grandi famiglie: 1) strutture delle valli sovralluvionate alpine; 2) strutture carbonatiche; 3) strutture delle coltri eluviali e dei depositi quaternari sciolti di pendio nei massicci cristallini e metamorfici [18].

4.1 L'idrogeologia della Valle dell'Adige

Dal punto di vista idrogeologico, la Valle dell'Adige è caratterizzata dalla presenza di un **sistema multifalde** ancora poco conosciuto nel dettaglio. Nel tratto di competenza provinciale della Valle, l'**alveo roccioso** sepolto dalla coltre alluvionale ha **profondità variabili dai 200 ai 600 metri**.

Il **riempimento quaternario** è costituito da depositi a **composizione variabile** da zona a zona con prevalenza di materiali fini sabbioso-limosi cui si aggiungono i depositi laterali (coni di deiezione, falde di detrito, frane postglaciali ed attuali) e le aree di conoide coincidenti con i maggiori affluenti laterali dell'Adige (il Torrente Noce a Mezzolombardo, il torrente Avisio a Lavis, il Torrente Fersina a Trento, il torrente Leno a Rovereto). In queste aree di conoide, caratterizzate da ambienti deposizionali attivi e ad alta energia, si rinvencono i depositi più grossolani e permeabili.

Ne risulta una circolazione complessa, localmente multifalda, con frequenti connessioni idrauliche fra i diversi acquiferi a causa delle irregolari variazioni del substrato roccioso (soglie secondarie) e della scarsa continuità degli orizzonti impermeabili che di fatto caratterizzano tali idrostrutture quali sistemi semi-confinati. Inoltre, occorre tener presente che, per la maggior parte del suo sviluppo, la valle dell'Adige è impostata in **massicci carbonatici**, i quali costituiscono un importante apporto idrico di **alimentazione laterale** per le falde di fondovalle.

In sintesi, nell'idrostruttura quaternaria della Valle dell'Adige si evidenzia la presenza di un **acquifero freatico sub-superficiale** di spessore limitato (massimo 50 - 60 metri) che si estende lungo l'intera valle all'interno di materiali fini sabbioso-limosi. Tale acquifero è in continuità idraulica con i **settori di conoide laterale**, che come visto in precedenza sono caratterizzati da materiali prevalentemente ghiaioso-sabbiosi. L'acquifero freatico sub-superficiale è separato dagli altri acquiferi più profondi mediante depositi fini, meno permeabili, la cui potenza è talora considerevole.



Figura 12: La Valle dell'Adige in Provincia di Trento

5 Progetto GEOTERM: metodologia e banca dati

Per individuare le condizioni favorevoli allo sviluppo dei sistemi geotermici di bassa entalpia, detti anche sistemi di geoscambio, dedicati alla climatizzazione di edifici, sono stati raccolti ed organizzati a scala provinciale i **dati climatici, geologici, idrogeologici e termofisici** utili alla redazione di una cartografia tematica specifica, in grado di rappresentare in modo sinergico e semplificato le grandezze fisiche che maggiormente influenzano i fabbisogni termici e il comportamento del terreno dal punto di vista dello scambio e dell'accumulo termico.

L'approccio metodologico adottato si basa sulla definizione di un modello concettuale geotermico di bassa entalpia, che prevede l'utilizzo del sottosuolo quale serbatoio termico dotato di stabilità termica, dal quale prelevare calore in inverno e nel quale riversarne in estate. Le **profondità** interessate dagli scambi termici prodotti tramite sonde verticali e pozzi sono limitate, in genere, ai **primi 100 m** [19] [20] [21] [22].

In linea generale, le variabili che giocano un ruolo rilevante nel dimensionamento degli impianti di geoscambio sono costituite dai **fabbisogni termici** (correlati alle caratteristiche climatiche locali e alla tipologia e destinazione d'uso degli edifici), dalla **capacità del sottosuolo di scambiare calore** (conduzione, convezione) e dalla attitudine dello stesso a **trattenere calore** (capacità termica). La corretta ed ottimale progettazione di questi impianti dipende quindi sia da un'attenta valutazione delle necessità di climatizzazione (profili energetici e potenze termo-frigorifere) sia da una conoscenza accurata delle caratteristiche termofisiche del sottosuolo, che dipendono dall'assetto geologico ed idrogeologico locale.

Nel presente studio, oltre alla tipologia di impianti di geoscambio più diffusa, dotata di classici scambiatori verticali a **circuito chiuso**, sono state inoltre considerate altre due soluzioni tecniche di particolare interesse: i sistemi geotermici a **circuito aperto** ad acqua di falda ed i **sistemi di stoccaggio termico nel sottosuolo (UTES)**. Nella prima soluzione, nello specifico e favorevole caso in cui sia disponibile acqua di falda a profondità e condizioni termo-chimiche favorevoli, va verificata la quantità estraibile e l'impatto idrotermico che il sistema di emungimento può causare nell'area di interesse. Nel secondo caso, la possibilità di utilizzare il sottosuolo per immagazzinare energia termica nei periodi di disponibilità eccedente la domanda dipende sia dalla disponibilità della risorsa (ad esempio energia solare) sia dall'attitudine del mezzo sottosuolo a scambiare energia e ad immagazzinarla (guidata dai parametri caratteristici di conducibilità e capacità termica).

La zonazione a livello provinciale dei parametri guida significativi è necessariamente affetta da generalizzazioni di rappresentazione su scala provinciale e da una distribuzione generalmente disomogenea

dei punti di informazione diretta, il che comporta restituzioni cartografiche tematiche con diversi gradi di rappresentatività, ma comunque utili a livello progettuale e per guidare l'adozione di azioni di indirizzo finalizzate alla gestione ottimale del territorio. Partendo dall'analisi dell'intero territorio trentino, una successiva indagine focalizzata alla Valle dell'Adige e al Comune di Trento ha consentito di approfondire notevolmente il dettaglio cartografico.

La corposa banca dati generata nell'ambito delle attività previste nel progetto GEOTHERM ha permesso la produzione di diversi elaborati cartografici tematici, a **tre scale di analisi/risoluzione (cellsize): Provincia di Trento (cellsize 20 m), Valle dell'Adige (cellsize 10 m), Comune di Trento (cellsize 5 m)**, delle seguenti proprietà:

- 1) Caratteristiche climatiche (temperatura dell'aria, gradi giorno);
- 2) Radiazione solare globale (su base morfologica);
- 3) Potenza termica e fabbisogni energetici per il riscaldamento di un edificio standard;
- 4) Caratteristiche idrogeologiche del sottosuolo: conducibilità idraulica, profondità del livello di saturazione (della prima falda libera), velocità della falda acquifera;
- 5) Proprietà termofisiche del sottosuolo: conducibilità termica, capacità termica volumetrica;
- 6) Flusso di calore e gradiente geotermico superficiale.

Per ottenere una rappresentazione delle potenzialità del sottosuolo allo scambio e all'accumulo termico, i diversi tematismi descritti sono stati combinati mediante specifici algoritmi semplificati di combinazione parametrica, rappresentando in opportuna forma cartografica:

- 1) Potenziale di geoscambio per impianti a sonde geotermiche verticali (SGV);
- 2) Potenziale di geoscambio per impianti a circuito aperto;
- 3) Potenziale per l'accumulo stagionale di calore solare nel sottosuolo

Occorre differenziare la valutazione della **potenzialità di scambio e accumulo termico** del sottosuolo trentino da quella dell'**idoneità al geoscambio**. La prima, oggetto di questo studio, comporta la zonazione della capacità territoriale al geoscambio, definita sulla base della distribuzione territoriale dei parametri termofisici. La seconda, invece, rappresenta il confronto della capacità di geoscambio con le normative e i vincoli esistenti, dedicati alla protezione della risorsa sottosuolo, in grado di limitare l'utilizzo del territorio anche in aree potenzialmente favorevoli allo sfruttamento della risorsa geotermica [19]. In tal senso, come già descritto nel Paragrafo 3.5, la Provincia di Trento è dotata di una **“Carta delle limitazioni per l'installazione di sonde geotermiche a circuito chiuso”**, la quale riporta le aree nelle quali viene fatto divieto

di installare sonde geotermiche (aree soggette a manifestazioni geotermiche, di rispetto idrogeologico, soggette a frane, interessate da faglie sismiche).

Per il presente lavoro, i dati utili alla redazione della cartografia tematica sono stati ottenuti da fonti diverse, tra cui Meteotrentino, Servizio Geologico della PAT, Agenzia provinciale per le risorse idriche e l'energia, Servizio ambiente e territorio del Comune di Trento. Tali dati si presentavano in formati diversi, alcuni su supporto cartaceo, altri in formato digitale. Si è quindi proceduto alla loro completa informatizzazione, validazione, omogeneizzazione qualitativa ed inserimento in un'unica banca dati. Il **patrimonio informativo** così realizzato è stato implementato **in ambiente GIS**, consentendo di poter disporre di metadati grafico-numericamente facilmente aggiornabili e consultabili.

L'importante patrimonio di informazioni raccolte e catalogate costituisce una risorsa utile, da un lato per la realizzazione della cartografia di indirizzo geotermico, dall'altro per finalità legate alla pianificazione edilizia, urbanistica ed energetica, nonché a qualsiasi possibile altra finalità che richieda la conoscenza dell'assetto climatico, geologico ed idrogeologico del territorio trentino.

Infine, poiché nella progettazione di un impianto di geoscambio le prestazioni dipendono strettamente dalla componente invariante, a cui ci si deve adeguare, costituita dalle proprietà termofisiche del sottosuolo, i tematismi qui rappresentati in forma cartografica possono costituire una buona base informativa per la creazione di un modello del sottosuolo affidabile. Nella realizzazione di **impianti di medio-grandi dimensioni** è però consigliabile **integrare una modellazione sito-specifica**, con il reperimento di **ulteriori dati direttamente acquisiti in situ** (sondaggi, indagini geofisiche, GRT, prove di laboratorio), riferiti alla specifica area di interesse.

5.1 Database climatico

I dati climatici derivano dalle registrazioni di una serie di stazioni dislocate nel territorio provinciale. In particolare è stato consultato l'archivio dati di **112 stazioni** uniformemente distribuite sul territorio provinciale (Figura 13) e posizionate tra una quota minima di 70 m s.l.m. (Torbole) e una quota massima di 3015 m s.l.m. (Cima Presena). Il set di dati spazia dal 1920 ai giorni nostri. Tutte le informazioni sono state ottenute da Meteotrentino, ente della Provincia Autonoma di Trento per i servizi meteorologici [23].

Per ogni stazione meteorologica sono state riportate le seguenti informazioni: nome della stazione e codice identificativo (ID), coordinate geografiche, anno di inizio attività e di fine attività, temperatura minima media annua nel periodo di attività (Tmin media), temperatura massima media annua nel periodo di attività (Tmax media), temperatura media annua nel periodo di attività (Tmedia).

Per 26 delle 112 stazioni di Meteotrentino sono stati reperiti ulteriori dati climatici dai database dell'Osservatorio Trentino sul Clima [24], in Figura 13 queste stazioni sono indicate come “stazioni Climatrentino” e anch'esse sono distribuite in maniera uniforme sul territorio provinciale. Tra le informazioni aggiuntive analizzate e considerate nel presente studio si aggiungono, per il periodo di attività delle varie stazioni disponibili, la temperatura media mensile e le temperature minima e massima assolute annue.

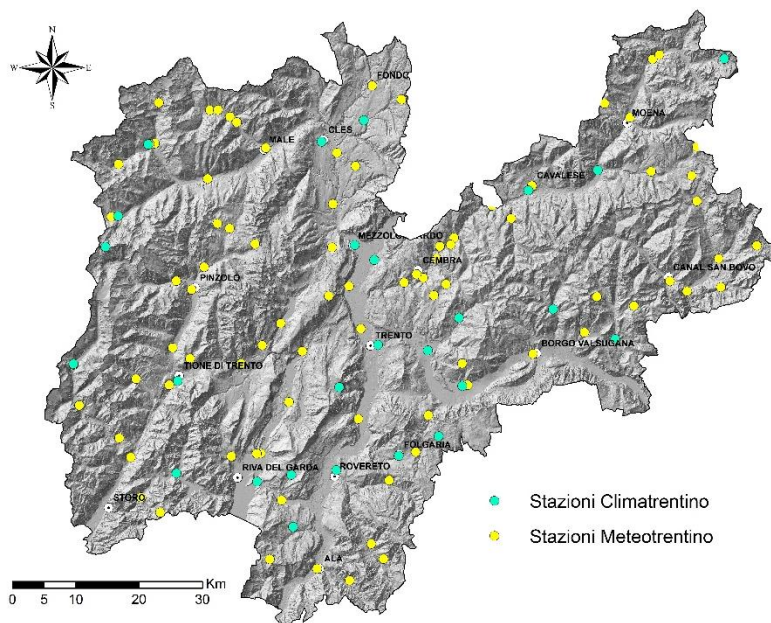


Figura 13: Ubicazione delle stazioni meteorologiche della Provincia di Trento gestite da Meteotrentino

5.2 Database idrogeologico

L'analisi idrogeologica ha coinvolto l'intero territorio provinciale per quanto riguarda il parametro **conducibilità idraulica** (k), mediato sui primi 100 m di sottosuolo. La valutazione è avvenuta mediante correlazione tra informazioni ricavate da cartografia litostratigrafica e valori bibliografici di riferimento ottenuti da studi precedenti di vari autori (vedi successivo paragrafo 5.3).

Uno studio di dettaglio si è concentrato sulla Valle dell'Adige, grazie alla disponibilità di un significativo numero di punti di informazione (pozzi per il prelievo d'acqua e pozzi di controllo piezometrico) distribuiti in maniera omogenea nell'area di interesse. In particolare, i dati utilizzati nel progetto GEOTERM derivano da due diverse campagne di misura, entrambe realizzate dallo Studio Geologico Associato GEOALP, su incarico ed in collaborazione con il Servizio Geologico della PAT:

- 1) **Misure freatimetriche nel fondovalle atesino**, Giugno 2008 e Ottobre 2008 [25];
- 2) Acquisizione di **dati termici della falda idrica superficiale** nel territorio della Provincia Autonoma di Trento, Novembre 2011 e Maggio 2012 [26].

Nelle campagne freatimetriche del Giugno 2008 e dell'Ottobre 2008 sono stati selezionati rispettivamente 258 e 288 punti di misura sugli oltre 3000 esistenti nell'area di indagine nel fondovalle atesino, tali punti sono indicati in Figura 14. L'indagine sviluppata per il progetto GEOTERM ha permesso di evidenziare, con un buon livello di dettaglio, le condizioni dell'assetto idrogeologico lungo l'asta atesina in occasione di un periodo di piena (Giugno) e di magra (Ottobre). Ai fini della valutazione del potenziale di geoscambio è stato considerato il periodo di magra, ponendo quindi l'analisi in condizioni conservative.

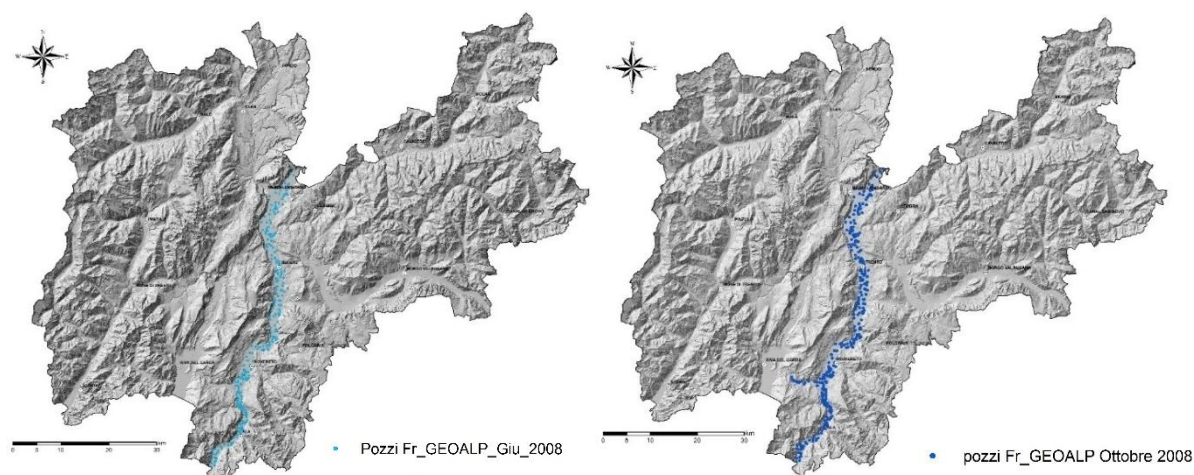


Figura 14: Ubicazione misure freatimetriche nel fondovalle atesino (GEOALP Giugno 2008 e GEOALP Ottobre 2008)

Nell'ambito dell'incarico affidato a "GEOALP" dal Servizio Geologico della PAT [26] per l'acquisizione di dati termici sugli acquiferi superficiali del territorio trentino, sono state eseguite due campagne di misura, rispettivamente nel Novembre 2011 e nel Maggio 2012. La campagna di misura autunnale è stata condotta dal 3 Novembre al 28 Novembre 2011, coinvolgendo 182 punti di misura, mentre la campagna di misura primaverile è stata condotta dal 2 Maggio al 31 Maggio 2012, coinvolgendo 197 punti di misura (Figura 15).

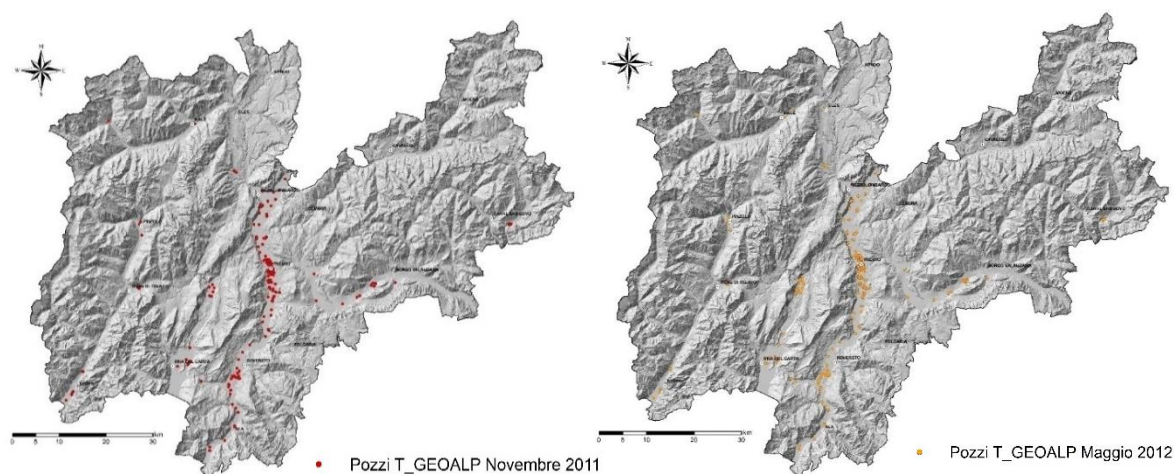


Figura 15: Ubicazione dei dati termici della falda idrica superficiale in Trentino (GEOALP Novembre 2011 e GEOALP Maggio 2012)

5.3 Database litostratigrafico

La caratterizzazione della **conducibilità idraulica** (k), della **conducibilità termica** (λ) e della **capacità termica volumetrica** (S_{VC}) è stata effettuata assegnando valori bibliografici tipici alle varie unità litostratigrafiche, in alcuni casi validati con specifici campionamenti e prove di laboratorio, mediati sui primi 100 m di sottosuolo, mappando l'intero territorio provinciale a tre scale di analisi:

- 1) Provincia di Trento: informazioni dalla Carta litologica del Trentino (CLT, scala 1:200.000) [27].
- 2) Comune di Trento: informazioni dalla cartografia CARG del Foglio 060 Trento [28] e del Foglio 081 Rovereto² (scala 1:50.000).
- 3) Valle dell'Adige: stratigrafie di sondaggi e pozzi presenti nel database del Servizio Geologico della PAT.

Dal punto di vista bibliografico, per assegnare valori riconosciuti a livello internazionale alle proprietà termofisiche in esame (λ e S_{VC}) sono state prese in considerazione le linee guida tedesche VDI 4640 (Tabella 2) [7]. Le linee guida VDI 4640 costituiscono inoltre uno tra i principali riferimenti europei nel dimensionamento degli impianti di geoscambio. Rispetto a questi valori bibliografici, le proprietà termofisiche del sottosuolo del Comune di Trento e della Valle dell'Adige sono state approfondite mediante il campionamento e l'analisi di numerose formazioni rocciose e sedimenti sciolti, nell'ambito dello svolgimento di diverse tesi di laurea del Dipartimento di Geoscienze dell'Università di Padova (Appendice 7.1) [29].

Per l'analisi della conducibilità idraulica si è fatto riferimento alle caratteristiche delle unità idrogeologiche riportate in Tabella 1 del Capitolo 4, agli studi per la relazione idrogeologica del progetto preliminare della TAV del Brennero (Bazzoli G., 2008 [30]) e ai valori bibliografici riportati da Domenico and Schwartz [31].

Per la Valle dell'Adige, la riorganizzazione e validazione di **stratigrafie relative a 358 perforazioni** (sondaggi e pozzi), aventi una **profondità ≥ 25 m** (Figura 16) e fornite dal Servizio Geologico della PAT, ha permesso la costituzione di un corposo database litostratigrafico. Le perforazioni inferiori a 25 m sono state scartate in quanto ritenute di profondità insufficiente a fornire informazioni utili alla finalità del presente lavoro. Per quanto riguarda la distribuzione spaziale dei punti di informazione stratigrafica, essi risultano, come presumibile, maggiormente concentrati in corrispondenza dei centri abitati (in particolare nei pressi della città di Trento) e lungo le principali vie di comunicazione (strade, ferrovia).

² Cartografia non pubblicata, fornita a FBK per gli scopi del progetto GEOTERM dal Servizio Geologico della PAT

Ad ogni sequenza stratigrafica analizzata è stato assegnato un valore di conducibilità idraulica (k), conducibilità termica (λ) e capacità termica volumetrica (S_{vc}) mediato sull'intera sequenza. Nell'analisi dei materiali incoerenti, i valori di conducibilità idraulica assegnati alle varie idrostrutture derivano unicamente da fonte bibliografica, mentre i valori di conducibilità termica e capacità termica volumetrica sono mediati tra il valore bibliografico e quello ottenuto da misure di laboratorio (analisi FBK/UNIPD [29]). La mappatura della profondità del livello di saturazione del primo acquifero ha permesso di distinguere le condizioni anidre da quelle sature. Le informazioni stratigrafiche sono state successivamente normalizzate a 100 m di profondità. Ad ogni perforazione è stato quindi assegnato un unico valore di conducibilità idraulica (k), conducibilità termica (λ) e capacità termica volumetrica (S_{vc}), determinato come media pesata dell'intera litostratigrafia ricostruita fino a 100 m di profondità dal piano campagna.

Tabella 2: Proprietà termofisiche di vari tipi di rocce e terreni (fonte: VDI 4640)

Tipologia di sottosuolo	Densità (kg/m³)	Conducibilità termica (W/mK)		Capacità termica volumetrica (MJ/m³K)
			valor medio	
Rocce magmatiche				
Basalto	2,6-3,2	1,3-2,3	1,7	2,3-2,6
Diorite	2,9-3,0	2,0-2,9	2,5	2,9
Gabbro	2,8-3,1	1,7-2,9	2,0	2,6
Granito	2,4-3,0	2,1-4,1	3,2	2,1-3,0
Riolite	2,6	3,1-3,4	3,3	2,1
Rocce metamorfiche				
Gneiss	2,4-2,7	1,9-4,0	2,9	1,8-2,4
Marmo	2,5-2,8	2,1-3,1	2,5	2,0
Quarzite	2,5-2,7	5,0-6,0	5,5	2,1
Micascisti	2,4-2,7	1,5-3,1	2,2	2,2-2,4
Anfibolite	2,6-2,9	2,1-3,6	2,9	2,0-2,3
Rocce sedimentarie				
Arenaria	2,2-2,7	1,9-4,6	2,8	1,8-2,6
Calcare	2,4-2,7	2,0-3,9	2,7	2,1-2,4
Marna	2,3-2,6	1,8-2,9	2,3	2,2-2,3
Rocce argillose/limose	2,4-2,6	1,1-3,4	2,2	2,1-2,4
Materiale non consolidato				
Argilla/limo secco	1,8-2,0	0,4-1,0	0,5	1,5-1,6
Argilla/ limo umida	2,0-2,2	1,1-3,1	1,8	2,0-2,8
Ghiaia secca	1,8-2,2	0,4-0,9	0,4	1,3-1,6
Ghiaia umida	1,9-2,3	1,6-2,5	1,8	2,2-2,6
Depositi morenici	1,8-2,3	1,1-2,9	2,4	1,5-2,5
Sabbia secca	1,8-2,2	0,3-0,9	0,4	1,3-1,6
Sabbia umida	1,9-2,3	2,0-3,0	2,4	2,2-2,8
Torba	0,5-1,1	0,2-0,7	0,4	0,5-3,8

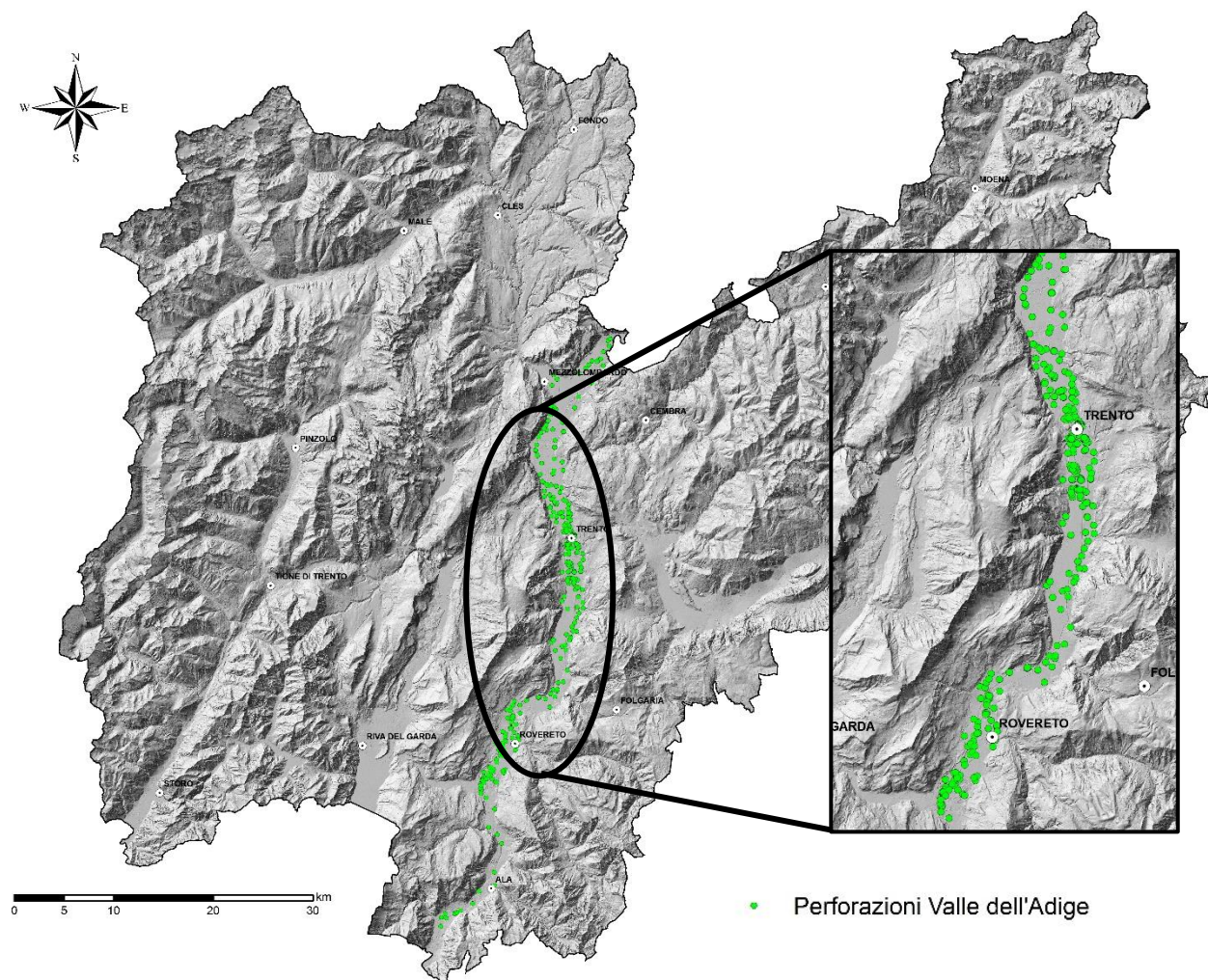


Figura 16: Ubicazione delle perforazioni, sondaggi e pozzi nella Valle dell'Adige (Servizio Geologico PAT)

6 Progetto GEOTERM: cartografia

6.1 Caratteristiche climatiche

Una buona pianificazione energetica non può prescindere da una **conoscenza accurata delle caratteristiche climatiche locali**. Da queste infatti dipendono la **potenza termo-frigorifera ed i fabbisogni energetici di climatizzazione degli edifici**.

Il clima del Trentino può essere definito di transizione tra il clima semicontinentale e quello alpino. Nei principali fondovalle le temperature di gennaio sono comprese dai -5 °C ai -10°C mentre in estate dai 25°C ai 30°C ed anche più. Pur presentando gran parte del proprio territorio ad una altitudine media piuttosto elevata (circa il 77% al di sopra dei 1000 m s.l.m., poco meno del 20% al di sopra dei 2000 m s.l.m.), esso non presenta quei caratteri di rigidità propri di altre aree alpine.

L'analisi microclimatica della Provincia di Trento, realizzata nel corso del progetto GEOTERM, include le seguenti mappature:

- Temperatura media annua dell'aria;
- Temperatura media mensile dell'aria (per tutti e dodici i mesi);
- Temperatura assoluta minima e assoluta massima annua dell'aria;
- Gradi Giorno (GG) annui;
- Gradi Giorno (GG) mensili nel periodo di riscaldamento (1 Ottobre - 30 Aprile).

L'elaborazione spaziale dei dati climatici di **temperatura media annua dell'aria** è avvenuta mediante la ricerca di un **gradiente termico**, ovvero della variazione con la quota, mediato sull'intero territorio provinciale. I dati forniti dalle stazioni meteo disponibili sono stati riportati in un grafico, individuando la linea interpolante rappresentativa della variazione di temperatura con la quota (Figura 17).

Il gradiente che ne risulta, considerando ovviamente una temperatura in diminuzione con l'aumentare dell'altitudine, è pari a **0,566 °C/100 m**. Questo valore trova riscontro favorevole anche da analisi precedenti per la Provincia di Trento (Martinelli et al 0,51 °C/100 m [32]) e per la vicina Provincia di Bolzano (Gallottini 0,577 °C/100 m [33]).

Per le "stazioni Climatrentino" si è applicata l'analoga procedura per individuare i **gradienti termici della media mensile** (per tutti e dodici i mesi) e i **gradienti termici della minima e massima assoluta annua**.

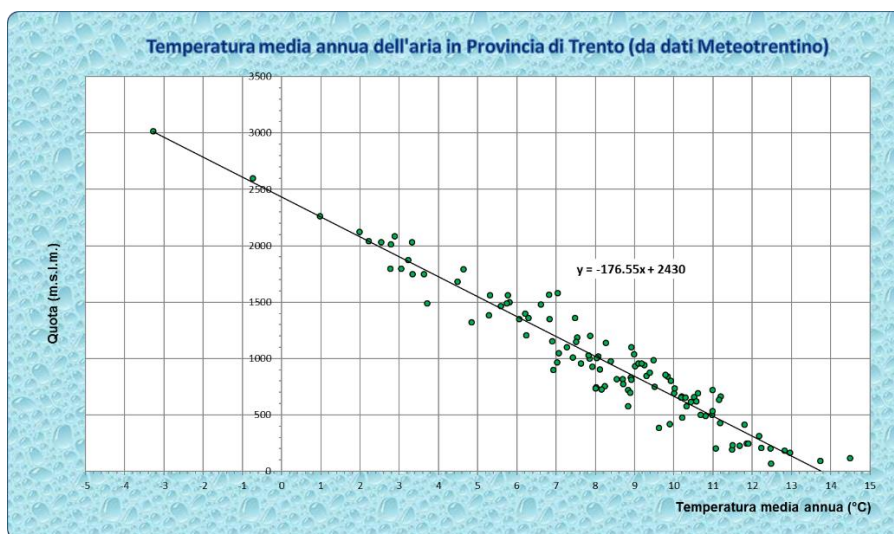


Figura 17: Analisi della temperatura media annua dell'aria in Provincia di Trento e individuazione del gradiente

Ottenuti i gradienti termici, che mettono in relazione la diminuzione di temperatura all'aumentare della quota, sulla base del modello digitale del terreno (DTM) della Provincia di Trento, disponibile con risoluzione spaziale massima di 5 metri ma qui campionato a 20 metri per motivi di scala e di impegno computazionale, si è provveduto a generare la seguente cartografia tematica del territorio provinciale : **temperatura media annua dell'aria** (Figura 18), **temperatura media mensile dell'aria** (per tutti e dodici i mesi), **temperatura assoluta minima e massima annua dell'aria** (Figura 19). Come già illustrato, in assenza di anomalie geotermiche locali, la **temperatura media annua nei primi 100 m di sottosuolo** (θ_g) può essere, in prima approssimazione, considerata pari alla temperatura media annua dell'aria (θ_m).

La conformazione morfologica della Provincia di Trento implica un ampio range di temperature e condizioni climatiche, dai fondovalle a quote inferiori ai 100 m (per un minimo di 63 m s.l.m.) alle vette alpine con quote che raggiungono circa 3700 m di altitudine. Considerando la temperatura media annua dell'aria questa varia da 13,41 °C a - 7,52 °C, le temperature minime assolute da - 11,85 °C a - 38,90 °C, le temperature massime assolute da 9,92 °C a 42,24 °C. Questi valori testimoniano la grande variabilità di condizioni termiche che caratterizzano il territorio studiato, comune comunque tutto il settore alpino. Le cartografie realizzate ricostruiscono l'assetto microclimatico provinciale con un buon livello di dettaglio: dal punto di vista spaziale la risoluzione è pari a 20 m x 20 m, dal punto di vista temporale la risoluzione è mensile.

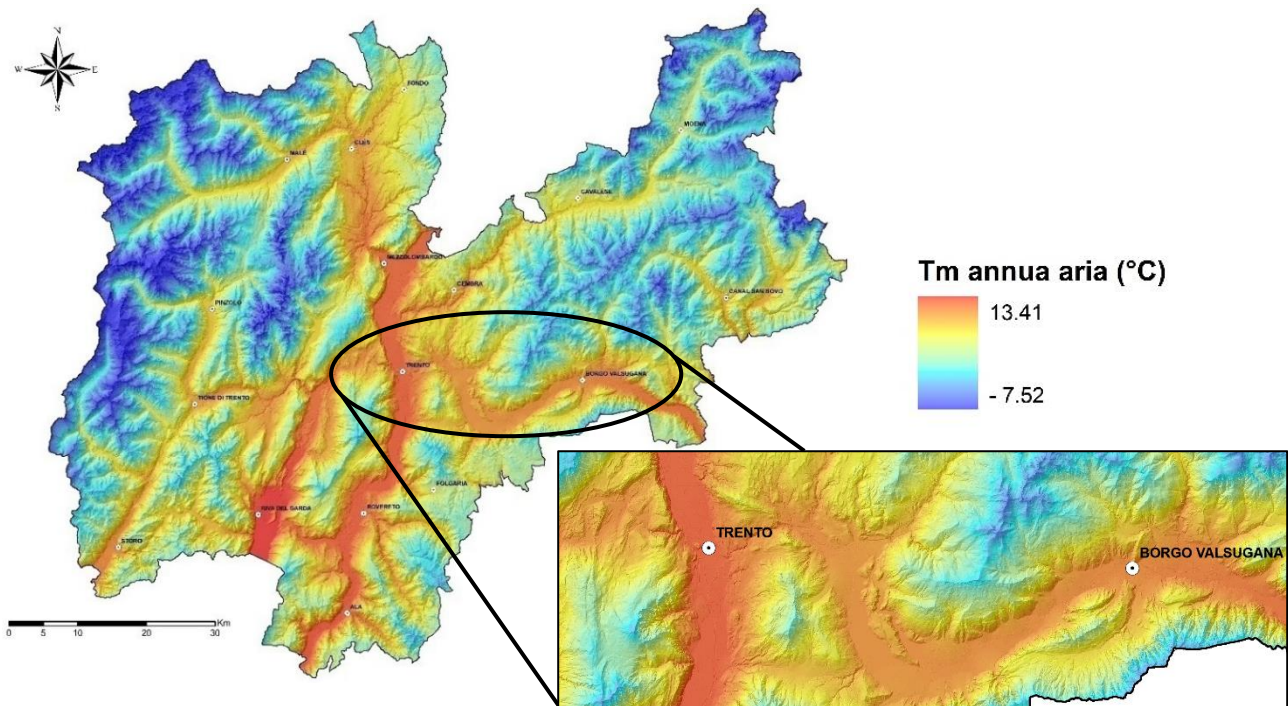


Figura 18: Mappa della temperatura media annua dell'aria in Provincia di Trento

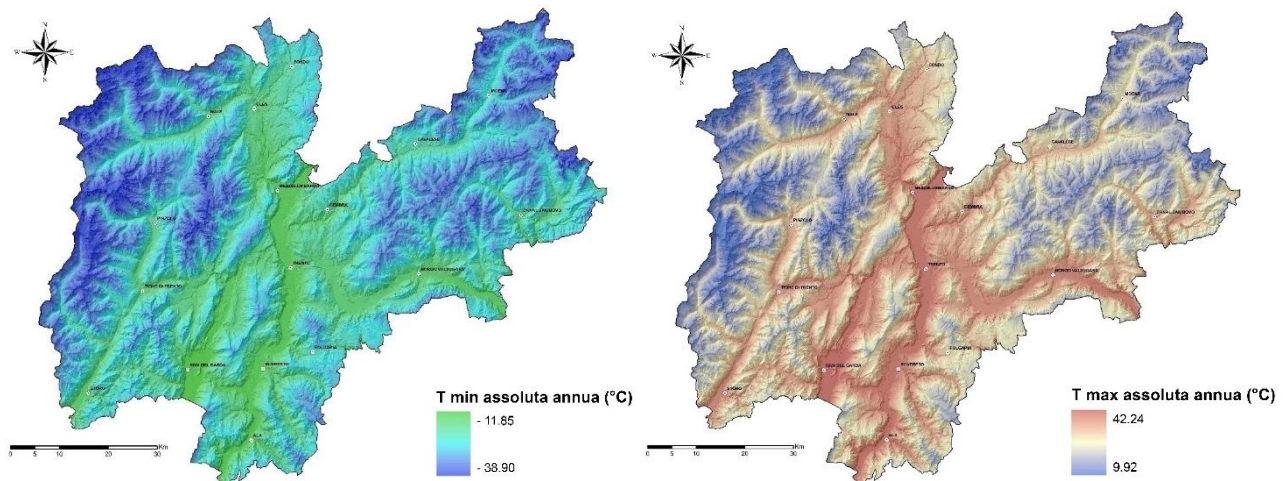


Figura 19: Mappe della temperatura minima (sx) e massima (dx) assoluta annua dell'aria (dx) in Provincia di Trento

La **classificazione climatica dei comuni italiani** è stata introdotta dal D.P.R. n. 412 del 26 agosto 1993 [34]. Sono state fornite, per ciascun comune, le indicazioni sulla somma, estesa a tutti i giorni di un periodo annuale convenzionale di riscaldamento³, delle sole differenze positive giornaliere tra la temperatura dell'ambiente indoor, convenzionalmente fissata a 20 °C, e la temperatura media esterna giornaliera; l'unità di misura utilizzata è il **grado giorno (GG)**. Dunque, mediante i gradi giorno è possibile esprimere il fabbisogno

³ Che inizia con i primi 3 giorni consecutivi caratterizzati da una temperatura media giornaliera che non supera i 12°C e termina con i primi 3 giorni consecutivi caratterizzati da una temperatura media giornaliera uguale o superiore a 12°C

termico di una determinata area geografica. Un valore di gradi giorno basso indica un breve periodo di riscaldamento e temperature medie giornaliere outdoor prossime alla temperatura fissata per l'ambiente indoor (20°C). Al contrario, valori di gradi giorno elevati indicano periodi di riscaldamento prolungati e temperature medie giornaliere nettamente inferiori rispetto alla temperatura convenzionale di riferimento.

Gli oltre 8000 comuni italiani sono stati suddivisi in sei **fasce climatiche** (Tabella 3). La zona climatica di appartenenza indica in quale periodo e per quante ore è possibile attivare il riscaldamento negli edifici. I sindaci dei comuni possono ampliare, a fronte di comprovate esigenze, i periodi annuali di esercizio e la durata giornaliera di accensione dei sistemi di riscaldamento, dandone immediata notizia alla popolazione.

Secondo la classificazione del D.P.R. n. 412/1993, i comuni trentini presentano valori di GG compresi tra 2276 e 4918, 33 comuni rientrano in Fascia E mentre i restanti 190 rientrano in Fascia F. La Figura 20, a sinistra, fornendo un solo valore di GG per territorio comunale, presso la sede comunale, trascura le notevoli variazioni climatiche dovute alla conformazione altimetrica e morfologica. Si è quindi deciso di approfondire il dettaglio cartografico, procedendo in due passaggi:

- Realizzando le **mappe di GG mensile nel periodo di riscaldamento 1 Ottobre - 30 Aprile**, sottraendo alla temperatura convenzionale indoor di 20°C la temperatura media mensile dell'aria;
- Realizzando la **mappa di GG annuo per il periodo di riscaldamento**, somma delle singole mappe di GG mensili.

Tabella 3: Classificazione climatica dei comuni italiani, introdotta dal D.P.R. n. 412 del 26 agosto 1993

Fascia	da [GG]	a [GG]	Ore giornaliere	Data inizio	Data fine	Numero comuni
A	0	600	6	1 dicembre	15 marzo	2
B	601	900	8	1 dicembre	31 marzo	157
C	901	1400	10	15 novembre	31 marzo	989
D	1401	2100	12	1 novembre	15 aprile	1611
E	2101	3000	14	15 ottobre	15 aprile	4271
F	3001		nessuna limitazione (<i>tutto l'anno</i>)			1071

Il risultato finale è a destra in Figura 20 e mostra valori di GG compresi tra 2605 e 5992. Presso le sedi comunali i valori GEOTERM non si discostano di molto dai valori del D.P.R. n. 412/1993. Le differenze riscontrabili sono dovute ad una diversa valutazione del periodo annuale convenzionale di riscaldamento, in GEOTERM dall'1 Ottobre al 30 Aprile per tutto il territorio provinciale, nel D.P.R. n. 412/1993 inizia con i primi tre giorni consecutivi caratterizzati da una temperatura media giornaliera che non supera i 12 °C e termina con i primi tre giorni consecutivi caratterizzati da una temperatura media giornaliera uguale o superiore a 12

°C. Inoltre, in GEOTERM l'analisi è sulle medie mensili mentre nel D.P.R. n. 412/1993 l'analisi è sulle medie giornaliere.

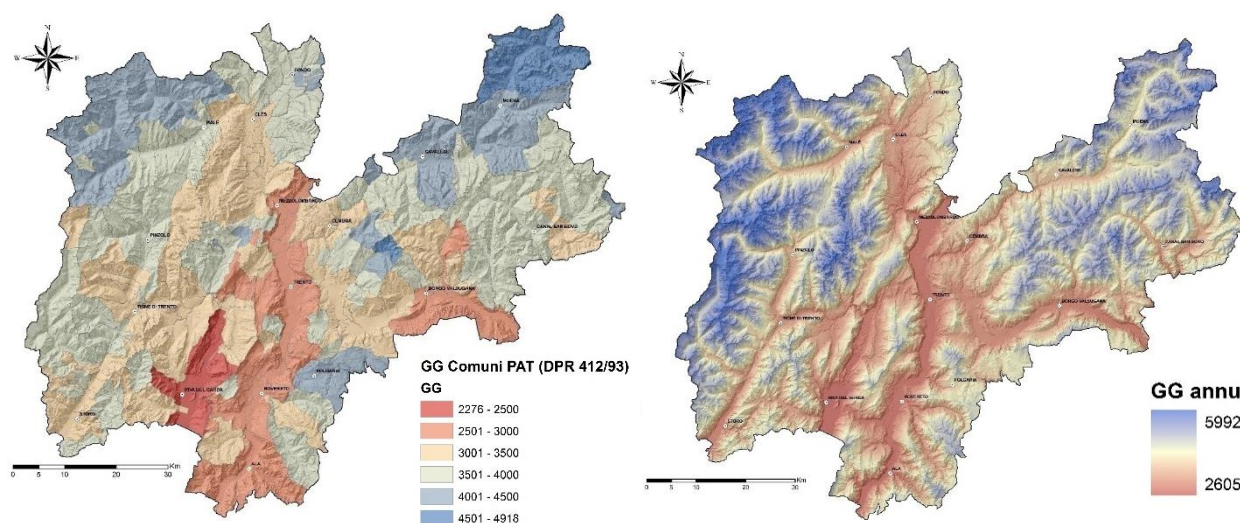


Figura 20: Mappa dei gradi giorno (GG) in Provincia di Trento, come stabilito dal D.P.R. n. 412/1993 (sx) e come risulta sulla base dell'analisi condotta nell'ambito del progetto GEOTERM (dx)

6.2 Radiazione solare globale

La radiazione solare è sia una **risorsa energetica rinnovabile** per il territorio (produzione di elettricità mediante tecnologia fotovoltaica, produzione di calore mediante tecnologia solare termica, cogenerazione) sia un **parametro importante nella definizione dei fabbisogni energetici di climatizzazione**. È quindi risultato di interesse mapparne dettagliatamente le caratteristiche spaziali, anche al fine di prospettare un possibile utilizzo del calore per applicazioni di accumulo termico stagionale nel sottosuolo.

Mediante l'impegno di algoritmi dedicati in ambiente GIS, utilizzando il DTM da dati lidar della Provincia di Trento con risoluzione di 50m, è stata realizzata la **mappatura della radiazione solare globale annua** della Provincia di Trento (Figura 21).

A titolo di confronto, per comprendere il dettaglio della cartografia qui prodotta, la cartografia solare del progetto europeo PVGIS [35] presenta una risoluzione spaziale per il subcontinente europeo pari a 1 km x 1 km; tale risoluzione può portare ad errori anche macroscopici nella valutazione delle radiazione solare, soprattutto in un territorio morfologicamente articolato, tipico di aree montane, come quello della Provincia di Trento.

La radiazione solare globale annua, individuata nel progetto GEOTERM, mostra un’elevata variabilità spaziale, in funzione delle diverse condizioni di esposizione e pendenza dei versanti in un range da un minimo annuo di circa 67 kWh/m² ad un massimo annuo di circa 1922 kWh/m².

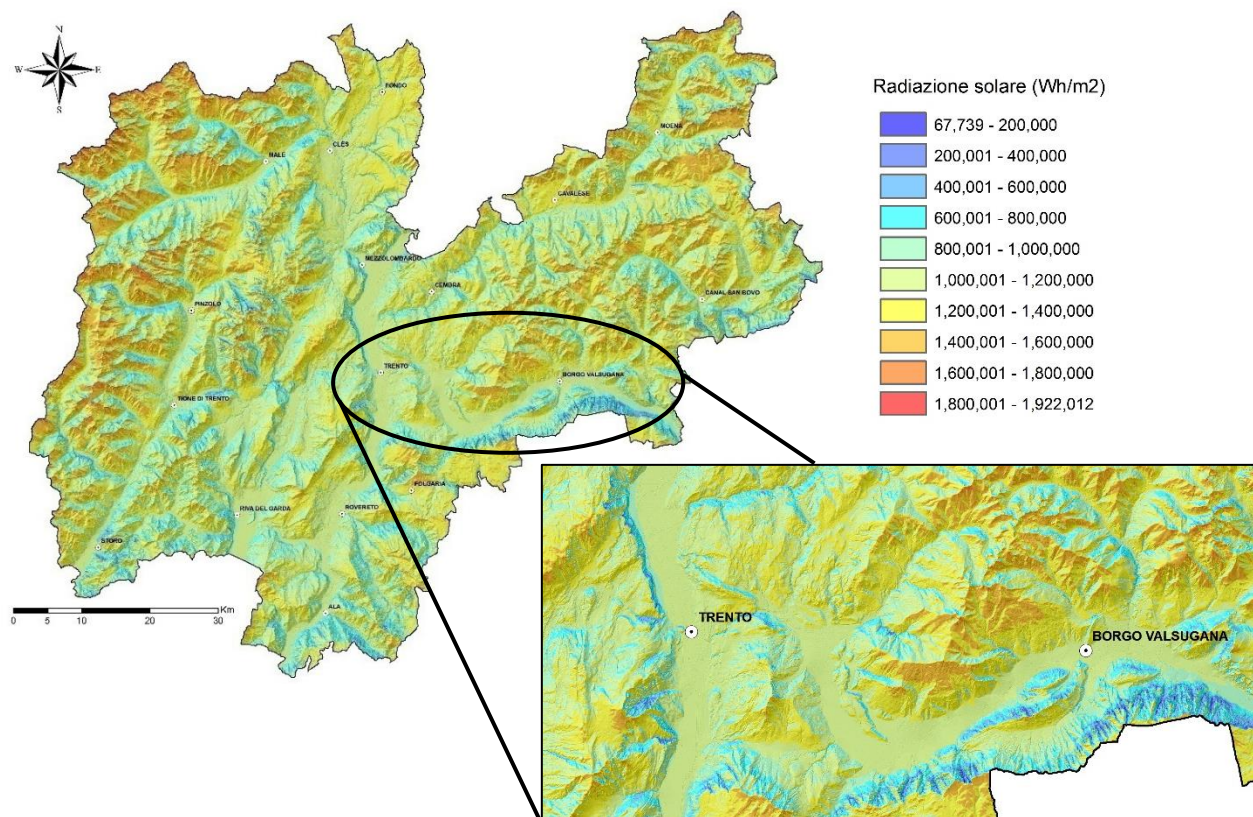


Figura 21: Mappa della radiazione solare globale annua in Provincia di Trento

6.3 Potenza termica e fabbisogni energetici per il riscaldamento

I sistemi di geoscambio a pompa di calore geotermica possono soddisfare sia le richieste di riscaldamento che le richieste di raffrescamento di un edificio (oltre che le richieste di acqua calda sanitaria, ACS). Il dimensionamento deve avvenire sulla maggiore delle due potenze richieste tra periodo invernale ed estivo. Considerando le caratteristiche climatiche dominanti della Provincia di Trento l’analisi energetica si è focalizzata sulle condizioni di impiego per scopi di solo riscaldamento degli edifici in ambito residenziale, risultando questa la categoria maggiormente diffusa.

Come tipologia edilizia di riferimento (denominata BT5), oggetto di mappatura GEOTERM, è stato scelto un **edificio residenziale standard** di superficie calpestabile pari a 100 m², con caratteristiche dell’involucro conformi al DM 11 marzo 2008 per la Fascia E [36]. In Tabella 4 l’edificio di riferimento è posto a confronto con altre 4 tipologie di edifici delle stesse dimensioni ma con involucri meno performanti e privi di

isolamento. I dati relativi alla trasmittanza termica (U_k) e al fattore di correzione dello scambio termico ($b_{tr,x}$) sono stati reperiti, oltre che dal DM 11 febbraio 2008 anche dalla norma UNI TS 11300-1 [37].

Tabella 4: Dati relativi alle caratteristiche costruttive delle 5 tipologie di edifici analizzati, l'edificio BT5 è oggetto di mappatura

Tip Ed	S calp (m2)	H pareti (m)	S est compl (m2)	S est fin (m2)	S est pareti (m2)	S sof (m2)	S pav (m2)	U pareti W/(m2*K)	U finestre W/(m2*K)	U soffitto W/(m2*K)	$b_{tr,s}$	U pavimento W/(m2*K)	$b_{tr,p}$
BT1	100	2.7	108	16	92	100	100	2.11	2.8	1.7	0.9	1.8	0.45
BT2	100	2.7	108	16	92	100	100	1.56	2.8	1.7	0.9	1.8	0.45
BT3	100	2.7	108	16	92	100	100	1.41	2.8	1.7	0.9	1.8	0.45
BT4	100	2.7	108	16	92	100	100	2.61	2.8	1.7	0.9	1.8	0.45
BT5	100	2.7	108	16	92	100	100	0.28	1.6	0.24	0.7	0.27	0.45

In particolare, per quanto riguarda le superfici esterne disperdenti sono state considerate le seguenti assunzioni:

- BT1: edificio con muratura in pietrame intonacata, spessore 0,55 m;
- BT2: muratura di mattoni pieni intonacati sulle due facce, spessore 0,35 m;
- BT3: muratura di mattoni semipieni, spessore 0,35 m;
- BT4: pannello prefabbricato in calcestruzzo non isolato, spessore 0,35 m;
- BT5: involucro conforme a DM 11 febbraio 2008 Fascia E;
- BT1, BT2, BT3, BT4: vetrata doppia a vetro normale con emissività 0,89 dimensioni 4-12-4 intercapedine aria, soletta piana in laterocemento spessore 0,25, basamento in calcestruzzo su terreno spessore 0,25, sottotetto confinante con altro tetto non isolato, pavimento controterra;
- BT5: sottotetto confinante con tetto isolato, pavimento controterra.

Per il **calcolo della potenza termica** da assegnare al generatore di calore viene seguita la norma UNI EN 12831 [38]. Le dispersioni termiche della struttura verso l'esterno possono essere ricondotte alla trasmissione (conduzione termica e convezione superficiale) e alla ventilazione. In particolare:

- *dispersione termica per conduzione*: passaggio di calore da un ambiente riscaldato verso l'ambiente esterno o verso un altro spazio avente una temperatura inferiore a quello riscaldato;
- *convezione superficiale*: scambio di calore che avviene tra una superficie e un fluido che si trovino a diversa temperatura e in movimento l'uno rispetto all'altra;
- *dispersione termica per ventilazione*: calore disperso dall'involucro dell'edificio verso l'esterno in seguito alla ventilazione o all'infiltrazione.

La **dispersione termica per trasmissione** (Φ_T , in W) è stata stimata con la seguente formula generale:

$$\Phi_T = \left(\sum_k S_k * U_k * e_k * b_{tr,x} \right) * (\theta_{in} - \theta_{ex})$$

dove:

S_k = area dell'elemento k dell'edificio, in m²;

U_k = trasmittanza termica dell'elemento k dell'edificio, in W/(m²K);

e_k = fattore di correzione per l'esposizione, che tiene conto di influssi climatici quali la diversa insolazione, l'assorbimento di umidità degli elementi dell'edificio, la velocità del vento e la temperatura;

$b_{tr,x}$ = fattore di correzione dello scambio termico tra ambiente climatizzato e non climatizzato, diverso da 1 nel caso in cui la temperatura di quest'ultimo sia diversa da quella dell'ambiente esterno, nel caso in esame è stato considerato un $b_{tr,s}$ per il sottotetto e un $b_{tr,p}$ per il pavimento;

θ_{in} = temperatura interna di progetto, stabilita pari a 20°C;

θ_{ex} = temperatura esterna di progetto (°C), corrisponde alla temperatura minima assoluta annua dell'aria (mappata in Figura 19).

La **dispersione termica per ventilazione** (Φ_V , in W) è invece stata stimata con la seguente formula generale:

$$\Phi_V = V * \rho * c_p * (\theta_{in} - \theta_{ex})$$

dove:

V = portata d'aria nello spazio riscaldato, stabilita pari a 0,3 vol/h;

ρ = densità dell'aria a θ_{in} , in kg / m³;

c_p = capacità termica specifica dell'aria a θ_{in} , in kJ / (kg K);

θ_{in} = temperatura interna di progetto, stabilita pari a 20°C;

θ_{ex} = temperatura esterna di progetto (°C), corrisponde alla temperatura minima assoluta annua dell'aria (mappata in Figura 19).

A questo punto, la **dispersione termica totale** (Φ_{TOT} , in W), associata alla potenza termica da assegnare al generatore di calore, viene calcolata facendo la somma della dispersione per trasmissione e della dispersione per ventilazione:

$$\Phi_{TOT} = \Phi_T + \Phi_V$$

Applicando le caratteristiche edilizie dell'edificio di riferimento (geograficamente invarianti) e le caratteristiche climatiche della Provincia di Trento (geograficamente varianti) è stata ottenuta la **mappa della potenza termica di riscaldamento**, illustrata in Figura 23.

In riferimento agli standard considerati per le caratteristiche edilizie e climatiche, la conformazione morfologica della Provincia di Trento comporta un ampio range di potenza termica al generatore di calore, da circa 3,7 kW nelle condizioni climatiche di fondovalle a circa 6,8 kW per le vette alpine. Considerando per la città di Trento una temperatura esterna di progetto (θ_{ex}) pari a - 12.8 °C, la Figura 22 mostra come in edifici con involucri meno performanti e privi di isolamento (BT1, BT2, BT3, BT4) la potenza termica richiesta al generatore di calore sia notevolmente maggiore, nei casi considerati dalle quattro alle cinque volte.

Passando al **calcolo del fabbisogno energetico di riscaldamento** (Q_{sh} , in kWh) vengono considerati i seguenti flussi energetici:

- **Perdite per trasmissione:** la perdita di calore per trasmissione attraverso elementi costruttivi quali muri, finestre, pavimenti, tetto;
- **Perdite per ventilazione:** la perdita di calore dalle fuoriuscite di aria riscaldata verso l'ambiente esterno, sia per ventilazione intenzionale (meccanica) che non intenzionale (infiltrazione);
- **Apporti solari:** l'energia dal sole può essere una fonte importante di guadagno di calore, soprattutto attraverso le superfici trasparenti vetrate;
- **Apporti interni:** guadagni di calore dal corpo umano, dall'illuminazione, da elettrodomestici, dalla cucina, ecc.

In forma semplificata è stato applicato il seguente metodo di calcolo:

$$Q_{sh} = 0,024 * GG * \frac{(\phi_T + \phi_V)}{(\theta_{in} - \theta_{ex})} - f_x * (Q_s + Q_i)$$

dove:

GG = gradi giorno (mappati in GEOTERM sia a livello mensile che annuale, Figura 20);

ϕ_T = dispersione per trasmissione, in W;

ϕ_V = dispersione per ventilazione, in W;

θ_{in} = temperatura interna di progetto, stabilita pari a 20°C;

θ_{ex} = temperatura esterna di progetto (°C), corrisponde alla temperatura minima assoluta annua dell'aria (mappata in Figura 19);

f_x = coefficiente di utilizzazione degli apporti gratuiti, assunto pari a 0,95;

Q_s = apporti solari attraverso i componenti di un involucro trasparente, in kWh;

Q_i = apporti gratuiti interni, in kWh.

Per quanto riguarda gli apporti solari questi sono definiti dalla seguente formula:

$$Q_s = 0,2 * \left(\sum_{esposiz} I_{sol,i} * S_{fin,i} \right)$$

dove:

0,2 = coefficiente di riduzione che tiene conto del fattore solare degli elementi trasparenti e di un fattore medio di ombreggiamento;

$I_{sol,i}$ = irraggiamento globale medio nel periodo di riscaldamento, riferito al piano verticale che contiene la chiusura trasparente, in kWh/m² (dati reperiti per la città di Trento nella norma UNI 10349 [39], la quale fornisce la radiazione solare mensile riferita ai quattro punti cardinali);

$S_{fin,i}$ = area della chiusura trasparente, in m².

Per quanto riguarda invece gli apporti gratuiti interni questi sono definiti dalla seguente formula:

$$Q_i = \frac{(\phi_{int} * S_{pav} * h)}{1000}$$

dove:

ϕ_{int} = apporti gratuiti interni, pari a 4 W/m² per edifici residenziali;

S_{pav} = superficie utile di pavimento, in m²;

h = numero di ore del periodo di riscaldamento.

Applicando le caratteristiche edilizie di riferimento (geograficamente invarianti) e le caratteristiche climatiche della Provincia di Trento (geograficamente varianti) sono state ottenute le **mappe del fabbisogno energetico mensile di riscaldamento nel periodo 1 Ottobre - 30 Aprile**. La somma di tali mappe ha permesso di ottenere il **fabbisogno annuale**, illustrato in Figura 23. La conformazione morfologica della Provincia di

Trento implica un ampio range nel fabbisogno energetico annuo di riscaldamento, da circa 4.000 kWh nelle condizioni climatiche di fondovalle a circa 13.000 kWh per le vette alpine.

Considerando per la città di Trento una temperatura esterna di progetto (θ_{ex}) pari a - 12,8 °C e 2730 GG, la Figura 22 mostra come in edifici con involucri meno performanti e privi di isolamento (BT1, BT2, BT3, BT4) il fabbisogno di riscaldamento sia notevolmente maggiore, nei casi considerati dalle sei alle otto volte superiore.

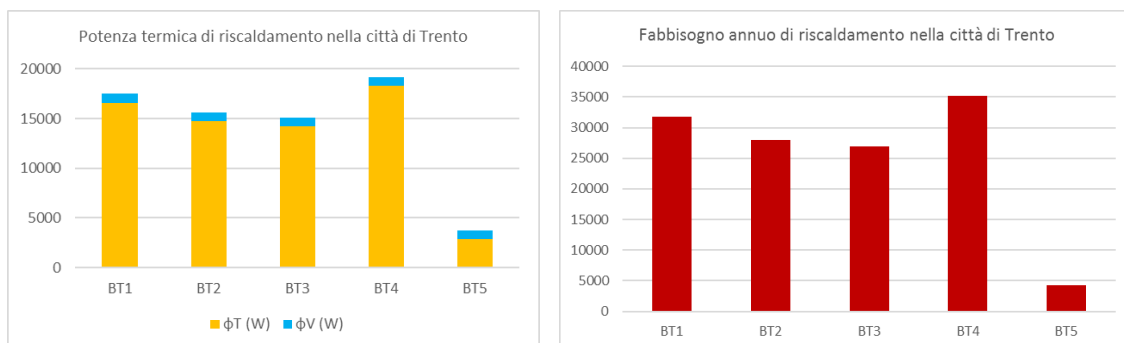


Figura 22: Per le cinque tipologie di edifici analizzati in città di Trento: potenza termica di riscaldamento (W) (sx); fabbisogno annuo di riscaldamento (kWh) (dx)

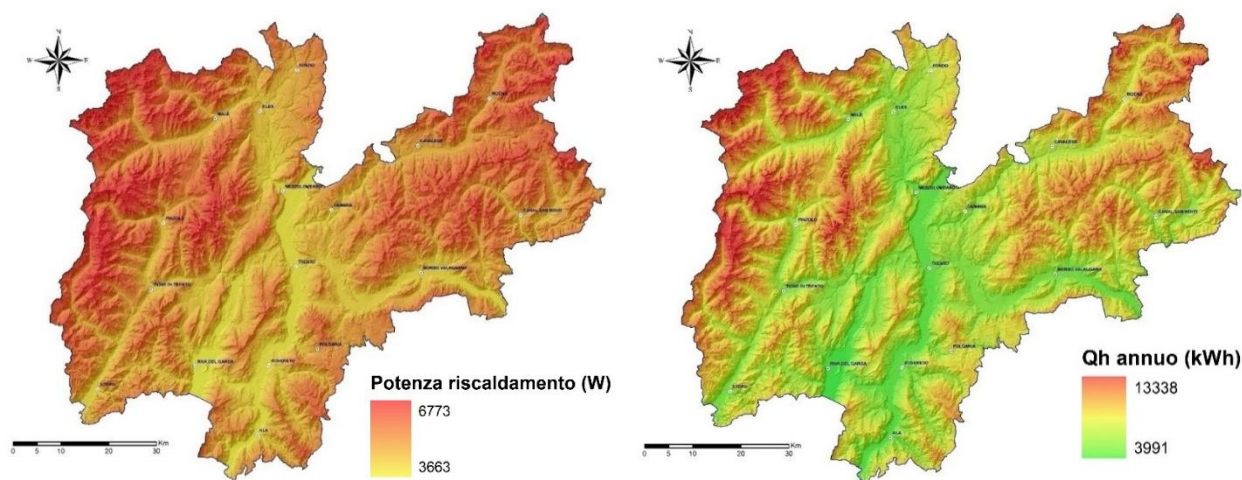


Figura 23: Mappa della potenza termica (sx) e del fabbisogno energetico annuo (dx) per il riscaldamento in Provincia di Trento (edificio residenziale di superficie 100 m², con caratteristiche dell'involucro conformi al DM 11 febbraio 2008 per la Fascia E)

6.4 Caratteristiche idrogeologiche

La presenza di **falda acquifera** determina un **incremento delle capacità di trasporto di calore nel sottosuolo sia per conduzione** (terreno saturo) **che per convezione**. Per questo motivo, le carte della profondità del livello di saturazione (livello di prima falda) e della velocità della falda acquifera, per la loro rilevante influenza nei processi di scambio termico, costituiscono due tematismi di notevole importanza.

Per il calcolo della **velocità della falda acquifera** è stata applicata la legge di Darcy, secondo la quale la velocità è data dal prodotto tra la conducibilità idraulica (k) ed il gradiente idraulico (i).

$$v = k * i$$

La determinazione dei valori di conducibilità idraulica, della profondità del livello di saturazione e del gradiente idraulico risulta un'operazione assai critica, sia per la scarsità di informazioni dirette ottenute da misure in situ che per la variabilità laterale e verticale di tali parametri.

La **conducibilità idraulica** è stata mappata a tre scale di analisi (vedi paragrafo 5.3): Provincia di Trento, Comune di Trento, Valle dell'Adige.

A livello provinciale la conducibilità idraulica, mediata sui primi 100 m di sottosuolo e assegnata sulla base di valori bibliografici e sulle indicazioni stratigrafiche disponibili da CLT (Domenico and Schwartz [31]), presenta un'elevata variabilità (Figura 24).

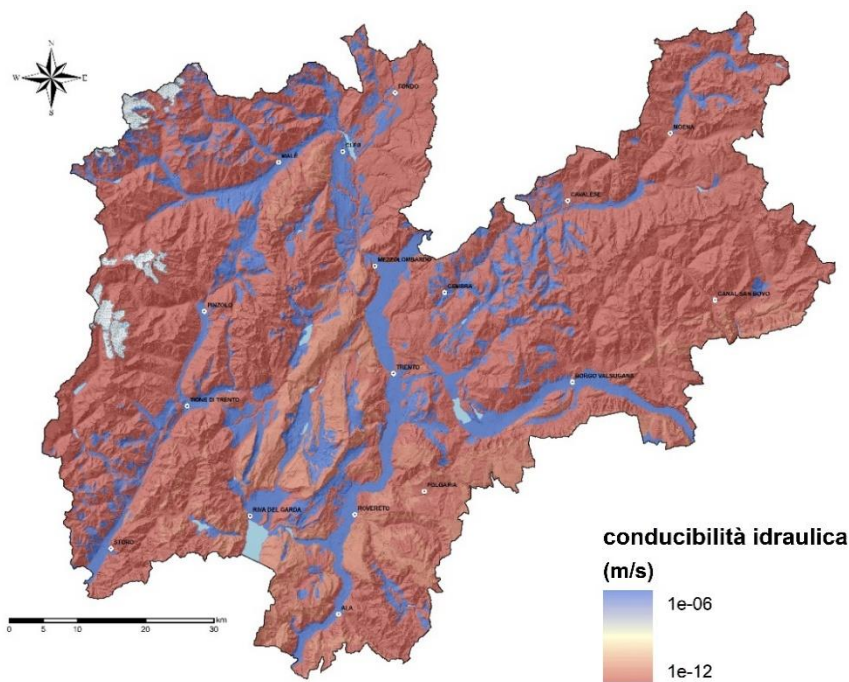


Figura 24: Mappa della conducibilità idraulica in Provincia di Trento

L'analisi di dettaglio nella Valle dell'Adige, elaborata mediante il database litostratigrafico delle perforazioni fornito dal Servizio Geologico della PAT, ha permesso di ottenere la mappa della conducibilità idraulica, mediata sui primi 100 m di sottosuolo, tramite interpolazione geostatistica con metodo Ordinary Kriging. La mappa è visibile in Figura 25.

I valori di conducibilità idraulica nella Valle dell'Adige sono compresi tra $8,6 \cdot 10^{-4}$ m/s e $2,5 \cdot 10^{-5}$ m/s, essi risultano quindi maggiori rispetto a quelli assegnati nelle due precedenti cartografie (Provincia di Trento e Comune di Trento), che in tal senso risultano conservative con un valore pari a $1 \cdot 10^{-6}$ m/s. L'intera Valle dell'Adige non è più caratterizzata come un'unica unità litostratigrafica (depositi detritici, alluvionali e glaciali indistinti) ma puntualmente caratterizzata sia mediante l'utilizzo delle informazioni litostratigrafiche disponibili, sia considerando la morfologia del bedrock roccioso che la confina lateralmente ed in profondità. Si possono quindi distinguere i depositi alluvionali più grossolani, in corrispondenza dei conoidi e caratterizzati dai valori di conducibilità idraulica più elevati, dai depositi alluvionali a conducibilità idraulica inferiore a granulometria sabbiosa o sabbioso/limosa, fino ai depositi più fini limoso/argillosi di origine lacustre o palustre. La mappa della conducibilità idraulica per la Valle dell'Adige è inoltre chiaramente influenzata dalla distanza dai versanti rocciosi. Infatti, verso i versanti rocciosi la conducibilità idraulica risulta ridursi fortemente perché, lungo la verticale considerata (100 m), il peso delle proprietà del fondo roccioso, sempre più superficiale ed a bassa conducibilità idraulica, diviene sempre più rilevante.

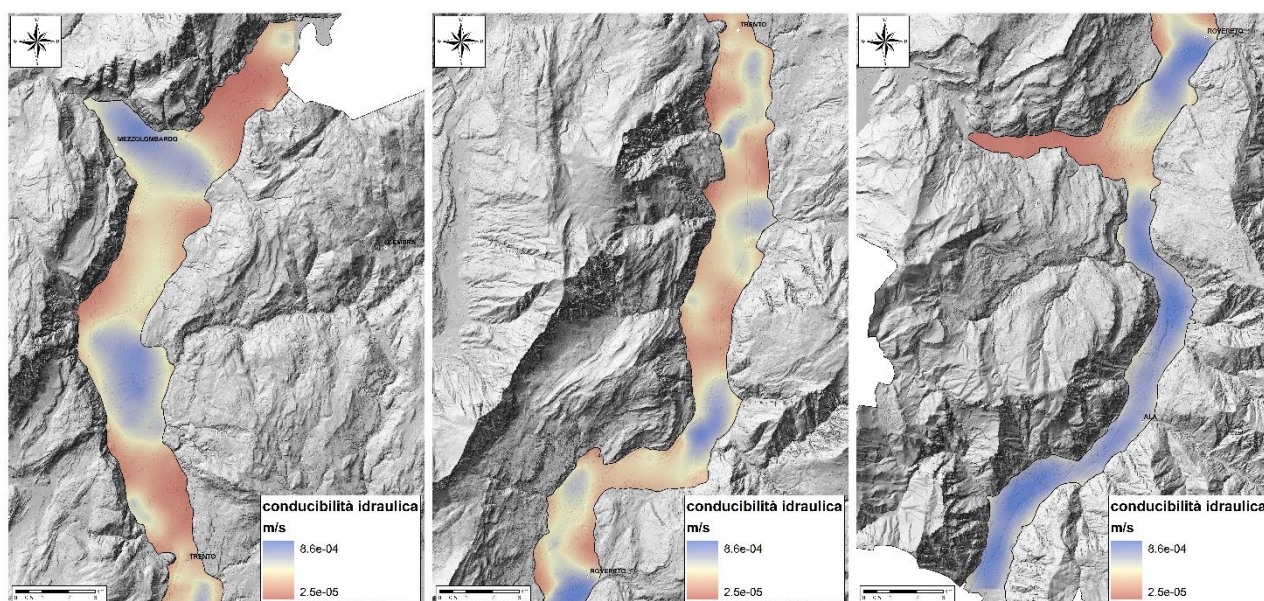


Figura 25: Mappa della conducibilità idraulica nella Valle dell'Adige (da sinistra: nord, centro, sud)

Proseguendo l'analisi degli altri parametri idrogeologici, le mappe della profondità del livello di saturazione, del gradiente idraulico e della velocità della falda acquifera sono state realizzate per la sola Valle dell'Adige. Infatti, solo in quest'area è stato possibile reperire le necessarie informazioni idrogeologiche.

Le mappe della **profondità del livello di saturazione**, ottenute in ambiente GIS tramite interpolazione geostatistica con metodo Ordinary Kriging dei punti di misura GEOALP Giugno 2008 e GEOALP Ottobre 2008, sono visibili rispettivamente in Figura 26 e in Figura 27.

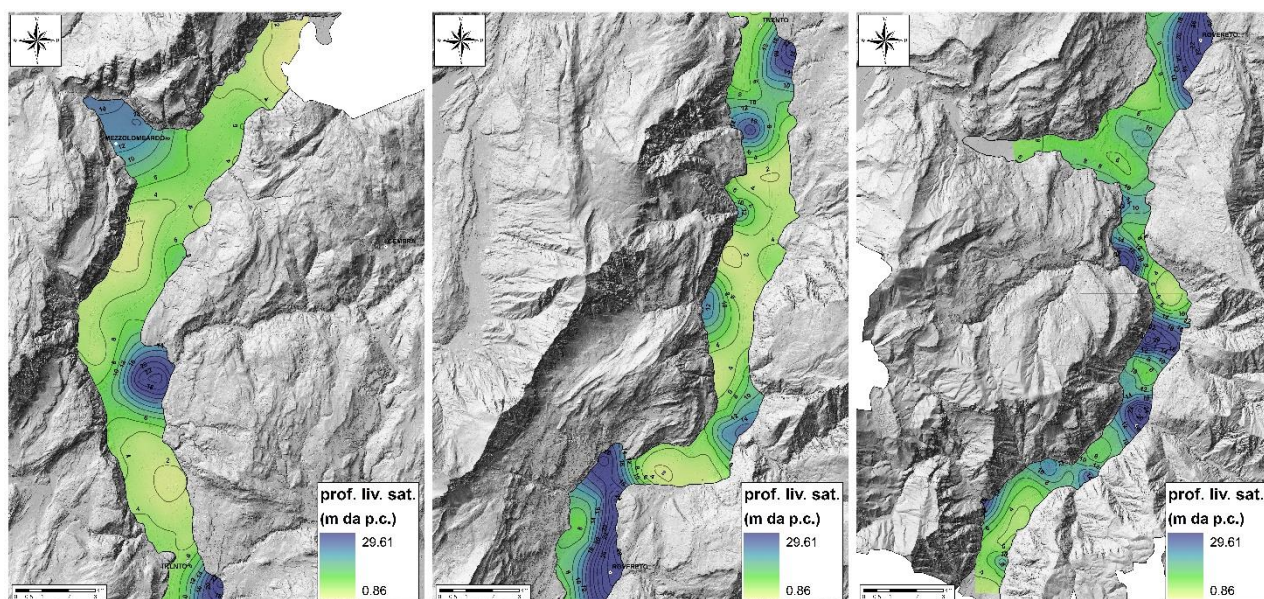


Figura 26: Mappa della profondità del livello di saturazione nella Valle dell'Adige, Giugno 2008 (da sinistra: nord, centro, sud)

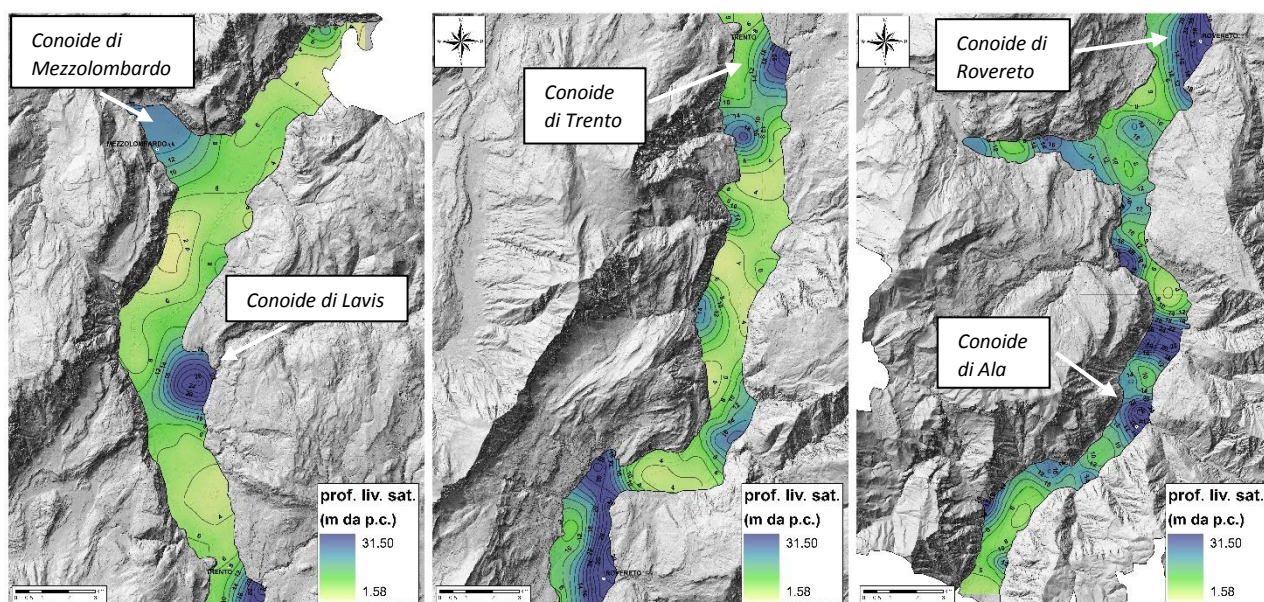


Figura 27: Mappa della profondità del livello di saturazione nella Valle dell'Adige, Ottobre 2008 (da sinistra: nord, centro, sud)

Le mappe mostrano come tutta la vallata sia caratterizzata dalla presenza di una falda freatica piuttosto superficiale che interessa tutti i sedimenti di riempimento vallivo. Nel periodo di piena, in Giugno, le profondità del livello di saturazione variano da un minimo di 0,86 m da p.c. ad un massimo di 29,61 m da p.c., mentre nel periodo di magra, in Ottobre, la falda acquifera si abbassa di circa 1-2 metri, portando il valore minimo a 1,58 m da p.c. ed il valore massimo a 31,50 m da p.c. I valori massimi sono riscontrabili in corrispondenza dei principali conoidi alluvionali (es: Lavis, Trento, Rovereto, Ala) e dei pozzi attivi ad elevate

portate di prelievo (es: campo pozzi di Spini dell'acquedotto di Trento, barriera idraulica di Trento nord, pozzo acquedotto di Calliano).

La profondità del livello di saturazione verrà nuovamente presa in considerazione nei prossimi paragrafi, che riguardano la realizzazione delle mappe della conducibilità termica e della capacità termica per la Valle dell'Adige, a partire dai dati stratigrafici forniti dal Servizio Geologico della PAT (Figura 16). Infatti, le condizioni di presenza o meno di acqua interstiziale nei materiali alluvionali costituiscono un fattore fortemente condizionante i parametri termici di conducibilità e capacità, la presenza della fase liquida nei pori del sedimento ne incrementa i rispettivi valori in maniera significativa.

In maniera analoga alla profondità del livello di prima falda, al di sotto della quale tutti i terreni sono considerati saturi, è stata inoltre realizzata la mappa della **quota assoluta del livello di saturazione** (Figura 28 e Figura 29). Dall'osservazione della cartografia idrogeologica si può notare una direzione principale di deflusso da nord a sud, la presenza di zone di alimentazione in corrispondenza delle grosse conoidi laterali (convessità delle linee isofreatiche), zone di prelievo in corrispondenza dei principali pozzi acquedottistici e, in alcuni tratti della valle, la presenza di un marcato asse di drenaggio concentrato localizzato in corrispondenza della direttrice dell'asta attiva del fiume Adige.

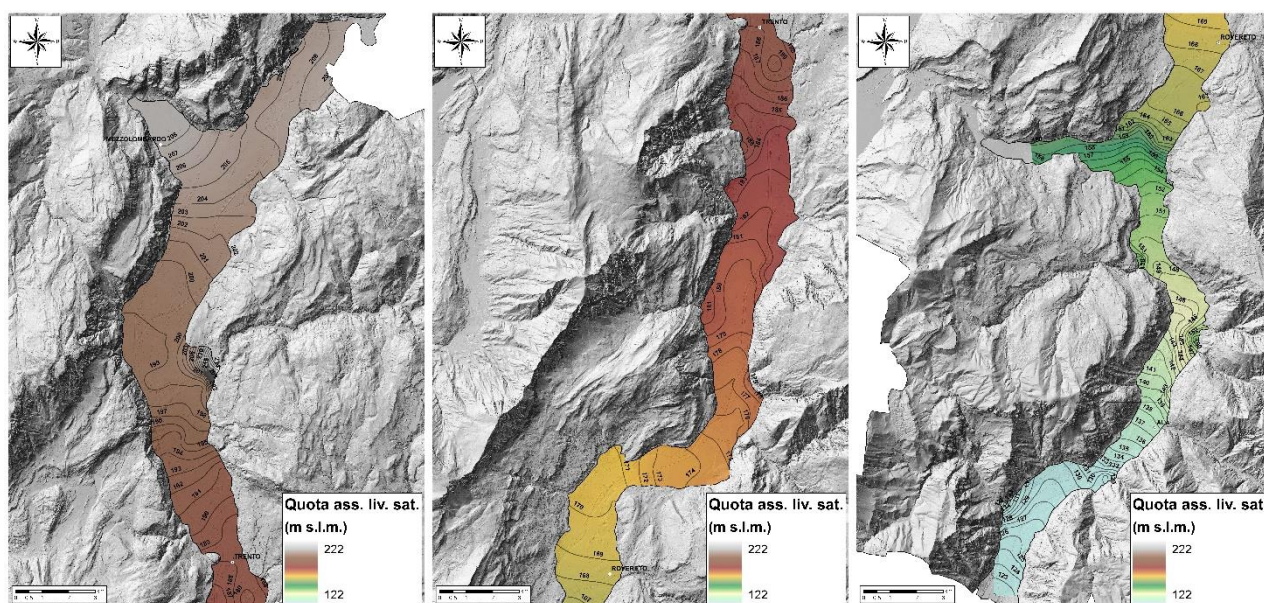


Figura 28: Mappa della quota assoluta del livello di saturazione nella Valle dell'Adige, Giugno 2008 (da sinistra: nord, centro, sud)

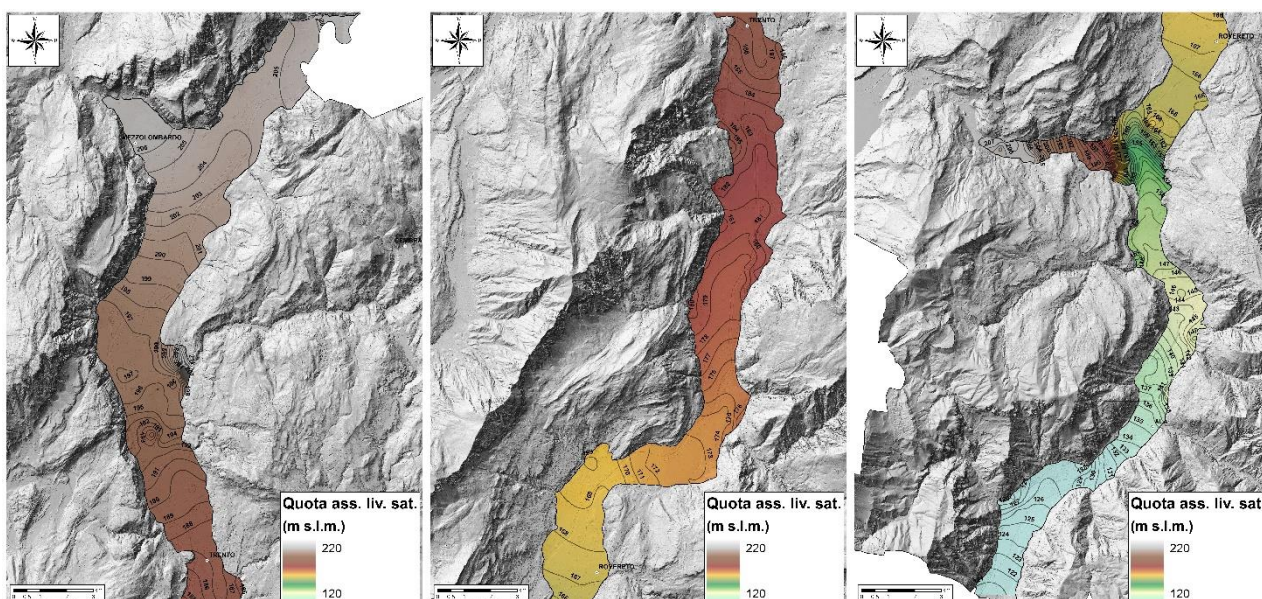


Figura 29: Mappa della quota assoluta del livello di saturazione nella Valle dell'Adige, Ottobre 2008 (da sinistra: nord, centro, sud)

Per poter ottenere la mappa del **gradiente idraulico**, il suo valore è stato calcolato in tutta una serie di punti di informazione di quota freaticometrica distribuiti in maniera omogenea nell'area di studio. In questi punti il gradiente idraulico è stato calcolato come:

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta l}$$

con Δh differenza di quota assoluta del livello di saturazione tra due punti (carico idraulico) e Δl distanza sul piano tra gli stessi due punti lungo la quale avviene la perdita di carico idraulico Δh .

La base per calcolare il valore puntuale del gradiente idraulico è stata quindi la mappa della quota assoluta del livello di saturazione ottenuta in precedenza, in particolare l'analisi è stata realizzata sull'assetto idrogeologico rilevato nella campagna di misure dell'Ottobre 2008 (Figura 29). Effettuando in ambiente GIS l'interpolazione geostatistica con metodo Ordinary Kriging dei valori puntuali di gradiente idraulico è stata ottenuta la mappa in Figura 30.

In generale, il gradiente idraulico mostra un range di variazione piuttosto ampio, passando da valori inferiori all'1 per mille a valori prossimi al 5 per cento. I valori più elevati sono raggiunti solamente in corrispondenza del conoide di Lavis a nord di Trento, nell'area a sud di Rovereto in cui la Valle di Loppio confluisce nella Valle dell'Adige e in corrispondenza delle zone di prelievo mediante pozzi acquedottistici (in questo caso si tratta di un gradiente idraulico artificiale).

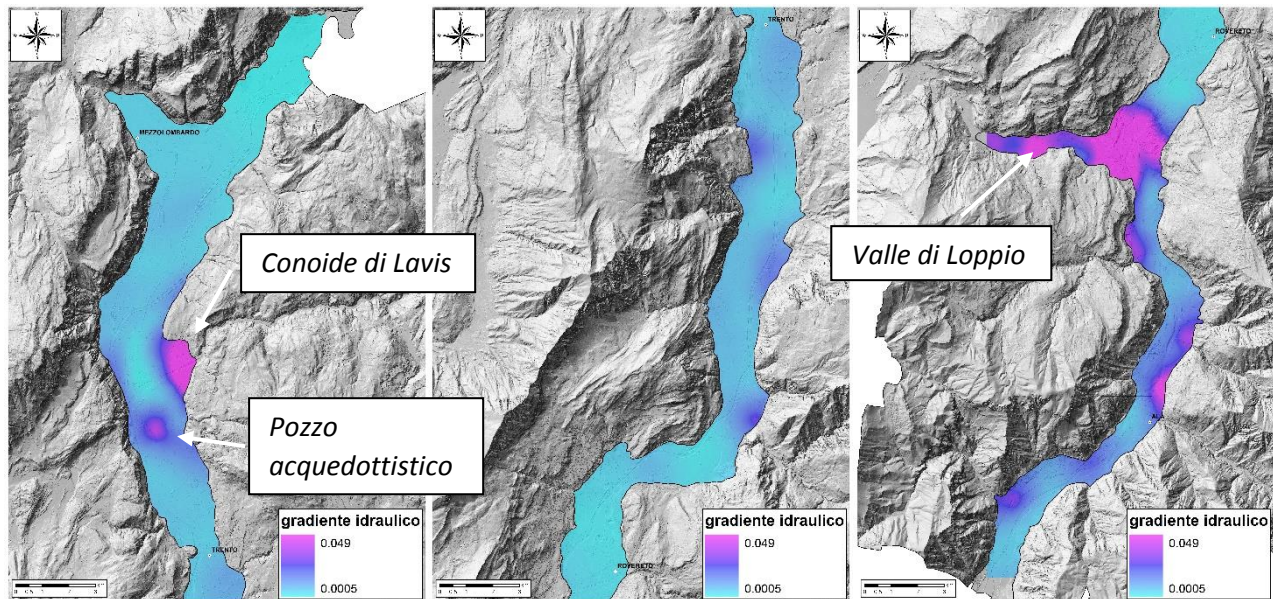


Figura 30: Mappa del gradiente idraulico nella Valle dell'Adige, Ottobre 2008 (da sinistra: nord, centro, sud)

A questo punto, avendo a disposizione sia la mappa del gradiente idraulico (i) sia la mappa della conducibilità idraulica (k), è stato possibile realizzare la mappa della **velocità darciana della falda acquifera** (v) utilizzando la nota legge di Darcy:

$$v = k * i$$

La mappa ottenuta in ambiente GIS è visibile in Figura 31.

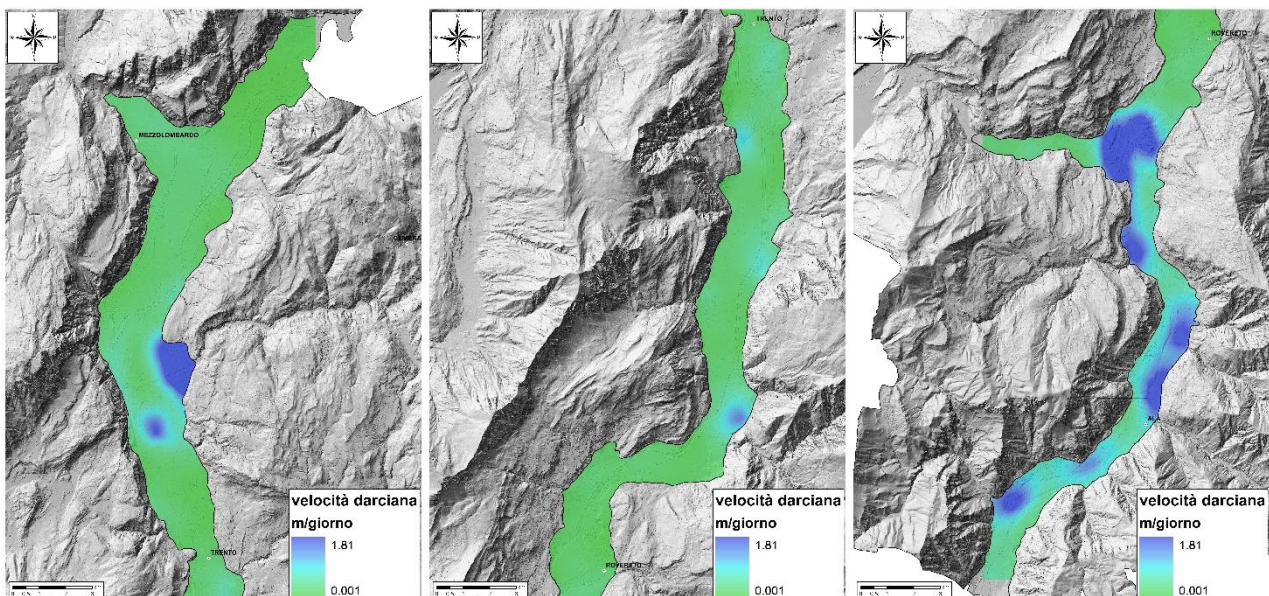


Figura 31: Mappa della velocità darciana della falda acquifera nella Valle dell'Adige, Ottobre 2008 (da sinistra: nord, centro, sud)

La velocità della falda acquifera mostra un range di variazione piuttosto ampio, passando da valori prossimi a 2 m/giorno a valori di circa 1 mm/giorno. I valori più elevati sono raggiunti in corrispondenza dei conoidi alluvionali (tra cui in rilievo soprattutto quello di Lavis a nord di Trento), nell'area a sud di Rovereto in cui la Valle di Loppio confluisce nella Valle dell'Adige e in corrispondenza delle zone di prelievo mediante pozzi acquedottistici (in quest'ultimo caso si tratta di velocità di falda indotta artificialmente e con carattere tipicamente puntuale).

La velocità della falda acquifera è un parametro estremamente importante nei processi di trasporto termico e quindi di scambio di calore nel sottosuolo (geoscambio). Infatti, in presenza di un acquifero in movimento, il trasporto di calore avviene non solo per conduzione ma anche per convezione. Tanto più il fluido è veloce tanto più la componente convettiva è preponderante sulla componente conduttiva e viceversa.

Nel precedente paragrafo 6.1 veniva riportato come, in assenza di anomalie geotermiche locali, la temperatura del sottosuolo nelle prime decine di metri di profondità (θ_g) può essere assunta pari alla temperatura media annua dell'aria (θ_m) (Figura 18). Tuttavia, la **temperatura della falda acquifera** che permea il sottosuolo può discostarsi dal valore di θ_m , in maniera anche significativa, se influenzata da particolari apporti naturali o antropici.

Le mappe della temperatura della falda acquifera a 20 m di profondità dal piano di campagna sono state ottenute in ambiente GIS tramite interpolazione geostatistica con metodo Ordinary Kriging dei punti di misura GEOALP Novembre 2011 (Figura 32) e GEOALP Maggio 2012 (Figura 33).

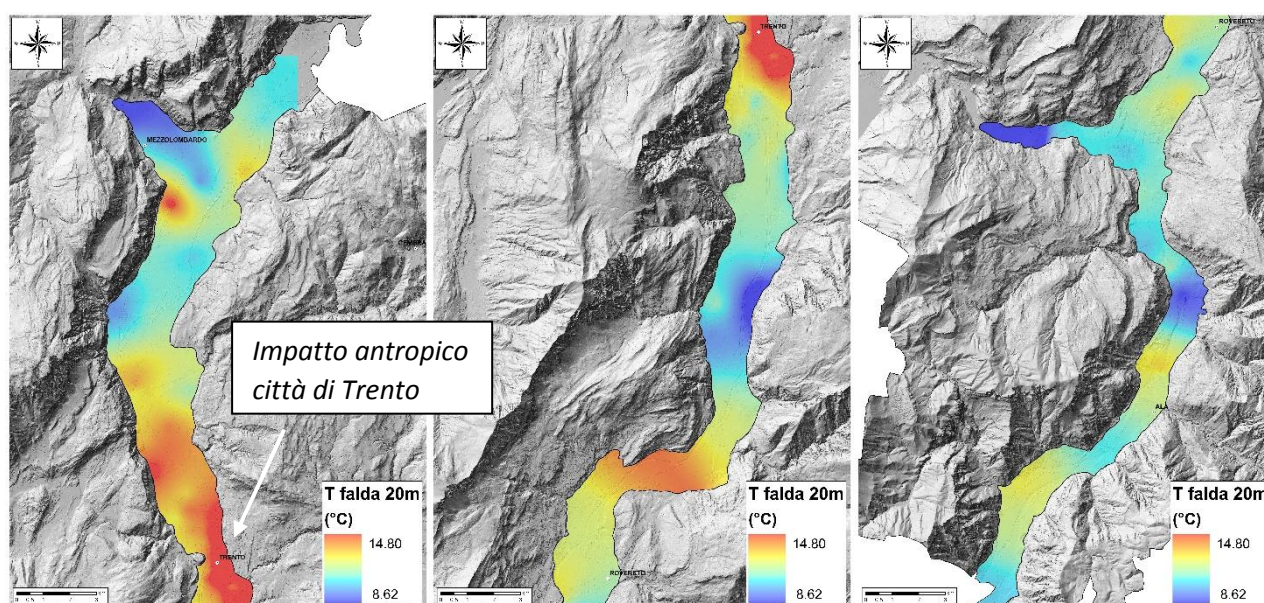


Figura 32: Mappa della temperatura della falda acquifera nella Valle dell'Adige, Novembre 2011 (da sinistra: nord, centro, sud)

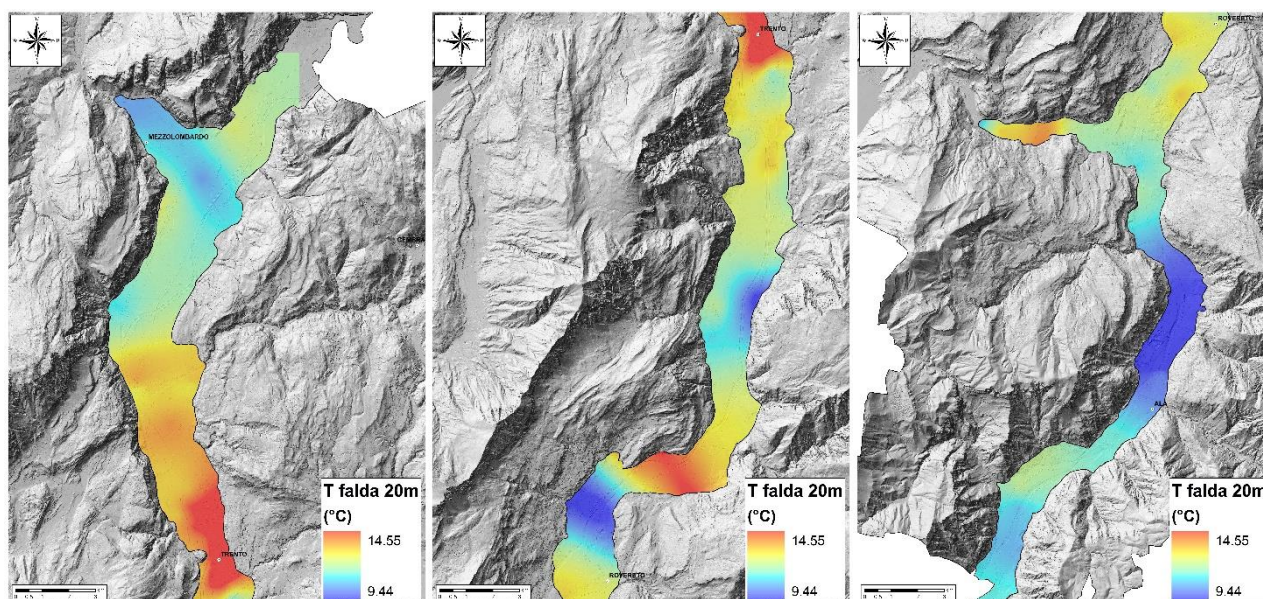


Figura 33: Mappa della temperatura della falda acquifera nella Valle dell'Adige, Maggio 2012 (da sinistra: nord, centro, sud)

Se osservando la Figura 18 ci si potrebbero aspettare valori di temperatura uniformi nell'intera Valle dell'Adige, compresi tra 12 e 13 °C, le mappe in Figura 32 e in Figura 33 mostrano una situazione assai più variegata. In Novembre le temperature variano da un minimo di 8,62 °C ad un massimo di 14,80 °C, in Maggio da 9,44 °C a 14,55 °C.

Nella maggior parte dei piezometri misurati si nota un leggero raffreddamento delle acque in primavera rispetto all'autunno. Presso la città di Trento di nota inoltre un evidente impatto antropico: le acque con maggior temperatura si ritrovano lungo l'asse di Via Brennero, area in cui sono situati edifici dotati di impianti di riscaldamento/raffrescamento con acqua di falda ed in cui sono presenti alcune situazioni di inquinamento della falda stessa.

6.5 Proprietà termofisiche del sottosuolo

Le proprietà termofisiche del sottosuolo, conducibilità termica (λ) e capacità termica volumetrica (S_{vc}), sono state mappate a tre scale di analisi: Provincia di Trento, Comune di Trento, Valle dell'Adige.

A livello provinciale la **conducibilità termica** (da valori bibliografici VDI 4640 [7]), mediata su 100 m di sottosuolo e assegnata alla CLT, presenta valori compresi tra 1,7 e 3,3 Wm⁻¹k⁻¹ (Figura 34).

Sono quindi compresi valori di conducibilità termica media (tra 1,7 e 2,5 Wm⁻¹k⁻¹, in cui rientrano depositi sciolti parzialmente saturi o saturi e rocce a bassa conducibilità termica come basalto, gabbro, diorite,

micascisto, marmo, marna, rocce siltose e argillose), medio-elevata (tra 2,6 e 2,9 $\text{Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$, in cui rientrano gneiss, anfiboliti, arenaria, calcare), elevata (superiori a 3,0 $\text{Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$, in cui rientrano granito, riolite, dolomia).

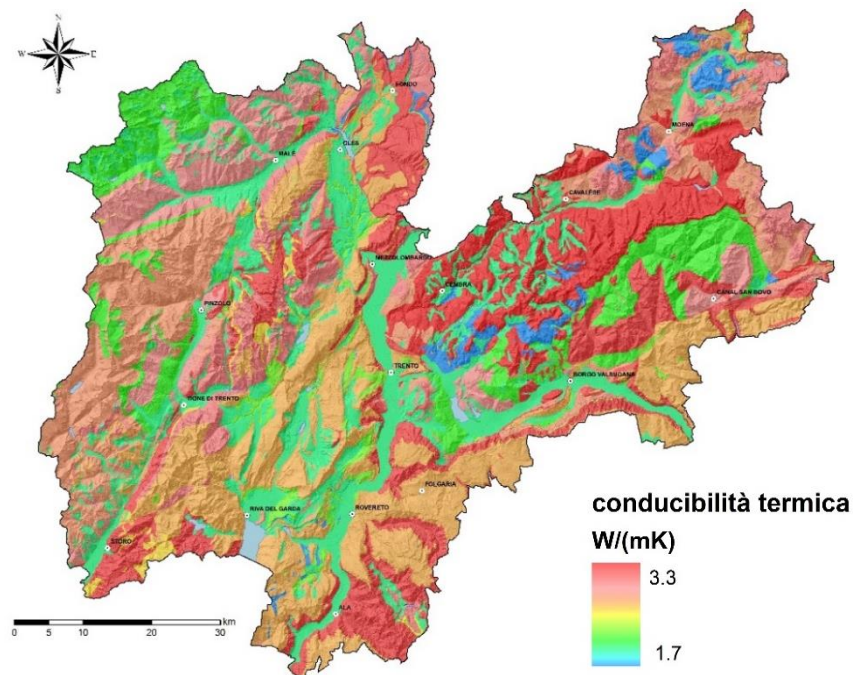


Figura 34: Mappa della conducibilità termica in Provincia di Trento

Nella Valle dell'Adige l'analisi di dettaglio da database litostratigrafico ha permesso di ottenere la mappa, in Figura 35, della conducibilità termica dei primi 100 m di sottosuolo (media tra valori bibliografici VDI 4640 [7] e valori di laboratorio [29]). L'analisi è per interpolazione geostatistica con metodo Ordinary Kriging.

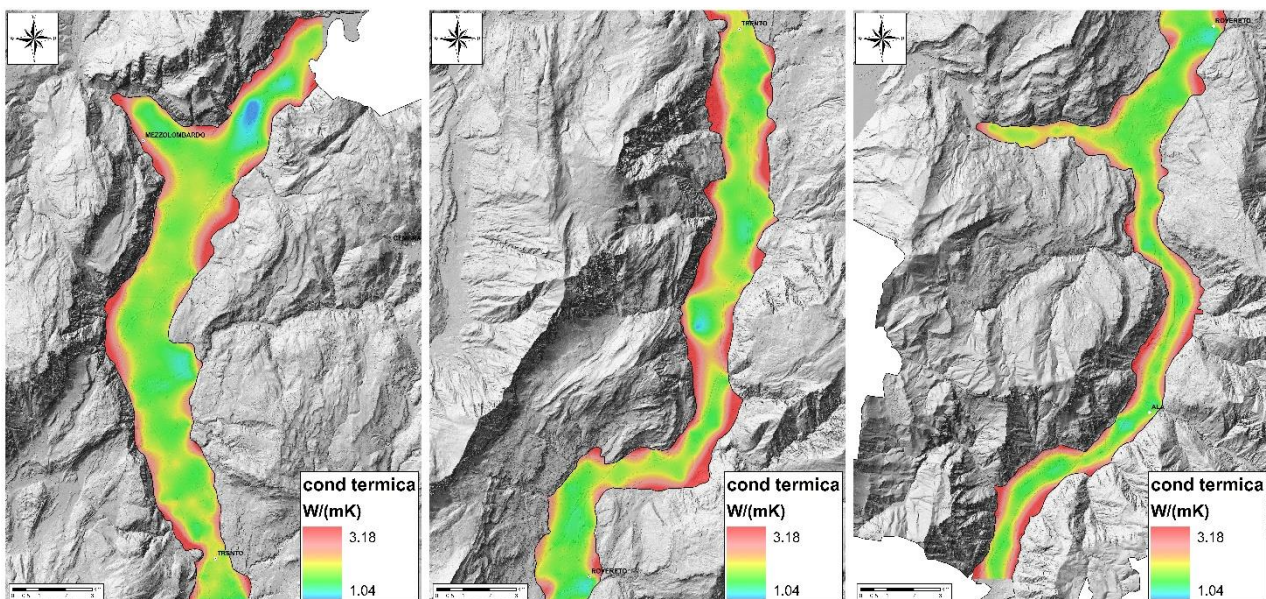


Figura 35: Mappa della conducibilità termica nella Valle dell'Adige (da sinistra: nord, centro, sud)

I valori di conducibilità termica nella Valle dell'Adige sono compresi tra $1,04 \text{ Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$ e $3,18 \text{ Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$, essi risultano quindi in alcune aree minori e in altre maggiori rispetto a quelli assegnati nelle due precedenti cartografie (2,06 nella cartografia per la Provincia di Trento, 1,92 nella cartografia per il Comune di Trento). L'intera Valle dell'Adige non è più caratterizzata come un'unica unità litostratigrafica (depositi detritici, alluvionali e glaciali indistinti) ma puntualmente caratterizzata sia mediante l'utilizzo delle informazioni litostratigrafiche delle perforazioni, sia considerando la morfologia del bedrock roccioso che la delimita lateralmente e in profondità.

La mappa della conducibilità termica per la Valle dell'Adige, oltre che dalle caratteristiche granulometriche dei suoi depositi, è chiaramente influenzata da altri due fattori: la distanza dai versanti rocciosi e la profondità del livello di saturazione. Per quanto riguarda il primo aspetto questo si riflette in un aumento della conducibilità termica in prossimità dei versanti rocciosi, poichè viene intercettato, lungo la verticale d'indagine fino a 100 m di profondità, uno spessore sempre maggiore di bedrock, generalmente caratterizzato da valori più elevati di conducibilità termica. Per quanto riguarda invece il secondo aspetto questo determina bassi valori di conducibilità termica laddove il livello di saturazione è più profondo. Ecco quindi che in corrispondenza dei principali conoidi alluvionali (come ad esempio quelli di Lavis, Trento, Rovereto, Ala) si ritrovano aree a minore conducibilità termica (Figura 41).

Confrontando la resa di scambio termico espressa in termini di potenza specifica unitaria (W/m), indicata nelle linee guida VDI 4640, relativa ad una SGV standard in terreno ghiaioso/sabbioso in condizioni insature, sature e con moto di falda acquifera a velocità rilevante si possono notare notevoli differenze. Il “moto di falda acquifera rilevante” determina rese incrementate di circa il 50 % rispetto al “moto assente in terreno saturo”. Tuttavia non viene specificato e quantificato il concetto di “moto di falda acquifera rilevante”.

Mediante un parametro di “conducibilità termica efficace” si è cercato di quantificare l'influenza della velocità di flusso delle acque sotterranee sull'aumento del trasporto di calore, quindi sulla resa (W/m) delle SGV.

Arslan e Huber (2013) [40], mediante approfondite indagini sperimentali e prove di laboratorio, hanno caratterizzato e quantificato i processi di trasporto termico per conduzione e convezione in varie tipologie di materiali sciolti, sotto varie condizioni di gradiente idraulico (Figura 36). Tutti i risultati raccolti nelle indagini sperimentali sono stati verificati anche mediante analisi numerica, fornendo raccomandazioni per incrementare la conducibilità termica in funzione della velocità di Darcy. Come illustrato in Figura 36, vi è una correlazione esponenziale tra l'aumento della conducibilità termica efficace in sabbie sature e la velocità di flusso delle acque sotterranee: velocità di Darcy fino a 0,3 m/giorno (velocità bassa) portano ad un aumento

fino al 25%, tra 0,3 e 0,6 m/giorno (velocità media) fino al 50%, tra 0,6 e 1,0 m/giorno (velocità alta) fino al 100%.

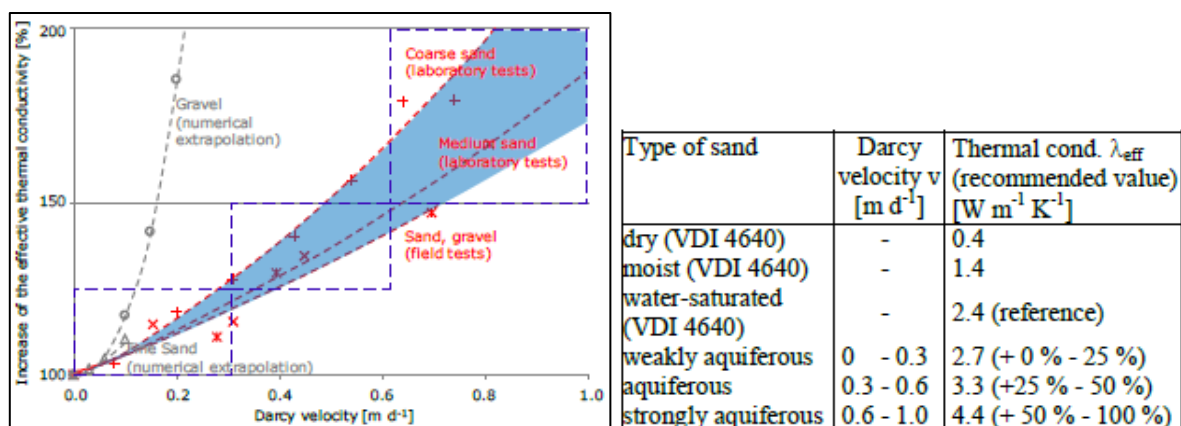


Figura 36: Incremento della conducibilità termica efficace in differenti sedimenti saturi in dipendenza della velocità di Darcy [40]

Nell'intervallo di interesse 0-100 m, fissata la profondità della falda acquifera (pf), è quindi possibile distinguere un primo intervallo 0 - pf a conducibilità termica non influenzata dalla componente convettiva e un successivo intervallo pf - 100 m a conducibilità termica incrementata della componente convettiva. La formula generale, applicata nel progetto GEOTERM per la Valle dell'Adige, è la seguente:

$$\lambda_{eff} = \frac{pf * \lambda + (100 - pf) * \left(\lambda + \lambda * \left(\frac{34.655 * v_d^2 + 64.233 * v_d + 0.677}{100} \right) \right)}{100}$$

dove: pf = profondità della falda acquifera (mappata in Figura 27); λ = conducibilità termica (mappata in Figura 35); v_d = velocità darciana (mappata in Figura 31).

I valori di conducibilità termica efficace nella Valle dell'Adige sono compresi tra 1,04 Wm⁻¹k⁻¹ e 4,26 Wm⁻¹k⁻¹ (Figura 37). I valori più elevati sono raggiunti in corrispondenza delle aree a maggior velocità della falda acquifera, presso i conoidi alluvionali (tra cui in rilievo soprattutto quello di Lavis a nord di Trento), nell'area a sud di Rovereto in cui la Valle di Loppio confluisce nella Valle dell'Adige e in corrispondenza delle zone di prelievo mediante pozzi acquedottistici. In queste aree trascurare la componente di trasporto di calore per convezione comporta una notevole sottovalutazione del reale potenziale di geoscambio, portando ad un sovradimensionamento nella lunghezza delle sonde stesse (con incremento dei costi di investimento) (Figura 38).

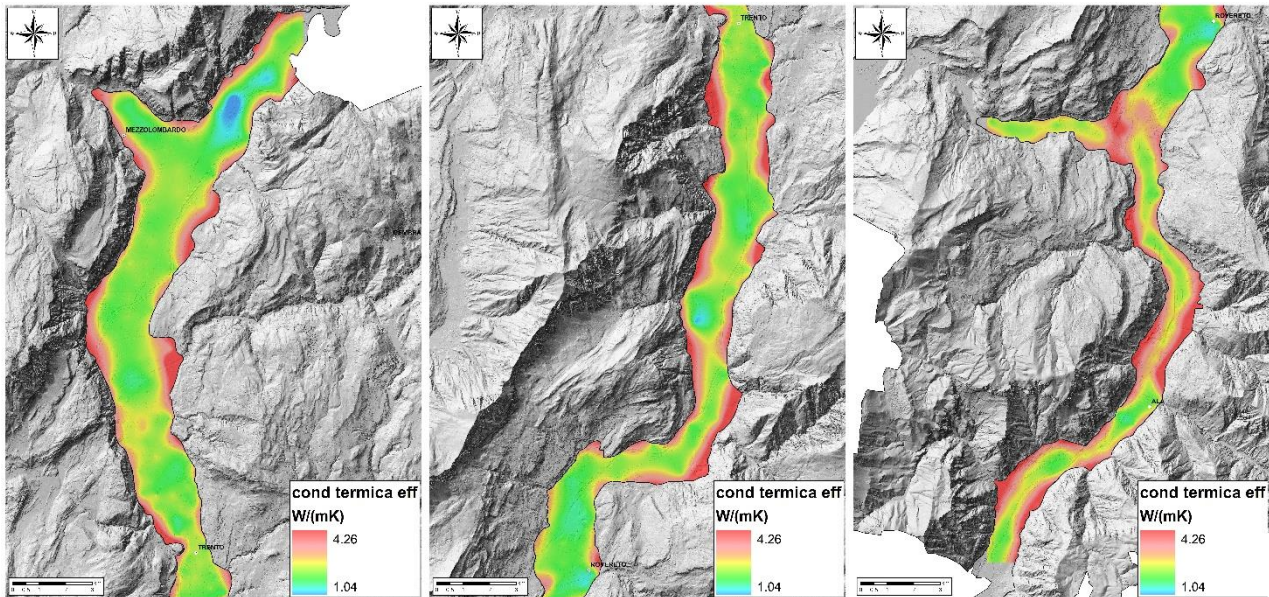


Figura 37: Mappa della conducibilità termica efficace nella Valle dell'Adige (da sinistra: nord, centro, sud)

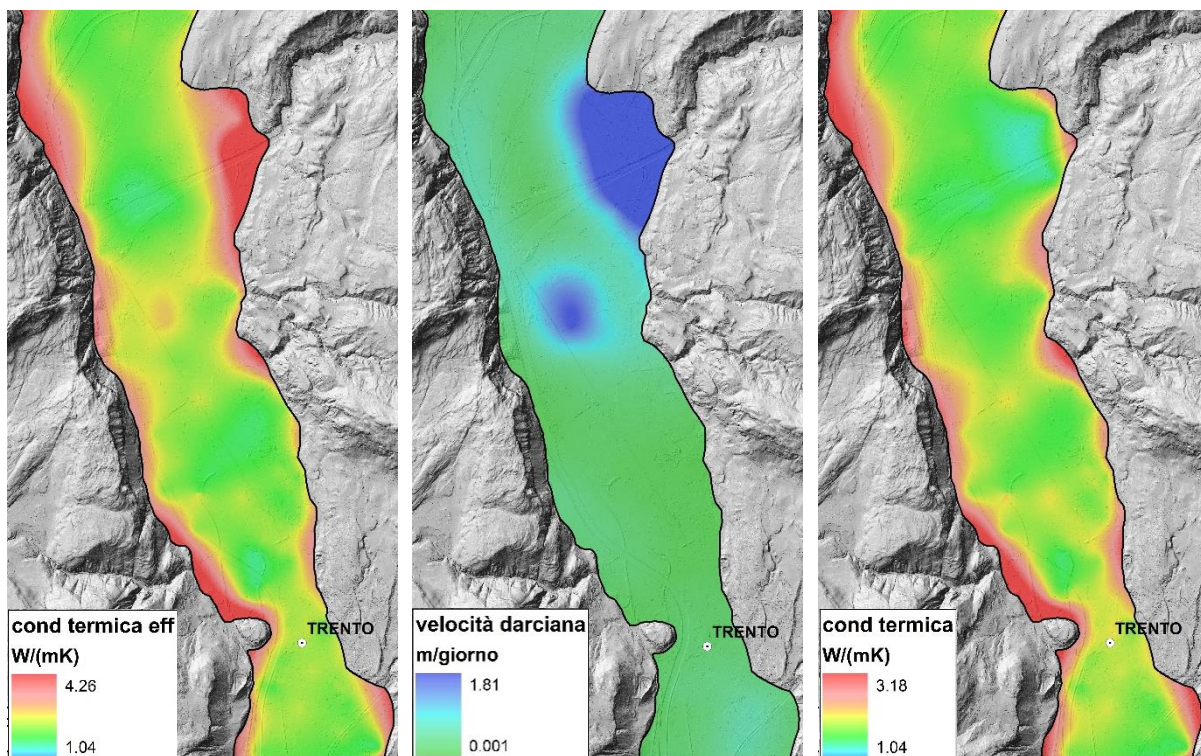


Figura 38: Raffronto tra conducibilità termica efficace, velocità darciana della falda acquifera (Ottobre 2008) e conducibilità termica nell'area tra Trento e Lavis

Oltre alla conducibilità termica anche la capacità termica volumetrica è stata analizzata e mappata. Partendo dal livello provinciale la **capacità termica volumetrica** (da valori bibliografici VDI 4640 [7]), mediata su 100 m di sottosuolo e assegnata alle litologie della CLT, presenta valori compresi tra 1,9 e 2,9 $\text{MJm}^{-3}\text{k}^{-1}$ (Figura 39).

Sono quindi stati assegnati valori di capacità termica volumetrica media (compresi tra $1,9$ e $2,2 \text{ MJm}^{-3}\text{k}^{-1}$, in cui rientrano depositi incoerenti parzialmente saturi o saturi, riolite, marmo, gneiss, anfibolite, rocce argillose e limose, marna, calcare, arenaria), medio-elevata (compresi tra $2,3$ e $2,6 \text{ MJm}^{-3}\text{k}^{-1}$ in cui rientrano basalto, dolomia, granito, micascisto), elevata (superiori a $2,7 \text{ MJm}^{-3}\text{k}^{-1}$ in cui rientrano diorite, gabbro).

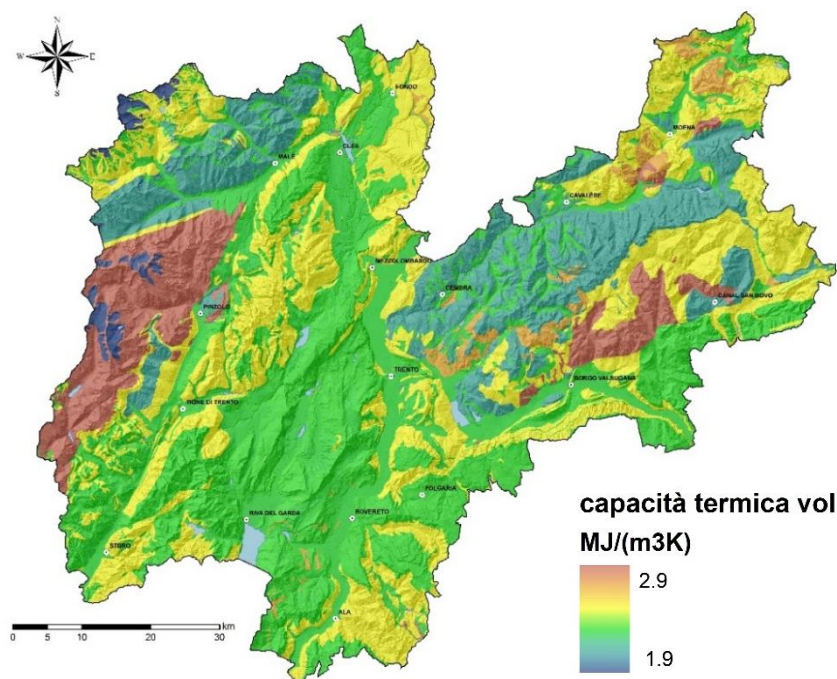


Figura 39: Mappa della capacità termica volumetrica in Provincia di Trento

Nella Valle dell'Adige l'analisi di dettaglio, elaborata mediante il database litostratigrafico delle perforazioni fornito dal Servizio Geologico della PAT, ha permesso di ottenere la mappa della capacità termica volumetrica (media tra valori bibliografici VDI 4640 [7] e valori di laboratorio [29]), mediata su 100 m di sottosuolo, tramite interpolazione geostatistica con metodo Ordinary Kriging. La mappa è visibile in Figura 40.

La capacità termica volumetrica nella Valle dell'Adige è compresa tra $2,07 \text{ MJm}^{-3}\text{k}^{-1}$ e $2,29 \text{ MJm}^{-3}\text{k}^{-1}$, essa risulta quindi in alcune aree leggermente minore e in altre leggermente maggiore rispetto a quella assegnata nelle due precedenti cartografie ($2,19 \text{ MJm}^{-3}\text{k}^{-1}$ nella cartografia per la Provincia di Trento, $2,12 \text{ MJm}^{-3}\text{k}^{-1}$ nella cartografia per il Comune di Trento).

La mappa della capacità termica volumetrica per la Valle dell'Adige, come avviene per la conducibilità termica, oltre che dalle caratteristiche granulometriche dei suoi depositi, risulta chiaramente influenzata da altri due fattori: la distanza dai versanti rocciosi e la profondità del livello di saturazione. Per quanto riguarda il primo aspetto questo si riflette in un aumento della capacità termica volumetrica avvicinandosi ai versanti rocciosi, intercettando, in profondità, uno spessore sempre maggiore di bedrock a capacità termica

volumetrica generalmente più elevata rispetto ai sedimenti sciolti. Per quanto riguarda invece il secondo aspetto questo determina bassi valori di capacità termica volumetrica laddove il livello di prima falda risulta più profondo (Figura 41).

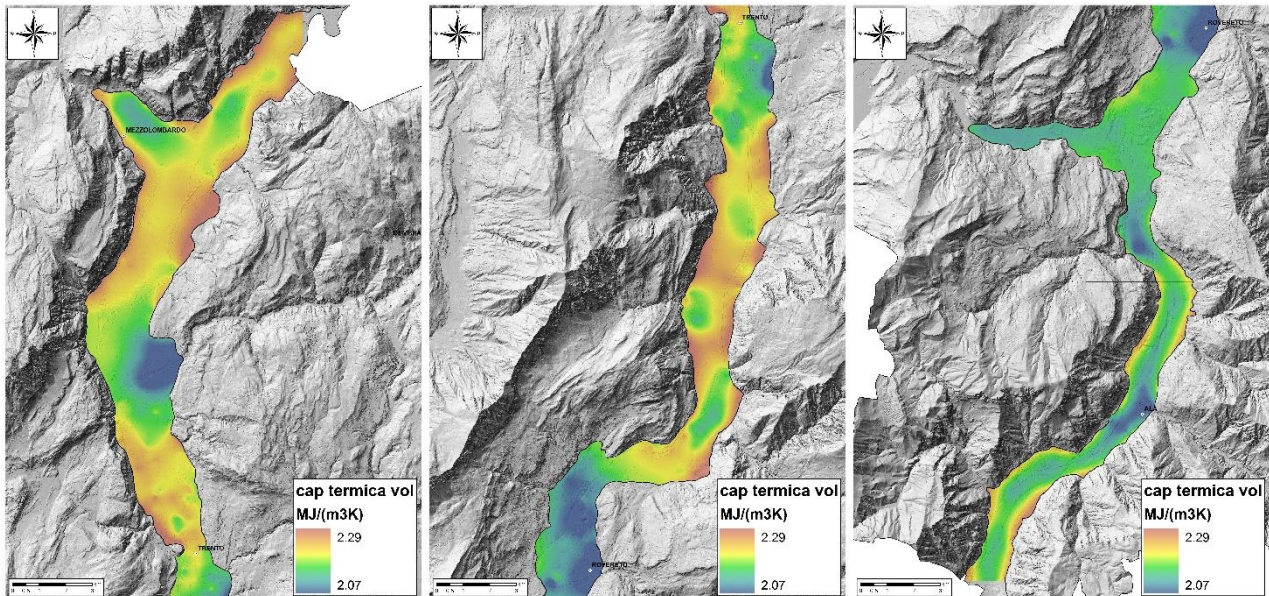


Figura 40: Mappa della capacità termica volumetrica nella Valle dell'Adige (da sinistra: nord, centro, sud)

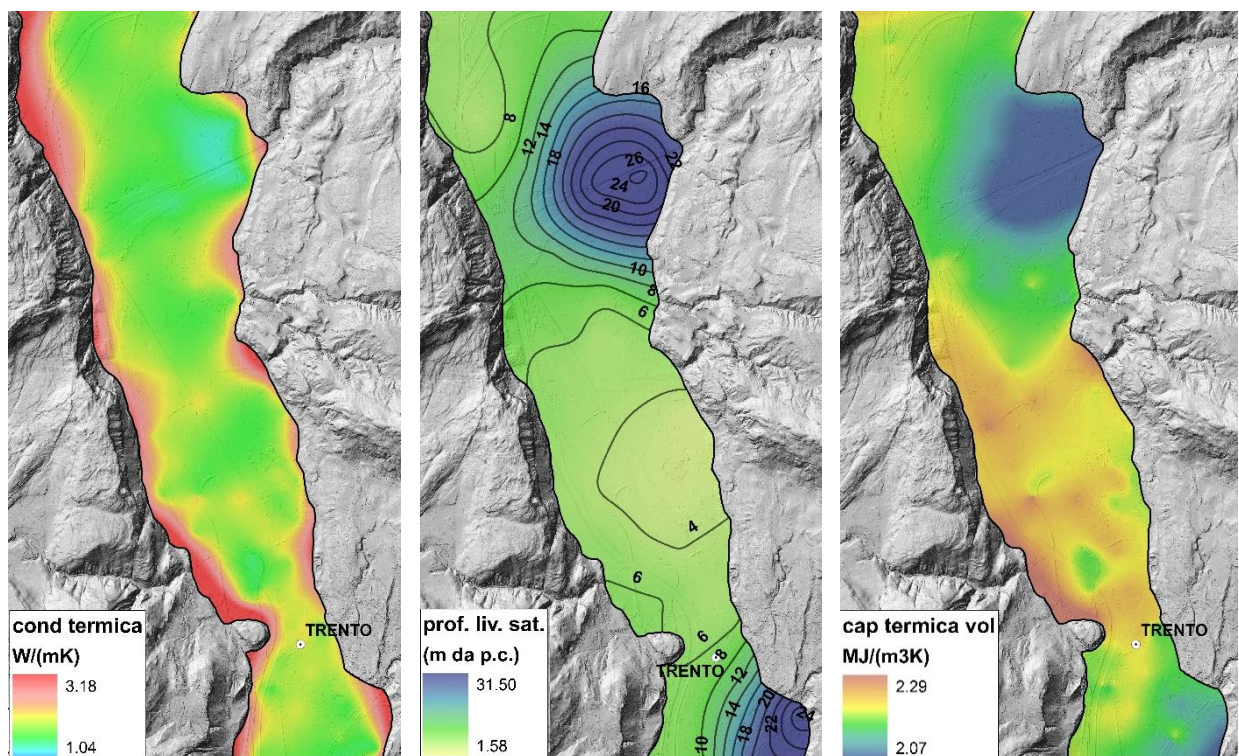


Figura 41: Raffronto tra conducibilità termica, profondità del livello di saturazione (Ottobre 2008) e capacità termica volumetrica nell'area tra Trento e Lavis

6.6 Flusso di calore e gradiente geotermico superficiale

Come già illustrato nel paragrafo 2.3, la temperatura del primo sottosuolo è fortemente correlata alla temperatura media annua dell'aria. L'assetto termico nei primi metri di profondità è condizionato dai livelli di irraggiamento e di assorbimento dell'energia solare. Più in profondità prevale invece il contributo del flusso di calore geotermico di origine endogena (Figura 2). Considerando la legge di Fourier sulla conduzione di calore è possibile stimare il **flusso di calore geotermico** una volta conosciuta la conducibilità termica e il gradiente di temperatura.

Generalmente, il flusso geotermico medio sulla superficie terrestre è pari a 63 mW/m² e in Italia varia da 30 a 100 mW/m², con punte fino a 450 mW/m² nella zona tirrenica. Le grandi differenze osservate in aree relativamente ristrette sono dovute a un'estrema variabilità geologica osservata da Regione a Regione [41]. Per il progetto GEOTERM la mappa di flusso geotermico provinciale è basata su dati di letteratura (Progetto Geothopica del CNR, <http://geothopica.igg.cnr.it> [42]). Esso risulta pari a 50 mW/m² per l'intero territorio provinciale, ciò a causa della scarsità di informazioni dedicate nel territorio di studio, che non consentono di valutare una differenziazione areale.

Assunto il flusso geotermico provinciale pari a 50 mW/m², il **gradiente geotermico di temperatura** ($\partial\theta/\partial z$) può essere determinato e mappato mediante la seguente formula:

$$\frac{\partial\theta}{\partial z} = - \frac{Q}{\lambda * A}$$

A scala provinciale i valori di gradiente geotermico variano tra 1,5 e 2,9 °C ogni 100 m.

Va quindi evidenziato che nei casi di prevalente o dominante necessità di riscaldamento, le situazioni che prevedono di intercettare favorevolmente un gradiente geotermico sono in relazione con bassi valori di conducibilità termica, che costituisce un elemento penalizzante nello scambio termico. Resta il fatto che in questi casi la possibilità di approfondimento delle sonde costituisce un elemento da valutare insieme all'incremento dei costi con la profondità di installazione, rappresentando un elemento di valutazione nella fase di progettazione.

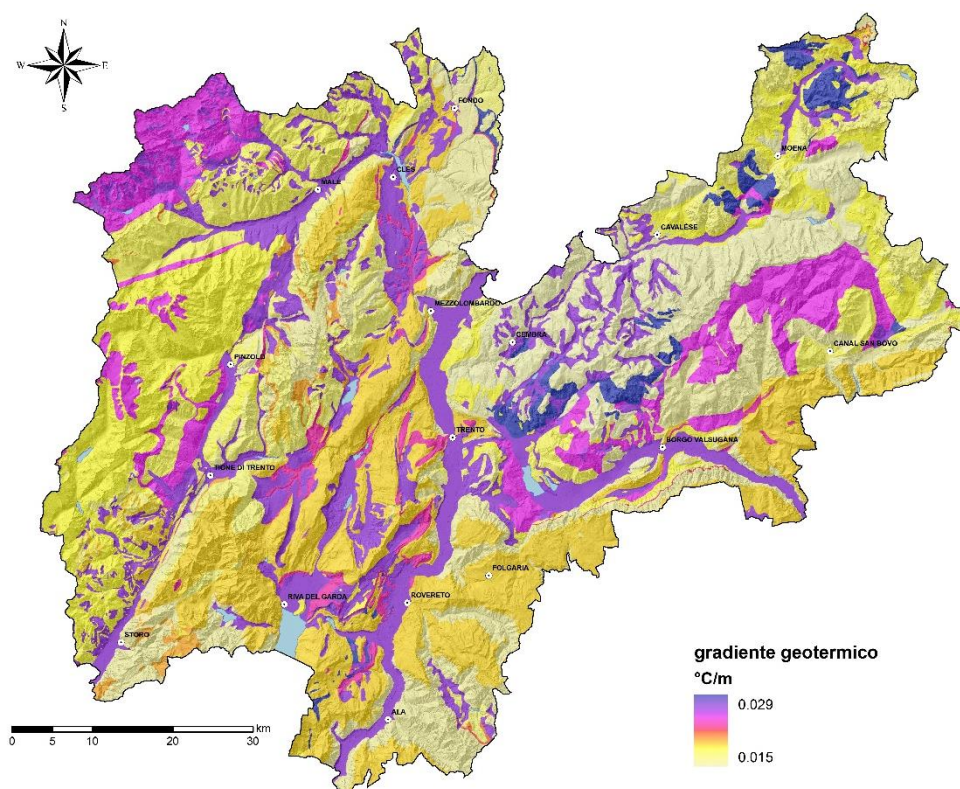


Figura 42: Mappa del gradiente geotermico in Provincia di Trento

6.7 Potenziale di geoscambio per impianti a sonde geotermiche verticali (SGV)

Il **potenziale di geoscambio del sottosuolo per la realizzazione di impianti a sonde geotermiche verticali (SGV)** è stato mappato a tre scale di analisi: Provincia di Trento, Comune di Trento, Valle dell'Adige.

Sono proposte due indicazioni del potenziale:

- 1) Resa specifica (W/m), considerando i valori tabellari delle linee guida VDI 4640 [7];
- 2) Lunghezza SGV (m) per la climatizzazione di un edificio residenziale standard, considerando sempre i valori tabellari delle linee guida VDI 4640 [7].

Il parametro di **Resa (W/m)** esprime la potenza (W) che può essere fornita da un'unità di lunghezza (m) di SGV con caratteristiche realizzative e di operatività standard⁴. Le linee guida VDI 4640 [7] forniscono dei valori tabellari di Resa in funzione della tipologia di sottosuolo e del numero di ore annue equivalenti di picco (Tabella 5).

⁴ Caratteristiche realizzative e di operatività standard: la lunghezza delle SGV è compresa tra 40 e 100 m, la distanza minima tra ciascuna SGV è 5 m, solo per estrazione di calore, configurazione a doppia U con diametro tra 20 e 32 mm o sonde coassiali con diametro maggiore di 60 mm

Tabella 5: Resa (W/m) di SGV con caratteristiche realizzative e di operatività standard (fonte: VDI 4640)

Tipologia di sottosuolo	Resa (W/m)	
	1800 h	2400 h
Valori generali		
Sottosuolo con proprietà termofisiche scadenti (sedimenti insaturi) ($\lambda < 1,5 \text{ W/(m}^{\circ}\text{K)}$)	25	20
Sottosuolo con proprietà termofisiche medie (sedimenti saturi) ($\lambda < 1,5\text{-}3,0 \text{ W/(m}^{\circ}\text{K)}$)	60	50
Sottosuolo con proprietà termofisiche elevate ($\lambda > 3,0 \text{ W/(m}^{\circ}\text{K)}$)	84	70
Valori individuali		
Ghiaia e sabbia insaturo	< 25	< 20
Ghiaia e sabbia saturo	65 - 80	55 - 65
Per velocità di falda acquifera elevata in ghiaia e sabbia	80 - 100	80 - 100
Argilla e terreno organico umido	35 - 50	30 - 40
Calcare	55 - 70	45 - 60
Arenaria	65 - 80	55 - 65
Roccia magmatica acida (es: granito)	65 - 85	55 - 70
Roccia magmatica basica (es: basalto)	40 - 65	35 - 55
Gneiss	70 - 85	60 - 70

I valori della Tabella 5 sono stati riportati in un grafico (Figura 43), individuando un algoritmo in grado di correlare la Resa (W/m) secondo le linee guida VDI 4640 (R_{VDI}), con la conducibilità termica (λ) e con le ore annue equivalenti di picco (H_{eq}).

$$R_{VDI} = (3.34 * \lambda^2 + 4.54 * \lambda + 21.63) * \left(1 + (2400 - H_{eq}) * \left(\frac{0.2}{2400 - 1800} \right) \right)$$

dove:

R_{VDI} = Resa di SGV con caratteristiche realizzative e di operatività standard secondo le linee guida VDI 4640 (W/m);

λ = conducibilità termica in W/(mK) (mappata in Figura 34);

H_{eq} = ore annue equivalenti di picco (h).

La Resa dipende quindi sia dalle caratteristiche termofisiche del sottosuolo (aumenta all'aumentare della conducibilità termica) che dalle caratteristiche climatiche (diminuisce all'aumentare delle ore annue equivalenti di picco, quindi diminuisce tanto più il clima è freddo).

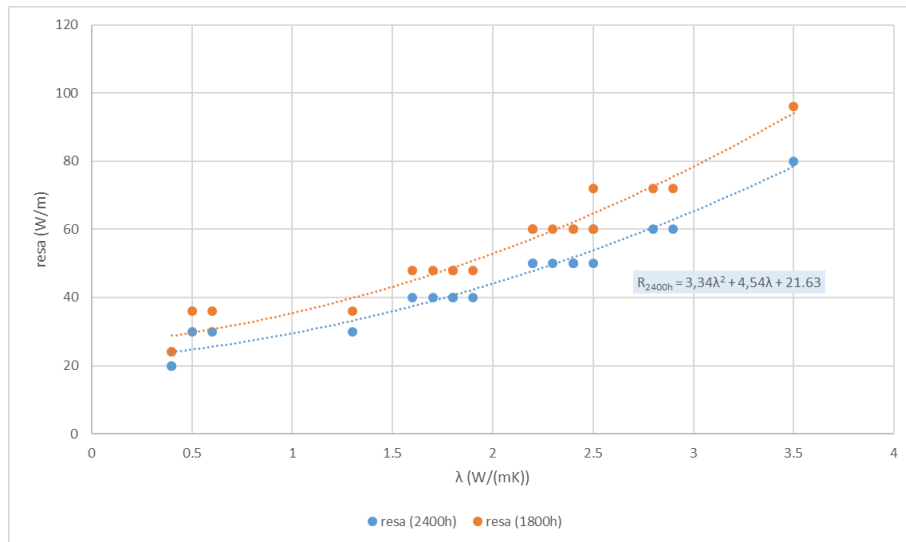


Figura 43: Resa (W/m) di SGV con caratteristiche realizzative e di operatività standard (fonte: VDI 4640)

Rosen et al. (2001) [43] hanno dimostrato che una pompa di calore geotermica (Ground Source Heat Pump, GSHP), con una potenza nominale di circa il 60% della domanda di picco di calore calcolata per una casa svedese, può fornire più del 90%⁵ dell'energia termica richiesta nel corso del periodo di riscaldamento, supponendo che la richiesta di calore della casa sia direttamente correlata alla temperatura esterna. Il tempo di funzionamento (ovvero le ore di carico equivalenti) di una GSHP dipende dall'Effetto di Copertura e dalla durata del periodo di riscaldamento (e quindi dal clima). In Svezia, le ore di carico equivalenti annue sono comprese tra 3200 e 4000, scendono a circa 2200 in Svizzera e a circa 1800 in Europa Centrale [43].

Per mappare le **ore annue equivalenti di picco** in Provincia di Trento (Figura 44), con un approccio leggermente conservativo, è stata quindi considerata la seguente equazione:

$$H_{eq} = \frac{Q_{sh}}{(\Phi_{TOT} * 0,6)}$$

dove:

H_{eq} = ore annue equivalenti di picco (h);

Q_{sh} = fabbisogno energetico annuo di riscaldamento (Wh), per edificio residenziale standard (Figura 23);

Φ_{TOT} = potenza termica di riscaldamento (W), per edificio residenziale standard (Figura 23).

In Provincia di Trento le ore annue equivalenti di picco presentano un range compreso tra 1816 e 3282.

⁵ Questo valore è definito Effetto di Copertura

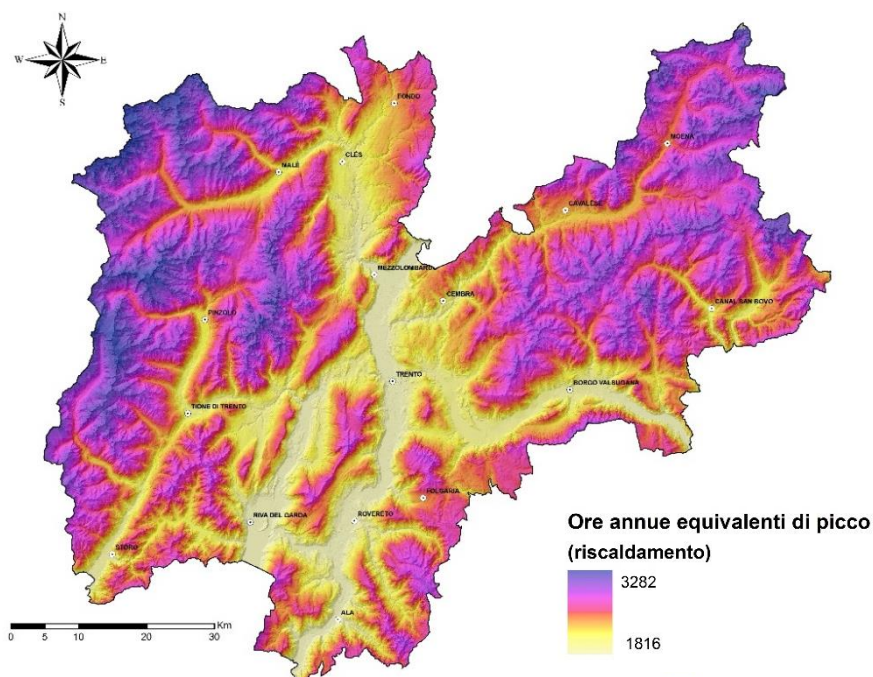


Figura 44: Mappa delle ore annue equivalenti di picco in Provincia di Trento

A livello provinciale la Resa (W/m) secondo le linee guida VDI 4640, mediata su 100 m di sottosuolo (con caratteristiche del sottosuolo assegnate mediante valori bibliografici VDI 4640 alle litologie della CLT), presenta valori compresi tra 31 e 85 W/m (Figura 45). Sono quindi compresi valori di Resa da medio-bassa (inferiori a 50 W/m , nelle zone altimetricamente più elevate, quindi a clima più freddo, e presso le aree con valori di conducibilità termica più bassa) ad elevata (superiori a 70 W/m nelle zone altimetricamente più basse, quindi a clima più caldo, e presso le aree con valori di conducibilità termica più elevata).

Nella Valle dell'Adige l'analisi di dettaglio è elaborata facendo uso del database litostratigrafico delle perforazioni, dei valori bibliografici VDI 4640 e delle analisi di laboratorio. Anche in questo caso la mappa della Resa rappresenta un valore medio nei primi 100 m di sottosuolo. Sono proposte due analisi, sia non considerando che considerando la componente di trasporto di calore per convezione (legata al moto della falda acquifera). Si è quindi rispettivamente fatto riferimento alla conducibilità termica e alla conducibilità termica efficace.

Le mappe sono visibili in Figura 46 e in Figura 47. I valori di Resa sono compresi nel primo caso tra 35 e 81 W/m , nel secondo caso tra 35 e 117 W/m . In questa cartografia di dettaglio la Resa è quindi puntualmente caratterizzata mediante l'utilizzo di informazioni litostratigrafiche, considerando la morfologia del bedrock roccioso, includendo le caratteristiche di velocità della falda acquifera (trasporto di calore per convezione).

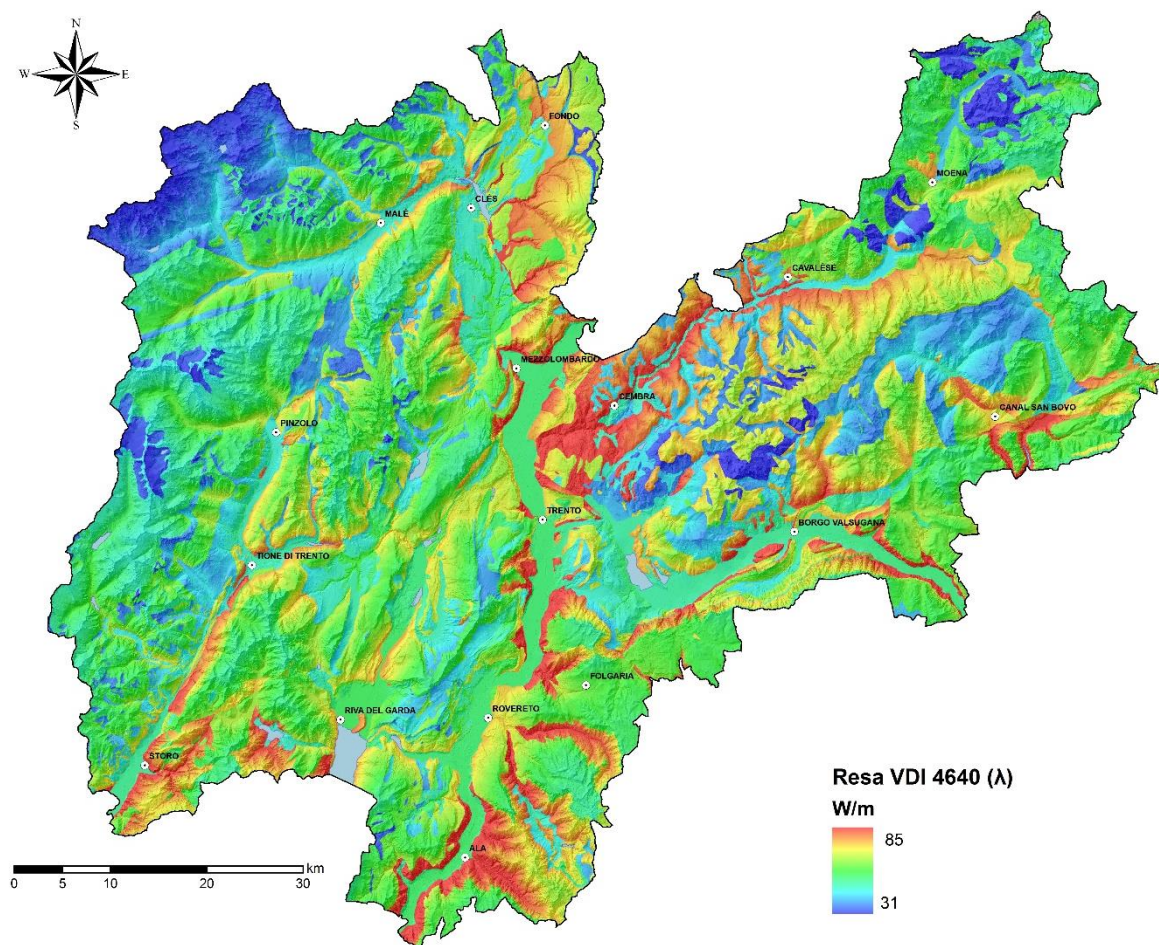


Figura 45: Mappa della Resa (W/m) di SGV con caratteristiche realizzative e di operatività standard secondo le linee guida VDI 4640 in Provincia di Trento

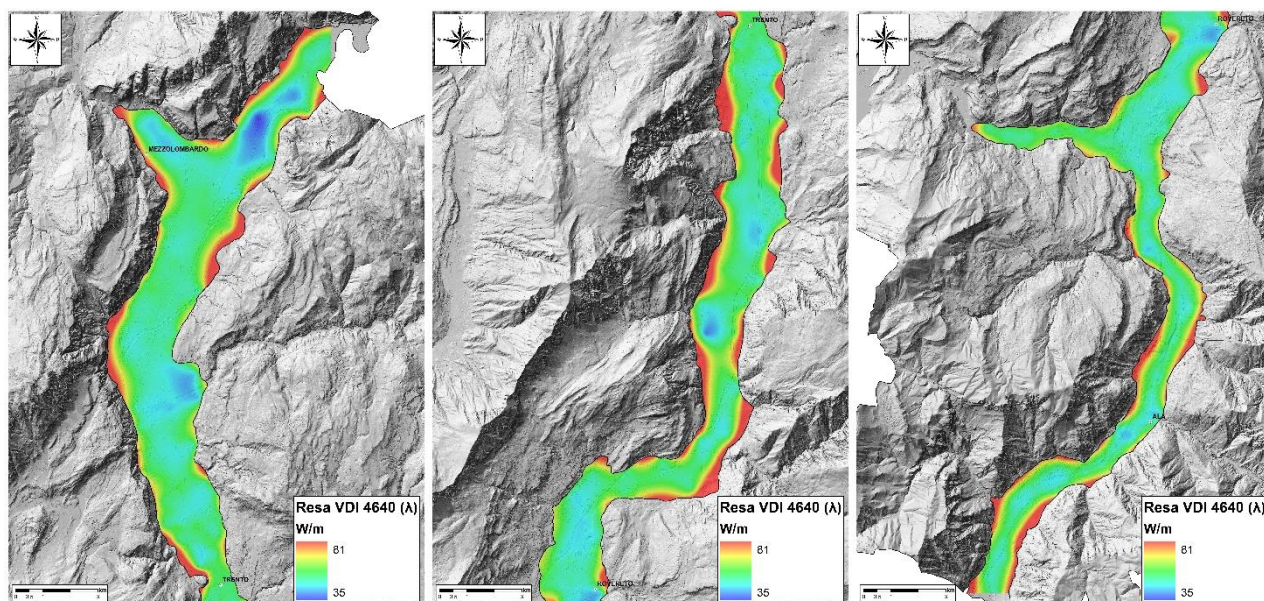


Figura 46: Mappa della Resa (W/m) di SGV con caratteristiche realizzative e di operatività standard secondo le linee guida VDI 4640, considerando λ , nella Valle dell'Adige (da sinistra: nord, centro, sud)

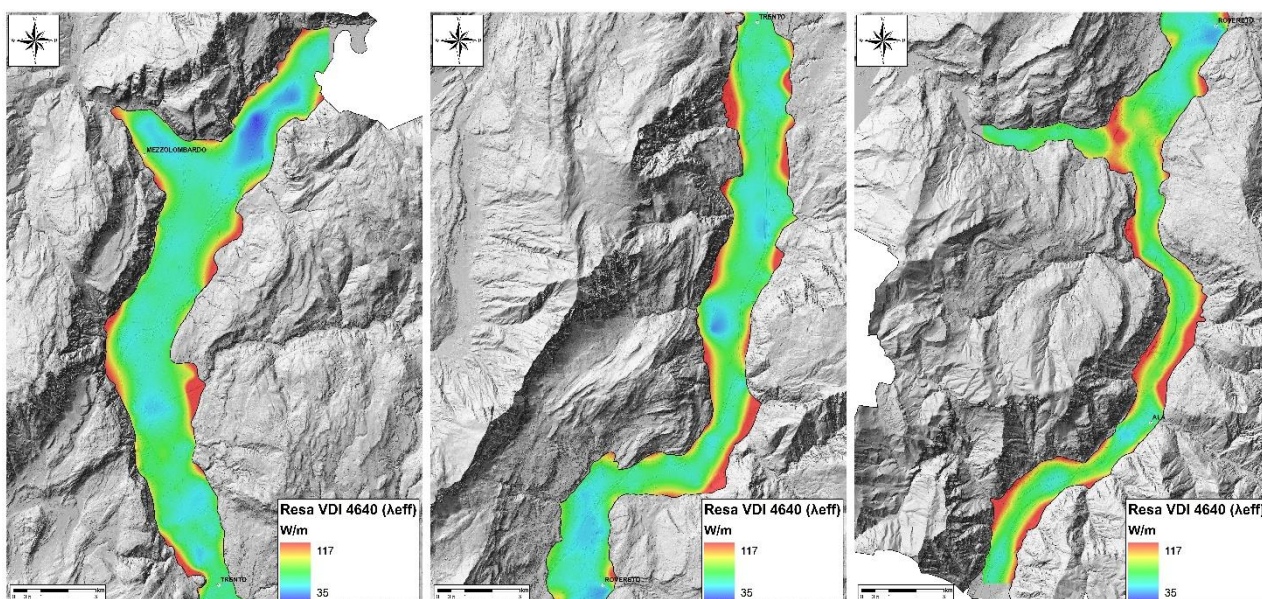


Figura 47: Mappa della Resa (W/m) di SGV con caratteristiche realizzative e di operatività standard secondo le linee guida VDI 4640, considerando λ_{eff} , nella Valle dell'Adige (da sinistra: nord, centro, sud)

La mappa della Resa nella Valle dell'Adige, oltre che dalle caratteristiche granulometriche dei suoi depositi, è chiaramente influenzata da altri tre fattori: la distanza dai versanti rocciosi, la profondità del livello di saturazione, la velocità della falda acquifera.

Per quanto riguarda il primo aspetto questo si riflette in un aumento della Resa in prossimità dei versanti rocciosi; la Resa aumenta perché viene intercettato, lungo la verticale d'indagine fino a 100 m di profondità, uno spessore sempre maggiore di bedrock generalmente a conducibilità termica più elevata di quella dei depositi sciolti. Passando al secondo, bassi valori di Resa si ritrovano laddove il livello di saturazione è più profondo. Infine, il terzo è il fattore più rilevante e fa sì che in assoluto i valori più elevati siano raggiunti in corrispondenza delle aree a maggior velocità della falda acquifera, presso i conoidi alluvionali (tra cui in rilievo soprattutto quello di Lavis a nord di Trento), nell'area a sud di Rovereto in cui la Valle di Loppio confluisce nella Valle dell'Adige e in corrispondenza delle zone di prelievo mediante pozzi acquedottistici. In queste aree trascurare la componente di trasporto di calore per convezione comporta una notevole sottovalutazione del reale potenziale di geoscambio, in impianti a sonde geotermiche verticali un sovradimensionamento nella lunghezza delle sonde stesse (con incremento dei costi d'investimento).

Assumendo il riscaldamento di un edificio standard mediante una pompa di calore geotermica con COP pari a 4, la potenza termica di riscaldamento Φ_{TOT} (W) necessaria lato edificio (mappata in Figura 23) viene soddisfatta per $\frac{3}{4}$ dalla potenza termica assorbita dalle SGV e per $\frac{1}{4}$ dalla potenza elettrica assorbita dal

compressore. Quindi, applicando la Resa VDI 4640, la **lunghezza delle SGV (m)** necessaria alla climatizzazione di riscaldamento di un edificio standard dotato di pompa di calore geotermica con COP 4 è pari a:

$$L_{VDI} = \frac{\left(\frac{3}{4} * \Phi_{TOT}\right)}{R_{VDI}}$$

dove:

L_{VDI} = lunghezza delle SGV (m) con caratteristiche realizzative e di operatività standard, considerando le linee guida VDI 4640, necessaria alla climatizzazione di riscaldamento di un edificio standard dotato di pompa di calore geotermica con COP 4;

Φ_{TOT} = potenza termica di riscaldamento (W) (mappata in Figura 23);

R_{VDI} = Resa di SGV con caratteristiche realizzative e di operatività standard secondo le linee guida VDI 4640 (W/m) (mappata in Figura 45).

A livello provinciale la lunghezza delle SGV (m), secondo le assunzioni considerate, presenta valori compresi tra 33 e 154 m Figura 48.

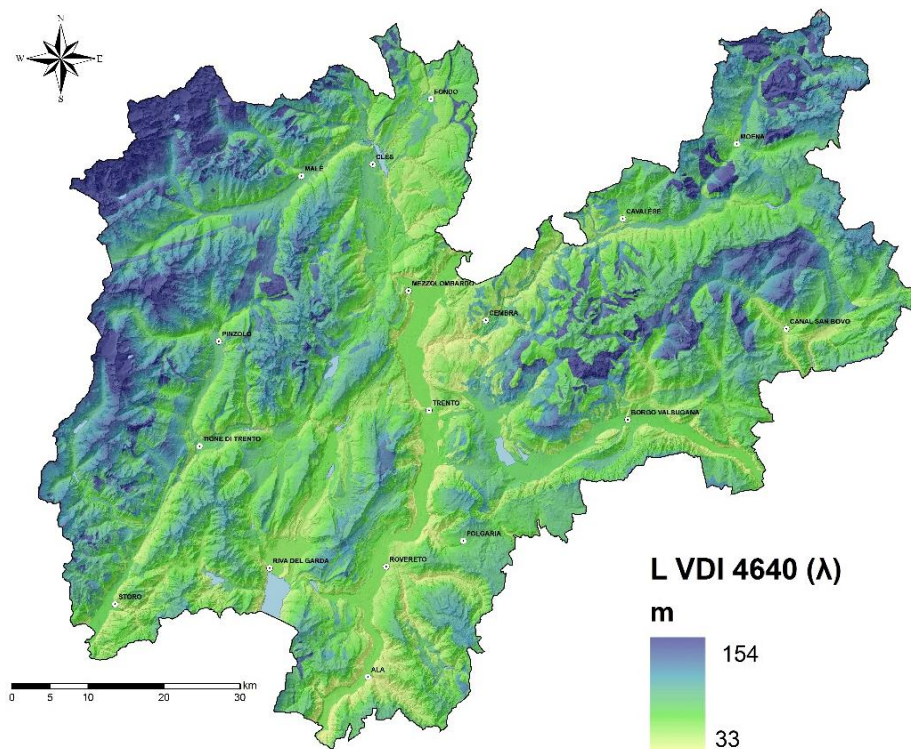


Figura 48: Mappa della lunghezza (m) di SGV con caratteristiche realizzative e di operatività standard, considerando le linee guida VDI 4640, necessaria alla climatizzazione di riscaldamento di un edificio standard dotato di pompa di calore geotermica con COP 4, in Provincia di Trento

Le lunghezze maggiori delle sonde geotermiche verticali sono necessarie nelle zone altimetricamente più elevate, quindi a clima più freddo, e presso le aree con valori di conducibilità termica più bassa. Al contrario, lunghezze ridotte sono sufficienti nelle zone altimetricamente più basse, quindi a clima più caldo, e presso le aree con valori di conducibilità termica più elevata.

6.8 Potenziale di geoscambio per impianti a circuito aperto

La tipologia di sistemi di geoscambio a circuito chiuso appena descritta può tecnicamente essere realizzata praticamente ovunque, con diverse capacità di resa energetica e di condizioni economico-finanziarie. Tuttavia a volte è anche possibile (e talvolta conveniente in termini di efficienza e di costi) optare per una diversa tipologia di sistemi di scambio termico per la climatizzazione, cosiddetta “a circuito aperto” poiché prevede la movimentazione di acque, nel caso specifico sotterranee.

Per completare il quadro conoscitivo del potenziale di geoscambio per la climatizzazione si è quindi proceduto alla redazione di un prodotto cartografico dedicato alla valutazione del **potenziale per l'impiego di sistemi geotermici di bassa entalpia con utilizzo di acque sotterranee**. Tale prodotto cartografico si riferisce alla possibilità di reperire una falda acquifera sotterranea utilizzabile a profondità e portate compatibili ed economicamente convenienti [22].

Si è così potuta suddividere l'intera area di studio in settori caratterizzati da diverse **probabilità di rinvenimento di condizioni idrogeologiche favorevoli** (Figura 49), basandosi sulla differenziazione in diversi livelli di permeabilità e sul tipo di permeabilità raggruppato in macro famiglie.

A livello provinciale il potenziale di geoscambio per impianti a circuito aperto, assegnato alle litologie della CLT, individua i seguenti quattro gradi:

- *Elevato*: depositi detritici, alluvionali e glaciali indistinti; conducibilità idraulica per porosità, variabile in relazione alla granulometria dei depositi sciolti.
- *Discreto*: unità rocciose permeabili per elevato carsismo e fratturazione. Tra queste unità troviamo la terza unità carbonatica competente (Calcari Grigi, Calcare del Misone, Corna, ecc.), costituiscono il cosiddetto “complesso acquifero principale”.
- *Basso*: unità rocciose caratterizzate da permeabilità per fratturazione da media a bassa con litologie comprendenti conglomerati, calcari, marne, dolomie, arenarie, ignimbriti.
- *Non idoneo*: unità rocciose a permeabilità molto bassa e acquiclude tra cui micascisti, basalti, argilliti, rocce magmatiche intrusive (granito, tonalite, sienite, diorite, gabbro) e rocce metamorfiche quali gneiss, marmo, anfibolite.

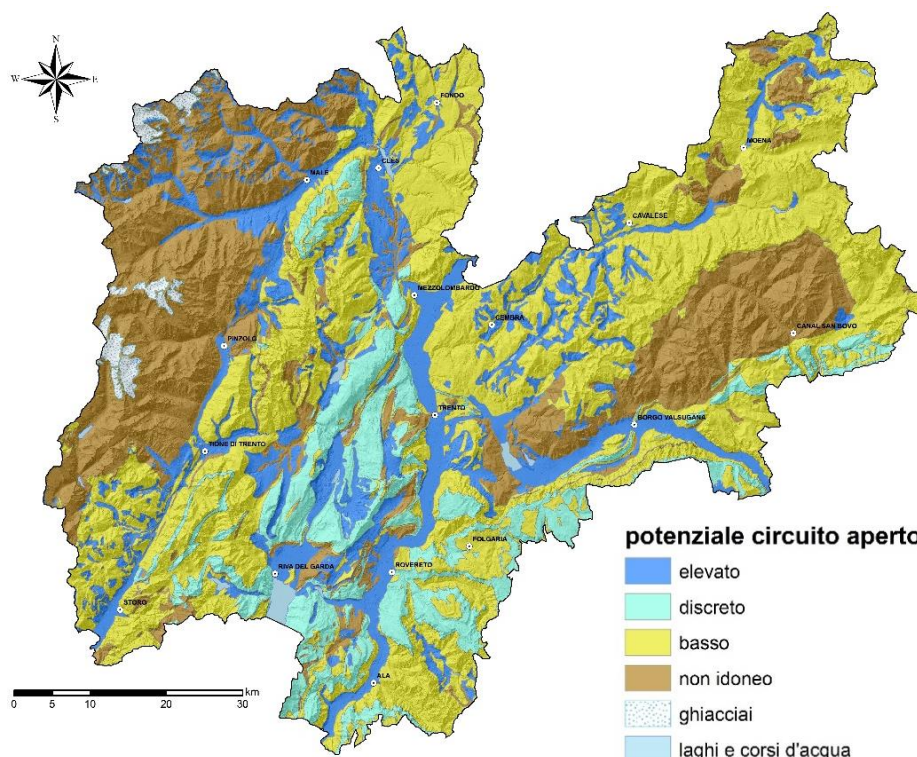


Figura 49: Mappa del potenziale di geoscambio per impianti a circuito aperto in Provincia di Trento

Ulteriori informazioni progettuali possono essere raccolte anche dalle mappe della conducibilità idraulica, della profondità della falda acquifera, della temperatura del sottosuolo e della temperatura della falda acquifera, realizzate nel corso del progetto GEOTERM e descritte nei precedenti paragrafi.

6.9 Potenziale per l'accumulo di calore solare nel sottosuolo

Scopo del presente paragrafo è effettuare un'analisi di fattibilità a scala provinciale in previsione della realizzazione di **impianti di accumulo di calore solare nel sottosuolo**. Si tratta di una tipologia di impianti ancora in fase sperimentale, con alcune esperienze di interesse a livello internazionale (vedi paragrafo 3.4).

Lo storage ipotizzato prevede l'iniezione nel sottosuolo di energia termica da pannelli solari nella stagione estiva, in cui l'insolazione è elevata e la produzione energetica in eccesso rispetto alla domanda, ed estrazione del calore accumulato durante il successivo inverno, a clima più freddo e con minor insolazione. Lo stoccaggio termico ha la proprietà di traslare nel tempo l'offerta di tale energia, per definizione discontinua.

L'analisi prevede come risultato finale la redazione di una cartografia tematica atta a definire il potenziale all'accumulo termico del territorio provinciale [11]. I tematismi principali riguardano:

- i parametri termofisici che descrivono le **proprietà di scambio termico e di accumulo termico del sottosuolo (λ e S_{VC})**;
- la **radiazione solare**, atta ad individuare le aree maggiormente vocate alla produzione di calore da fonte solare.

Si tratta quindi di identificare non solo la litologia più idonea ad un sistema di accumulo termico in Provincia di Trento ma anche di individuare a scala provinciale le aree più favorevoli all'utilizzo della fonte solare. Considerata la variabilità geologica e morfologica del territorio trentino, sia i parametri termofisici che la fonte solare presentano un'elevata variabilità spaziale. La definizione del potenziale per l'accumulo stagionale di calore solare nel sottosuolo ha voluto assumere un carattere qualitativo e relativo, pur basandosi su dati quantitativi, e si limita a differenziare il territorio in aree a diversa idoneità all'impiego di tali soluzioni, evidenziandone i settori a maggiore vocazione [11].

I parametri da valutare per la realizzazione della carta del potenziale di accumulo termico sono la conducibilità termica (λ), la capacità termica volumetrica (S_{VC}) e la radiazione solare globale annua (H_g). Poiché i valori di tali grandezze non sono confrontabili tra di loro è necessario normalizzarli rispetto al range di variazione relativo a ciascun parametro. Una volta effettuata la normalizzazione, i valori dei tre parametri considerati intervengono nell'algoritmo per la definizione del potenziale di accumulo termico:

$$P_{UTES} = (\lambda + S_{VC}) * H_g$$

dove:

P_{UTES} = potenziale di accumulo termico;

λ = conducibilità termica (mappata in Figura 34);

S_{VC} = capacità termica volumetrica (mappata in Figura 39);

H_g = radiazione solare globale annua (mappata in Figura 21)

Il primo termine del prodotto ($\lambda + S_{VC}$) (Figura 50) rappresenta la “componente serbatoio” mentre il secondo termine (H_g) (Figura 50) rappresenta la “componente sorgente”. Essendo il potenziale di accumulo termico definito dal loro prodotto, ne deriva che il potenziale si annulla all'annullarsi di uno dei due: ciò permette di rappresentare graficamente il semplice concetto che se mancano sorgente o serbatoio il sistema di accumulo non è realizzabile.

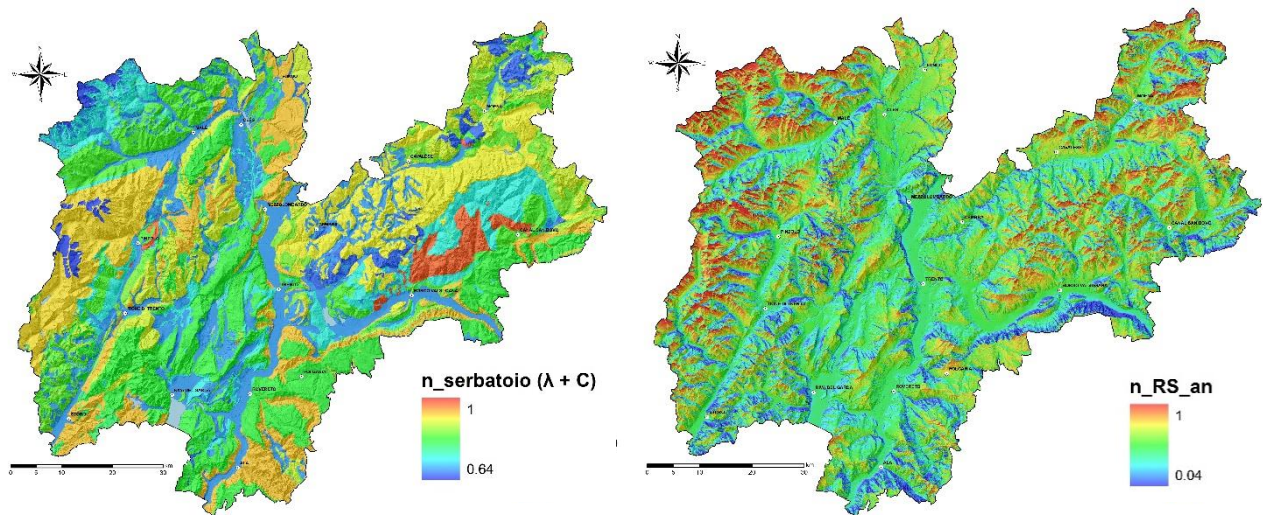


Figura 50: Mappa normalizzata del potenziale della componente serbatoio (sx) e della componente sorgete (dx) per accumulo del calore solare nel sottosuolo in Provincia di Trento

Si è scelto di normalizzare anche i valori del potenziale rispetto al suo valore massimo per ottenere una carta di facile interpretazione (Figura 51) in cui si indicano con il colore blu le aree a bassa capacità di accumulo termico, con il colore azzurro-verde media capacità di accumulo termico, giallo buona capacità di accumulo termico, rossa ottima capacità di accumulo termico.

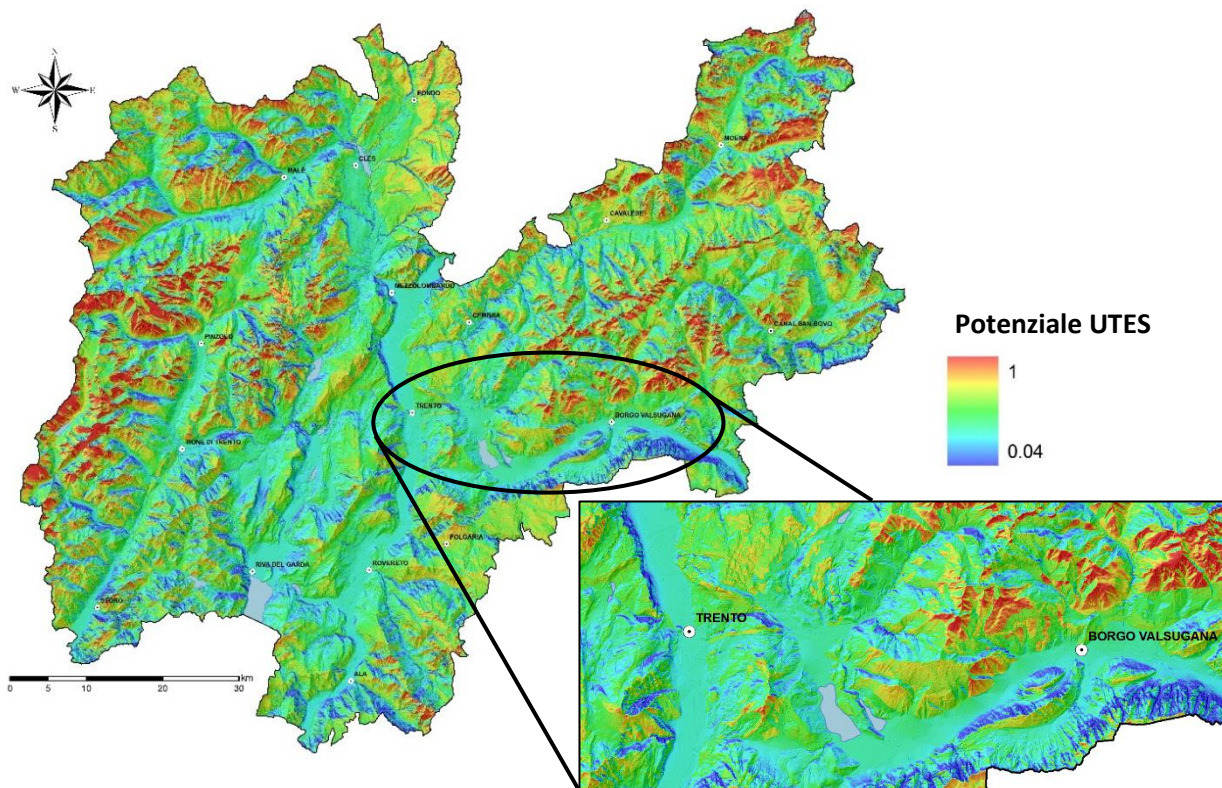


Figura 51: Mappa del potenziale per accumulo del calore solare nel sottosuolo in Provincia di Trento

7 Appendici

7.1 Analisi delle proprietà termofisiche delle principali unità litostratigrafiche del Comune di Trento

L'analisi delle proprietà termofisiche caratterizzanti il trasporto (λ) e l'accumulo del calore (SVC), nel sottosuolo del Comune di Trento, è stata approfondita mediante il campionamento e l'analisi delle principali formazioni rocciose e sedimenti sciolti. Il lavoro, frutto della collaborazione tra la Fondazione Bruno Kessler ed il Dipartimento di Geoscienze dell'Università di Padova, si è svolto tra Ottobre 2013 e Aprile 2014 ed è stato oggetto della tesi di laurea magistrale in Ingegneria Ambientale del dott. Ruggeri Martino [29]. Al lavoro sul campo, mediante campionamento delle litologie di interesse, è seguita l'analisi di laboratorio, presso il Dipartimento di Geoscienze dell'Università di Padova, e lo studio e discussione dei risultati ottenuti. Oltre alle proprietà termofisiche, λ e S_{VC} , di diretto interesse per la cartografia del progetto GEOTHERM, sono stati misurati anche altri parametri: densità, porosità e diffusività termica.

7.1.1 Il campionamento

Scelta dei campioni

Nell'area di studio del Comune di Trento è stato deciso di campionare le rocce con una superficie affiorante (da cartografia CARG [28]) superiore ad 1 km². Sono poi state aggiunte altre litologie significative in modo da rendere più completo lo studio, comprendente in gran parte rocce sedimentarie, alcune rocce magmatiche e una sola roccia metamorfica. Le litologie scelte (Tabella 6), non solo rappresentano quelle a maggior superficie areale di affioramento, ma anche quelle dotate di maggior spessore stratigrafico, quindi le più interessanti nel contesto realizzativo degli impianti di geoscambio. Oltre alle unità rocciose sono stati campionati anche i principali depositi sedimentari sciolti, sia di versante che di fondovalle (Tabella 7). L'identificazione degli affioramenti di interesse è stata ottenuta consultando la cartografia CARG [28].

Raccolta dei campioni in sito

La dimensione dei campioni richiesti è di almeno 10x10x10 cm, in modo da avere sufficiente materiale per i test di laboratorio ma comunque non troppo per poter utilizzare agevolmente la macchina di taglio. Per i sedimenti sciolti è invece richiesto un volume minimo di 0,5 dm³ per le analisi termiche. Per ogni campione è stata realizzata una scheda dedicata, con informazioni quali le coordinate GPS di rinvenimento, descrizione litologica e strutturale dell'affioramento, descrizione mineralogica, tessitura e strutturale del campione.

Ogni scheda è inoltre stata corredata di una fotografia con un riferimento di scala sia del campione che dell'affioramento di origine (Figura 52). Complessivamente sono stati raccolti 34 campioni rocciosi di 19 differenti formazioni geologiche e 9 campioni di 8 diversi sedimenti sciolti. Dopo un breve controllo, eliminando i duplicati e i campionamenti non corretti, 21 campioni rocciosi di 17 differenti formazioni geologiche e 8 tipologie di sedimenti sciolti sono stati scelti per la fase di test in laboratorio.



Figura 52: Rosso Ammonitico Veronese: foto dell'affioramento, foto del campione, localizzazione GPS

Tabella 6: Unità rocciose campionate

Codice	Formazione	Litologia	Età	Spessore (m)	Area (km ²)
DPR	Dolomia Principale	Dolomia	Triassico medio – inf	> 800	10,03
RTZ	Gruppo dei Calcarei Grigi – Formazione di Rotzo	Calcare	Giurassico – Cretacico	150	8,79
SAA	Scaglia Rossa	Calcare	Giurassico – Cretacico	70	8,5
CHI	Formazione di Chiusole	Calcare	Eocene inf – Oligocene inf	80 – 90	5,83
FMZ	Gruppo dei Calcarei Grigi – Formazione di Monte Zugna	Calcare	Giurassico – Cretacico	130 – 300	5,57
ARV	Rosso Ammonitico Veronese	Calcare	Giurassico – Cretacico	25 – 50	4,53
ORA	Gruppo Vulcanico Atesino – Formazione di Ora	Riolite	Permiano inf	200 – 800	3,74
WER ₁₋₂	Formazione di Werfen – Membri di Tesero e Mazzin	Calcare marnoso, dolomia	Triassico inf	0 – 15 (Mazzin); 40 (Tesero)	2,44
GIV ₃	Formazione di Giovo – Membro del Monte Ozol	Dolomia	Triassico medio – inf	180 – 200	2,13
CTR	Formazione del Contrin	Dolomia	Triassico medio – inf	10 – 150	1,33
NAG	Calcare di Nago	Calcare	Eocene inf – Oligocene inf	100	1,03
SCI	Formazione dello Sciliar	Dolomia	Triassico medio – inf	50 – 350	1,02
MCE	Calcare di Malcesine	Calcare	Eocene inf – Oligocene inf	70	0,67
f _a	Filoni a quarzo e calcite	Roccia vulcanoclastica	Permiano inf	-	-
VFS	Unità della Valsugana – Filladi e Filladi quarzifere	Fillade	Pre - Permiano	-	0,36
LUB	Gruppo Vulcanico Atesino – Formazione di Buss	Andesite	Permiano inf	0 – 60	0,26
ICT	Gruppo Vulcanico Atesino – Formazione del Castelliere	Riodacite	Permiano inf	50 – 100	0,08

Tabella 7: Sedimenti sciolti campionati

Codice	Codice del Campione	Formazione	Descrizione	Area (km ²)
1120	10B	Depositi glaciali	Sabbia e limo debolmente argillosi, alcuni ciottoli	21,41
1060	20B	Depositi alluvionali e fluvioglaciali	Sabbia media e fine	18,04
1030	27A	Depositi di frana	Sabbia grossolana debolmente limosa	13,27
1010	6D	Depositi di versante	Ghiaia e sabbia	10,05
1061	25A	Conoidi alluvionali e fluvioglaciali	Sabbia fine	8,92
1101	21A	Conoidi misti: debris flow e alluvionali	Sabbia grossolana	4,54
1100	31A	Depositi misti: debris flow e alluvionali	Ghiaia, sabbia, argilla e scarso limo	2,75
1050	13A	Depositi colluviali	Argilla e limo, scarsa sabbia e scarsa ghiaia	1,75

7.1.2 Taglio dei campioni

La prima attività di laboratorio è consistita nel taglio dei campioni di roccia mediante sega diamantata raffreddata ad acqua Struers Unitom-2 per i tagli di grandi dimensioni e Struers Labotom-3 per i lavori di precisione (Figura 53).

I campioni sono stati tagliati in: (1) Tre cubi di dimensioni approssimative 3x3x3 cm, per le misure di densità e porosità; (2) Due fette di 4x2x0,5 cm, una parallela e una perpendicolare alla stratificazione/foliazione, per le sezioni sottili; (3) Un campione con un taglio parallelo e un taglio normale alla stratificazione/foliazione, per le analisi termiche.



Figura 53: Da sinistra: Struers Unitom-2 per grandi tagli; Struers Labotom-3 per piccoli tagli; campioni tagliati

7.1.3 Sezioni sottili

Le proprietà termofisiche di alcune rocce possono essere fortemente anisotrope. Lo studio delle anisotropie nella struttura mineralogica, e di come queste si riflettono nelle proprietà termofisiche, è avvenuto mediante analisi al microscopio ottico delle sezioni sottili di tutti i campioni considerati (Figura 54).

Sono quindi state studiate due sezioni sottili per ogni campione, una parallela e una perpendicolare alla stratificazione/foliazione. Per ogni campione è stata realizzata una scheda dedicata, con specifica caratterizzazione della mineralogia, tessitura e struttura.

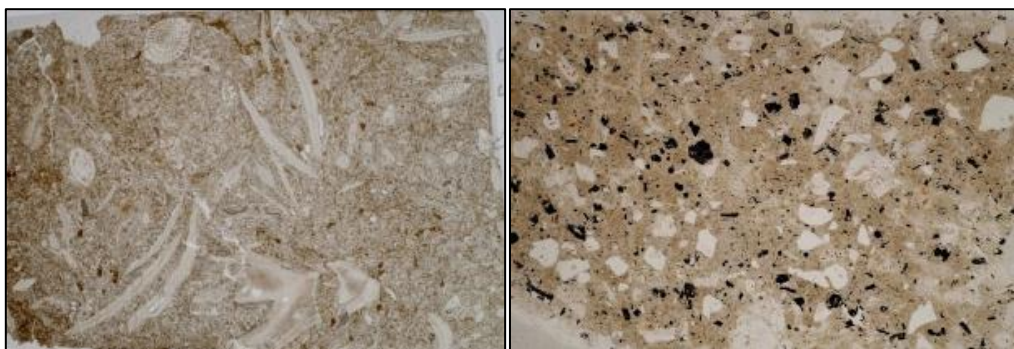


Figura 54: Sezioni sottili di Calcarea di Nago (sx) e Gruppo Vulcanico Atesino – Formazione di Ora (dx)

7.1.4 Misure di densità e porosità

La procedura per la misura della densità e della porosità dei campioni di roccia ha seguito lo standard UNI EN 1936 “Natural stone test method – Determination of real density and apparent density, and of total and open porosity”. E’ richiesta la seguente strumentazione (Figura 55): forno ventilato per asciugare i campioni, asciugatore, pompa per sottovuoto, bilancia di precisione (0.001 g).

I campioni, precedentemente tagliati in forma cubica (almeno 3 per ogni litologia), sono asciugati in forno ventilato ad una temperatura di 70 ± 5 °C e quindi sono posizionati nell’asciugatore per altre 24 ore, fino a raggiungere la temperatura ambiente.

Ogni campione è quindi pesato (m_d , massa insatura) e poi messo in un box in cui, con una pompa per il sottovuoto, la pressione è fatta decrescere fino a 2.0 ± 0.7 kPa = 15 ± 5 mm Hg. Questa pressione è mantenuta per 24 ore al fine di eliminare l’aria presente nei pori.

Successivamente acqua demineralizzata a temperatura ambiente (20 ± 5 °C) è gradualmente introdotta. La velocità dell’acqua deve essere regolata in modo che i campioni siano totalmente sommersi in circa 15 minuti. La pressione è mantenuta costante per le successive 24 ore.

Infine, la pressione è portata al valore della pressione atmosferica. Ogni campione è quindi dapprima pesato in acqua, e il valore della massa sommersa è registrato come m_h , per poi avere un rapido passaggio attraverso una carta umida, e la massa saturata è determinata come m_s .

Vengono quindi calcolati i seguenti parametri: volume dei pori aperti (V_o), volume apparente (V_b), densità apparente (ρ_b), porosità aperta (ϕ_o). Per i propositi di questo studio, la densità apparente e la porosità aperta sono state considerate equivalenti alla densità e alla porosità reali.



Figura 55: Da sinistra: asciugatore, bilancia di precisione, pompa per il sottovuoto

7.1.5 Analisi termiche

Per le analisi termiche dei campioni di roccia e di sedimenti sciolti è stato utilizzato lo strumento ISOMET 2114 (Figura 56), uno strumento portatile e maneggevole per la misura diretta delle proprietà di trasferimento del calore di un'ampia gamma di materiali. È dotato di due tipologie di sonde di misura: sonde ad ago per sedimenti sciolti, sonde di superficie per rocce. Lo strumento applica un metodo di misura dinamico, il quale permette di ridurre i tempi di misura a confronto con un metodo statico.

La misura è basata sull'analisi della risposta di temperatura del materiale analizzato ad impulsi di calore. Gli impulsi di calore sono realizzati da resistenze elettriche inserite nelle sonde, a diretto contatto con il campione soggetto a test. La valutazione della conducibilità termica è basata sul campionamento periodico delle temperature in funzione del tempo, considerando che la propagazione del calore avviene in un mezzo illimitato. Lo strumento misura direttamente la conducibilità termica λ , e fornisce in via indiretta la diffusività termica k e la capacità termica volumetrica S_{VC} . I risultati possono essere scaricati su di un computer in formato csv.

Per i campioni di roccia è stato considerato un ciclo di due misure (mediate dallo strumento) per ogni faccia del campione, dove possibile, in condizioni insature e in condizioni sature. Per i sedimenti non consolidati è stato considerato un ciclo di misure per campioni insaturi e un ciclo di misure per campioni saturi.



Figura 56: Lo strumento ISOMET 2114, utilizzato per le analisi termiche

Bibliografia

- [1] *Dip. Territorio Ambiente Foreste, Agenzia provinciale per l'energia. (Dicembre 2012). Piano energetico-ambientale provinciale (P.E.A.P.) 2013-2020.*
- [2] *COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS. A policy framework for climate and energy in the period from 2020 to 2030.*
- [3] *COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS. Energy Roadmap 2050.*
- [4] *Botteghi S., Chiesa S., Destro E., Di Sipio E., Galgaro A., Manzella A., e Montanari D. (2012). VIGOR: Prime indicazioni tecnico-prescrittive in materia di impianti di climatizzazione geotermica. ISBN: 9788879580106.*
- [5] *Destro E., Galgaro A. Università di Padova, Dipartimento di Geoscienze. (2013). Geoscambio nella Provincia di Treviso.*
- [6] *Banks D. (2012). An introduction to thermogeology : ground source heating and cooling. 2nd ed. A John Wiley & Sons Publication.*
- [7] *Richtlinienreihe VDI 4640 "Thermische Nutzung des Untergrunds".*
- [8] *UNI EN 15450. Sistemi di riscaldamento degli edifici - Progetto di sistemi con pompe di calore.*
- [9] *A. Capozza, M. De Carli, A. Galgaro, A. Zarrella. (2012). Linee Guida per la progettazione dei campi geotermici per pompe di calore. RSE.*
- [10] *Blomberg T., Claesson J., Eskilson P., Hellstrom G., Sanner B. EED - Earth Energy Designer. <http://www.buildingphysics.com>.*
- [11] *Pomarè D. (2013). Sistemi di accumulo stagionale di calore solare in ammassi rocciosi in aree a clima alpino. Tesi di laurea inedita, Dipartimento di Geoscienze, Università degli Studi Padova.*
- [12] *Decreto del Presidente della Giunta provinciale 26 gennaio 1987, n. 1-41/Legisl. (2015). Approvazione del testo unico delle leggi provinciali in materia di tutela dell'ambiente dagli inquinamenti.*
- [13] *Delibera n° 2154 del 3/9/2009. Approvazione della "Carta delle limitazioni per l'installazione di sonde geotermiche a circuito chiuso", ai sensi dell'art. 30 bis del D.P.G.P. 26 gennaio 1987, n. 1-41/Leg.*
- [14] *Delibera n° 1593 del 2/8/2013. Approvazione del primo aggiornamento della "Carta delle limitazioni per l'installazione di sonde geotermiche a circuito chiuso" al fine di garantire la salvaguardia qualitativa e quantitativa delle acque sotterranee.*

- [15] *LEGGE PROVINCIALE 28 dicembre 2009, n. 19. Disposizioni per la formazione del bilancio annuale 2010 e pluriennale 2010-2012 della Provincia autonoma di Trento (legge finanziaria provinciale 2010).*
- [16] *Gazzetta Ufficiale N. 119 del 24 Maggio 2006. DECRETO DEL PRESIDENTE DELLA REPUBBLICA 15 febbraio 2006. Norme di attuazione del Piano generale di utilizzazione delle acque pubbliche.*
- [17] *European Geothermal Energy Council (EGEC). (2009). Geothermal heat pumps: ground source heat pumps. <http://egec.info/wp-content/uploads/2011/01/EGEC-Brochure-GSHP-2009.pdf>.*
- [18] *Decreto del Presidente della Repubblica 15 febbraio 2006. Piano Generale di Utilizzazione delle Acque Pubbliche. Parte prima. Quadro conoscitivo di base.*
- [19] *Galgaro A., et al. (2012). Proposte metodologiche per la valutazione del potenziale di geoscambio: il Progetto VIGOR. Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater.*
- [20] *Viesi D. (2011). Analisi del potenziale di geoscambio della Bassa Valle del Fiume Sarca tra Arco e Riva del Garda - Trentino. Tesi di laurea inedita, Dipartimento di Geoscienze, Università degli Studi Padova.*
- [21] *Baldessari G. (2012). ANALISI DEL POTENZIALE DI GEOSCAMBIO DELL'AREA COMPRESA NEL FOGLIO 060 - TRENTO DEL CARG. Tesi di laurea inedita, Dipartimento di Geoscienze, Università degli Studi Padova.*
- [22] *CNR-IGG. (2014). VIGOR: Sviluppo geotermico nelle Regioni della Convergenza.*
- [23] *www.meteotrentino.it.*
- [24] *www.climatrentino.it.*
- [25] *Studio Geologico Associato GEOALP (Dicembre 2008). Misure freatimetriche nel fondovalle atesino.*
- [26] *Studio Geologico Associato GEOALP. (Luglio 2012). Acquisizione dei dati geotermici della falda idrica superficiale nel territorio della Provincia Autonoma di Trento.*
- [27] *Bosellini A., Castellarin A., Dal Piaz G.V., Nardin M. (1999). Carta litologica del Trentino. SCALA 1:200.000.*
- [28] *Avanzini M., Bargossi G.M., Borsato A., Selli L. (2010). Note illustrative della carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000, Foglio 060 Trento.*
- [29] *Ruggeri M. (2014). ANALYSIS OF THE THERMO-PHYSICAL PROPERTIES OF SOILS AND ROCKY MATERIALS IN TRENTO AREA RELATED TO USE OF THE SUBSOIL AS A THERMAL ENERGY STORAGE. Tesi di laurea inedita, Dipartimento ICEA, Università degli Studi Padova.*
- [30] *Bazzoli G. (2008). Relazione Idrogeologica. Progetto preliminare per il potenziamento dell'asse ferroviario Monaco-Verona, linea di accesso sud.*
- [31] *Domenico P.A. and Schwartz F.W. (1990). Physical and Chemical Hydrogeology. John Wiley & Sons, New York.*

- [32] *Martinelli et al. (2001). Valutazione quantitativa del raffreddamento all'aumentare dell'altitudine.*
- [33] *Gallottini D. (2009). Analisi del potenziale di geoscambio in Alto Adige nei sistemi di climatizzazione accoppiati a pompe di calore. Tesi di laurea inedita, Dipartimento di Geoscienze, Università degli Studi Padova.*
- [34] *DECRETO DEL PRESIDENTE DELLA REPUBBLICA 26 agosto 1993, n. 412. Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia.*
- [35] *<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>.*
- [36] *Decreto 11 marzo 2008. Definizione dei valori limite di fabbisogno di energia primaria annuo e di trasmittanza termica.*
- [37] *UNI TS 11300-1 Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale. Maggio 2008.*
- [38] *UNI EN 12831. (Dicembre 2006). Metodo di calcolo del carico termico di progetto.*
- [39] *UNI 10349. (Aprile 1994). Riscaldamento e raffrescamento degli edifici, dati climatici.*
- [40] *Arslan U., Huber H. (2013). Numerical back-analysis of geothermal laboratory tests with forced groundwater flow. PROCEEDINGS, Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, February 11-13, 2013.*
- [41] *Hurter S. & Schellschmidt R. (2003). Atlas of geothermal resources in Europe. Geothermics.*
- [42] *<http://geothopica.igg.cnr.it>.*
- [43] *Rosén B., Gabrielsson A., Fallsvik J., Hellström G. and Nilsson G. (2001). Systems for Ground Source Heating and Cooling – A Status Report. Statens Geotekniska Institut Linköping, Sweden.*

