

Mappatura tecno-economica per il miglioramento nella gestione di impianti geotermici superficiali a circuito chiuso in cantone Ticino

Autor(en): **Perego, Rodolfo / Pera, Sebastian / Galgaro, Antonio**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bollettino della Società ticinese di scienze naturali**

Band (Jahr): **107 (2019)**

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-1003059>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Mappatura tecno-economica per il miglioramento nella gestione di impianti geotermici superficiali a circuito chiuso in Cantone Ticino

Rodolfo Perego^{1*}, Sebastian Pera¹ e Antonio Galgaro²

¹ Istituto scienze della Terra, Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana (SUPSI), Campus Trevano, Via Trevano, CH-6952 Canobbio

² Dipartimento di Geoscienze, Università di Padova, Via Gradenigo 6, I-35131 Padova

* rodolfo.perego@supsi.ch; tel.: +41 58 666 62 18

Riassunto: il Cantone Ticino è fortemente interessato dallo sfruttamento del sottosuolo attraverso l'uso di sistemi geotermici superficiali, in forma di scambiatori di calore sia a circuito chiuso sia a circuito aperto. In questo studio sono state prodotte mappe tecno-economiche per la stima del potenziale geotermico superficiale, considerando i sistemi a circuito chiuso. È stato creato un metodo empirico per ricavare una mappa del potenziale geotermico, espressa come metri di scambiatori termici richiesti per fornire 1 kW di potenza installata. La mappa prodotta mostra una discrepanza complessiva rispetto ai dati reali di lunghezza installata di circa $\pm 23\%$. Sono state successivamente create delle mappe per diversi indicatori di fattibilità tecnico-economica, confrontate con dati e misurazioni reali. Confrontando i risultati con la normativa cantonale attuale sullo sfruttamento termico del sottosuolo, le mappe prodotte mostrano una gestione non ottimizzata della risorsa geotermica superficiale, poiché le zone ad alto potenziale sono comunemente situate dove l'installazione di BHE (Borehole Heat Exchangers, ovvero scambiatori di calore in foro) non è consentita e frequentemente i sistemi a circuito chiuso sono installati dove il potenziale stimato è inferiore, principalmente nei conoidi alluvionali. Alla luce di queste considerazioni, il processo di autorizzazione per sonde geotermiche dovrebbe essere rivisto tenendo conto del reale potenziale tecno-economico.

Parole chiave: geotermia superficiale; mappatura; potenziale energetico; energie rinnovabili

Techno-economic mapping for the improvement of shallow geothermal management in Canton of Ticino

Abstract: The Canton of Ticino, a mountainous region located in the southern part of Switzerland, is greatly affected by the continuous growth of subsurface exploitation through the use of both closed-loop and open-loop geothermal systems. In this study, techno-economic maps for shallow geothermal potential of the Canton of Ticino are produced, considering closed-loop systems. The work starts with the identification of the main parameters affecting the techno-economic potential such as GST and thermal conductivity. Maps for different indicators of techno-economic feasibility are created and compared against real data/measurements. An empirical method is tailored to derive a map of the techno-economic geothermal potential, expressed as meters required to provide 1kW of installed power. The produced map shows an overall discrepancy from real installed length data of approximately $\pm 23\%$. Moreover, the produced maps indicate that the shallow-geothermal resource management is not optimal. Indeed, high potential zones are commonly located where the installation of BHE is not permitted, and closed-loop systems are often installed where the estimated potential is lower, mainly in alluvial fans. In light of these considerations, the authorization process in the Canton of Ticino for BHE should be revised taking into account the real techno-economic potential.

Key words: shallow geothermal; mapping; energy potential; renewable energy

INTRODUZIONE

L'energia geotermica superficiale è un'energia rinnovabile ampiamente sfruttata a livello Europeo, in particolare attraverso l'uso di sistemi a circuito chiuso, o sonde geotermiche. Questi sistemi scambiano calore con il sottosuolo mediante un fluido termo-vettore, che circola in un tubo di plastica o di metallo installato nel sottosuolo. Tale scambiatore può sia estrarre calore dal terreno in inverno per riscaldare ambienti interni, sia sottrarre calore dagli ambienti da raffrescare e "iniettare" tale calore di scarto nel sottosuolo. Si tratta di una

tecnologia sicura che si è rivelata molto efficiente ed economicamente vantaggiosa nel corso degli anni, grazie ad una corretta progettazione e installazione (Banks, 2012). Questa tecnologia è relativamente matura, ma non è propriamente economica, soprattutto per bassi fabbisogni energetici: si osservano benefici economici solo dopo diversi anni di funzionamento ed i costi di investimento iniziali sono tendenzialmente elevati. Tali fattori rappresentano i principali limiti che riducono la massiccia diffusione di questa tecnologia sicura e performante in tutta Europa. La Svizzera è uno dei paesi più avanzati dal punto di vi-

sta dello sfruttamento di questo tipo di energia geotermica superficiale. Gli elevati standard di perforazione, le condizioni geologiche e termiche favorevoli, la conoscenza del territorio e della tecnologia posseduta dagli esperti del settore rende questa tecnologia una delle più popolari tra tutte le tecnologie che sfruttano energie rinnovabili, con la più alta densità spaziale di sonde nel mondo (Lund & Boyd, 2016). Le pompe di calore geotermiche che sfruttano il calore dal sottosuolo, sono solitamente installate in edifici nuovi, in particolare in quelli pubblici che adottano la certificazione Svizzera MINERGIE®, ma questa tecnologia potrebbe anche essere utilizzata per soddisfare il fabbisogno energetico in edifici storici o culturalmente rilevanti.

In particolare, in Cantone Ticino le politiche energetiche cantonali degli ultimi due decenni (Dipartimento del territorio 2017) hanno portato alla progressiva diminuzione delle emissioni di CO₂ grazie al massiccio sfruttamento termico del sottosuolo mediante sistemi geotermici sia a circuito chiuso sia a circuito aperto (con prelievo di acqua di falda). Di conseguenza, il territorio cantonale ospita attualmente un gran numero di impianti geotermici, con una densità complessiva di circa 1.5 sonde/km², che sale a 44 sonde/km² se consideriamo le principali città (Bellinzona, Lugano, Locarno). Questa attuale grande quantità di installazioni solleva problemi relativi alla mutua vicinanza degli impianti o alla presenza di campi sonde adiacenti, che influenzano a lungo termine la temperatura del terreno e le rispettive prestazioni (Perego *et al.*, 2016).

Le nuove richieste di utilizzo termico del sottosuolo sono un evento ormai molto frequente: le informazioni sulle nuove autorizzazioni sono quindi memorizzate in un geodatabase specifico (GESPOS, 2018), creato e gestito dall'Istituto scienze della Terra (IST) della SUPSI (Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana) che include informazioni su perforazioni (piezometri e pozzi), sorgenti e sistemi geotermici aperti o chiusi. Sono presenti informazioni amministrative e tecniche per più di 4'300 sonde geotermiche a circuito chiuso distribuite in più di 1'100 installazioni, georeferenziate e indicizzate. L'analisi dei dati consente di stimare una potenza installata complessiva di sistemi geotermici a circuito chiuso di circa 30 MW e una lunghezza complessiva delle perforazioni di 550 km, mostrando una forte penetrazione di questa tecnologia a livello cantonale (Fig. 1).

La maggior parte delle sonde geotermiche si trova all'interno di depositi Quaternari (43%) che riempiono le valli glaciali: tali contesti costituiscono lo sfondo principale per le attività umane e di conseguenza per lo sfruttamento energetico. Una quantità consistente di sonde è installata in rocce quali gneiss (33%), graniti (10%), calcari e rocce verdi (6%). Le installazioni più frequenti sono costituite da una e due sonde (rispettivamente il 27.6% e il 30% del totale). La capacità di riscaldamento media ponderata osservata in Cantone Ticino è di circa 25 kW. È stata osservata una regressione tra potenza installata inferiore a 100 kW e numero di sonde ($R^2 = 0.956$): secondo tale regressione, per una capacità di riscaldamento media di 25 kW un sistema rappresentativo è costituito da quattro sonde

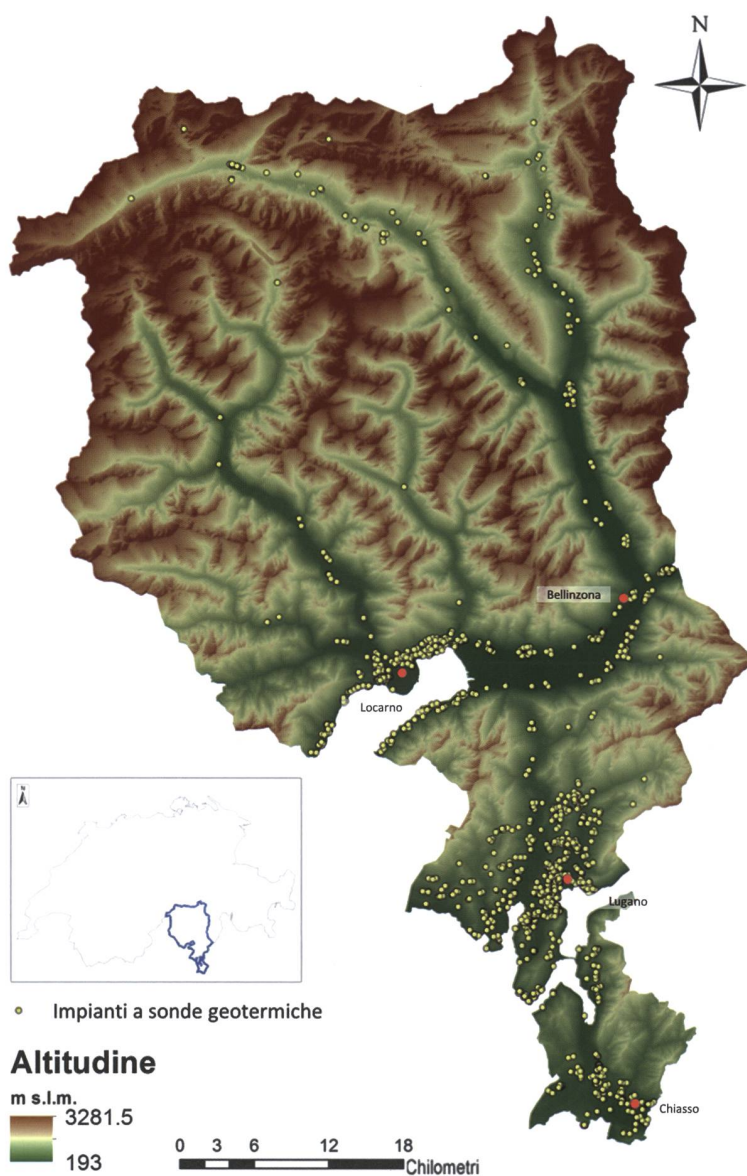


Figura 1: Area di studio considerata (l'intero territorio Cantonale) con evidenziati gli impianti che sfruttano energia geotermica superficiale tramite sonde geotermiche (immagine modificata da Perego *et al.*, 2019).

(Perego *et al.*, 2019). Questo scenario è stato considerato come riferimento per le simulazioni di lunghezza del campo sonde presentate in questo documento.

Attualmente il processo di autorizzazione dei sistemi a circuito chiuso si basa solamente sulle restrizioni derivanti dall'applicazione della legge e dell'ordinanza sulla protezione delle acque Svizzere (Consiglio Federale Svizzero, 1998) e contenute in UFAM (2009): un estratto di questo regolamento è riportato nella tabella 1. L'approccio è quindi di tipo puramente politico/amministrativo e non tiene conto del potenziale di sfruttamento presente nel sottosuolo.

Lo scopo di questo articolo è quindi quello di dare alcune indicazioni per migliorare l'attuale procedura di autorizzazione dei sistemi geotermici superficiali a circuito chiuso, adottando metodi più dinamici e robusti che tengano conto anche del potenziale calore scambiabile. Tale approccio permetterebbe di bilanciare meglio gli aspetti ambientali, tecnologici e giuridici su

base spaziale. Negli ultimi decenni solo pochi articoli scientifici si sono concentrati sulla stima del potenziale geotermico superficiale, in particolare attraverso una procedura di mappatura. Solo recentemente tale argomento ha guadagnato visibilità con i lavori di autori diversi (Schiel *et al.*, 2016, Garcia-Gil *et al.*, 2015, Bertermann *et al.*, 2015, Casasso *et al.*, 2017, Arola *et al.*, 2014, Viesi *et al.*, 2018, Galgaro *et al.*, 2015), dimostrando chiaramente che la gestione spaziale dei sistemi geotermici superficiali (sia aperti che chiusi) sta diventando sempre più rilevante a livello locale o regionale.

MATERIALI E METODI

La procedura di mappatura presentata in questo lavoro è iniziata con l'identificazione dei principali parametri "naturali" che influiscono sul funzionamento, sull'efficienza e sul dimensionamento delle sonde geotermiche verticali. Per l'area di studio considerata, i parametri naturali studiati sono la temperatura media annua dell'aria (mean annual air temperature, MAAT) che influenza la temperatura superficiale del terreno (ground surface temperature, GST) e la conducibilità termica del sottosuolo (λ). La conducibilità termica è stata calcolata separatamente per gli affioramenti rocciosi e per il materiale non consolidato, poiché tali tipi di materiale richiedono metodologie di calcolo completamente differenti.

La procedura di lavoro ha seguito un approccio sia empirico che normativo: in particolare, alcune formule utilizzate per valutare i valori di temperatura (ad es. temperatura superficiale del terreno) e i parametri di fabbisogno energetico (ad es. l'indice annuale per il fabbisogno di riscaldamento) sono tratte dalle normative svizzere, come la SIA 384/6 (SIA, 2010) e dalla certificazione MINERGIE®. Anche la maggior parte dei valori di conducibilità termica è presa dalla normativa SIA 348/6, poiché poche misurazioni termiche in-situ erano disponibili. La procedura di mappatura proposta per stimare il potenziale tecnico-economico parte dalla stima della lunghezza del campo sonde richiesto per soddisfare una certa richiesta energetica. La stima della lunghezza presuppone una preventiva caratterizzazione termica del sottosuolo.

Utilizzando la lunghezza stimata del campo sonde è pertanto possibile stimare il costo di investimento dell'impianto, che a sua volta consente di produrre mappe di indici tecno-economici. La parte modellistica del presente articolo è ispirata dunque al lavoro di Galgaro *et al.* (2015) e riportato in Perego *et al.* (2019).

Risorsa naturale

Mappatura della temperatura media annua dell'aria (MAAT) e della temperatura media annua superficiale del terreno (GST)
La parte iniziale del lavoro ha previsto la creazione di una mappa Cantonale di temperatura media annua dell'aria (MAAT) che consentisse di stimare la temperatura superficiale del terreno (GST), un input richiesto per il software EED, utile per creare scenari di pre-dimensionamento di impianti geotermici superficiali a circuito chiuso. Infatti, il valore di GST è utilizzato

Tabella 1: Informazioni di riferimento per lo sfruttamento del calore dal sottosuolo in Svizzera.

Tipo di sistema	ub	Au	Zu	Area	S3	S2	S1
Sonde geotermiche (sistemi verticali)	+	b	-	-	-	-	-
Circuiti sotterranei (sistemi orizzontali)	+	+4	-2/4	-B/5/4/7	-	-	-
Pali geotermici e altri elementi termoattivi	+	b	-2/4	-b	-	-	-
Pozzi per l'estrazione delle acque sotterranee, per il riscaldamento e il raffreddamento	+	b	-	-	-	-	-
Pozzi coassiali	-6	-6	-	-	-	-	-

(+) Nessuna restrizione; (b) ammesso o meno dopo un'analisi caso per caso da parte dell'Autorità, richiede l'autorizzazione; (-) vietato; (-b) vietato ma potrebbe essere derogato se si tratta di un caso particolare; (2) può essere autorizzato se un rapporto idrogeologico dettagliato identifica i limiti futuri delle zone di protezione S3; (4) le installazioni devono essere realizzate ad almeno 2 m sopra il livello piezometrico massimo; (5) nessuna pompa di calore ad espansione diretta; (7) se i circuiti si trovano nel suolo (orizzonti A o B) e non nel sottosuolo, può essere concessa un'autorizzazione; (6) autorizzati solo se studi geofisici e studi idrogeologici specifici affermano che non esiste alcuna minaccia per le acque sotterranee.

dal software per calcolare la temperatura del terreno a metà della lunghezza della sonda (solitamente a 50-60 m di profondità), utilizzando sia la conducibilità termica che le informazioni sul flusso di calore. Non erano disponibili per il Cantone Ticino serie temporali consistenti di temperatura del suolo, quindi per stimare dei valori di temperatura del suolo è stato utilizzato un robusto e omogeneo database di temperatura dell'aria, prodotto da MeteoSvizzera. La tabella 2 mostra la posizione delle stazioni di monitoraggio utilizzate e i valori di MAAT corrispondenti.

La procedura di mappatura è stata eseguita su scala ridotta, pertanto sono stati presi in considerazione solo gli effetti dell'altitudine, senza considerare la latitudine. È stata eseguita una regressione lineare tra dati di altitudine e dati di MAAT, trovando una formula di regressione con un fattore Pearson R^2 di 0,95 che ha portato ad un errore di circa il 7,4% (0.65°C) tra la temperatura misurata e stimata. L'equazione lineare ricavata è:

$$M.A.A.T.(^{\circ}C) = \frac{\text{Altitudine} - 2385.7}{-174.61} \quad (1)$$

Tale formula è stata applicata ad un modello digitale di quote (DEM) con risoluzione 25 m, ottenendo la mappa di MAAT per il Cantone Ticino.

Come previsto, le valli mostrano temperature medie annue dell'aria più elevate e questo si riflette sulle temperature medie annue del suolo. In letteratura, come buona approssimazione, la MAAT è comunemente considerata uguale alla temperatura del terreno indisturbato (Viesi *et al.*, 2018; Galgaro *et al.*, 2015). Tuttavia un procedimento di verifica di questa ipotesi, ripor-

Tabella 2: Informazioni sulle stazioni MeteoSvizzera cantonali utilizzate per il calcolo e mappatura della MAAT.

Nome stazione	Informazioni spaziali			Norma climatica: 1981-2010 (Dato: WGS 84)
	Latitudine (DD)	Longitudine (DD)	Altitudine (m s.l.m.)	MAAT (°C)
Lugano	46.0042	8.9603	273	12.4
Stabio	45.8434	8.9323	353	11.1
Cimetta	46.2004	8.7916	1661	5.2
Locarno Monti	46.1724	8.7875	367	12.4
Magadino / Cadenazzo	46.1600	8.9336	203	11.4
Grono	46.2550	9.1637	324	12.4
Acquarossa / Comprovasco	46.4595	8.9354	575	9.9
Piotta	46.5148	8.6880	990	7.7
S. Bernardino	46.4635	9.1846	1639	3.9

Tabella 3: Confronto tra le temperature del terreno indisturbate dai test di risposta termica (TRT) e MAAT.

Nome della stazione	Lat. (DD, WGS84)	Lungo. (DD, WGS 84)	Altitudine (m s.l.m.)	Temperatura del terreno indisturbata da TRT (°C)	Stima MAAT da mappatura (°C)	Differenza assoluta (°C)
Barbengo	45.9596	8.9197	283	14.4	12	2.4
Collina d'oro	45.9631	8.9083	526	11.8	10.7	1.1
Lugano-Besso	46.0094	8.9380	378	14.8	11.5	3.3
Massagno	46.0115	8.9423	367	14.8	11.6	3.2
Mendrisio	45.8642	8.9824	356	12.7	11.6	1.1
Olivone (coord.stimate)	46.5181	8.8842	1433	8.3	5.5	2.8
Fonte dei dati: vari TRT eseguiti in-situ tra il 2010 e il 2015				MAE: 2.3 °C		RMSE: 2.5 °C

Tabella 4: Confronto tra GST misurato e stimato in cinque località ticinesi.

Nome del sito	Latitudine (DD, WGS84)	Longitudine (DD, WGS84)	Altitudine (m s.l.m.)	Consistenza serie	GST misurato (°C)	GST mappato (°C)	Differenza assoluta (°C)
Acquarossa / Comprovasco	46.4594	8.9356	575	Valore medio per 3 anni	10.6	11.9	1.3
Locarno Monti	46.1725	8.7874	366	Valore medio per 9 anni	13.6	13.1	0.5
Magadino / Cadenazzo	46.1600	8.9336	203	Valore medio per 12 anni	12.7	14.0	1.3
Robiei	46.4430	8.5133	1896	Valore medio per 6 anni	5.1	7.1	2.0
Stabio	45.8433	8.9323	353	Valore medio per 4 anni	11.8	13.2	1.4
Fonte dei dati: IDAWEB					MAE: 1.3°C		RMSE: 1.4°C

Tabella 5: Caratterizzazione termica degli affioramenti rocciosi e dei depositi Quaternari appartenenti ad acquiferi attualmente non monitorati in Cantone Ticino.

Litologia	λ (W/mK)	Fonte dei dati
Anfibolite, metagabbro, meta-ultrabasite	2	Media da SIA 384/6
Gneiss pelitico e psammitico, fillade, conglomerato, arenaria	2.6	Media da SIA 384/6
Dolomia e marmo dolomitico	3.17	Laboratorio, misure Soma, 2015
Granito, granodiorite	2.8	SIA 384/6
Acido e vulcaniti di base	2.36	Laboratorio, misure Soma, 2015
Gneiss di granito	2.7	SIA 384/6
Depositi Quaternari generici	2	Valore rappresentativo SIA 384/6

tato in Perego *et al.* (2019), ha stabilito che l'uso di tale approssimazione non fosse adeguata per il territorio cantonale. Di conseguenza per produrre una mappa della temperatura superficiale del suolo (GST) si è applicato sulla mappa di MAAT creato un fattore di correzione ricavato dalla normativa svizzera SIA 384/6. I risultati della procedura di mappatura della GST sono mostrati in figura 2: sono state utilizzate cinque stazioni di monitoraggio prese da IDAWEB per confrontare la ricostruzione proposta di GST con dati reali misurati. I dati di GST misurati a 0.1 m di profondità sono raccolti in serie temporali di breve durata e aggregate mensilmente. Il confronto dei dati tra GST mappato e misurato è riportato in tabella 4.

La mappa di GST ha subito un doppio processo di confronto, prima con dati reali e successivamente con una ricostruzione affidabile di Signorelli & Kohl (2004) per l'intera Svizzera e valida per quote ≤ 1500 m slm. Considerato questo doppio processo di confronto, la mappa GST prodotta è stata considerata adatta per ulteriori elaborazioni. Una maggiore disponibilità di dati di temperatura del suolo potrebbe sicuramente migliorare l'affidabilità di questa ricostruzione.

Caratterizzazione termica del sottosuolo

In seguito alla realizzazione delle mappe di MAAT e GST, si è caratterizzato termicamente il sottosuolo partendo da carte geologiche, da proprietà termiche prese da letteratura (SIA, 2010) e da prove in-situ di risposta termica e da prove di portata. Per ricavare una mappa di conducibilità termica il territorio è stato suddiviso in due parti separate, dipendentemente dal tipo di materiale: affioramenti rocciosi e depositi non consolidati all'interno delle falde acquifere monitorate. La caratterizzazione termica spaziale di queste due porzioni di territorio ha richiesto differenti approcci di mappatura, descritti in dettaglio nei paragrafi successivi.

Affioramenti rocciosi

La mappa di conducibilità termica per gli affioramenti rocciosi è stata costruita utilizzando una mappa geologica in scala 1:500'000 fornita da Swisstopo. Sono stati assegnati a ciascuna litologia specifica i valori raccomandati di conducibilità termica secondo SIA (2010); in presenza di litologie multiple all'interno dello stesso poligono, è stato assegnato un valore medio della conducibilità termica raccomandata. Agli affioramenti di dolomite e vulcanite nel Ticino meridionale sono stati assegnati valori di conducibilità termica sperimentali: tali valori sperimentali di λ derivano da misure di laboratorio descritte in Soma, 2015. Le proprietà termiche assegnate ad ogni macro-litologia sono riportate in tabella 5. La mappa ottenuta di conducibilità termica degli affioramenti rocciosi è stata confrontata con cinque TRT eseguiti in roccia predominante. I risultati mostrano che la conducibilità termica stimata mappata è inferiore in quasi tutti i luoghi considerati (errore medio = +1 W / mK). Una mappa di conducibilità termica a questa scala non può considerare anomalie locali, eterogeneità o flusso locale di acque sotterranee che influenzano (spesso migliorano) le proprietà termiche del sottosuolo. Ciò potrebbe implicare che le conducibilità

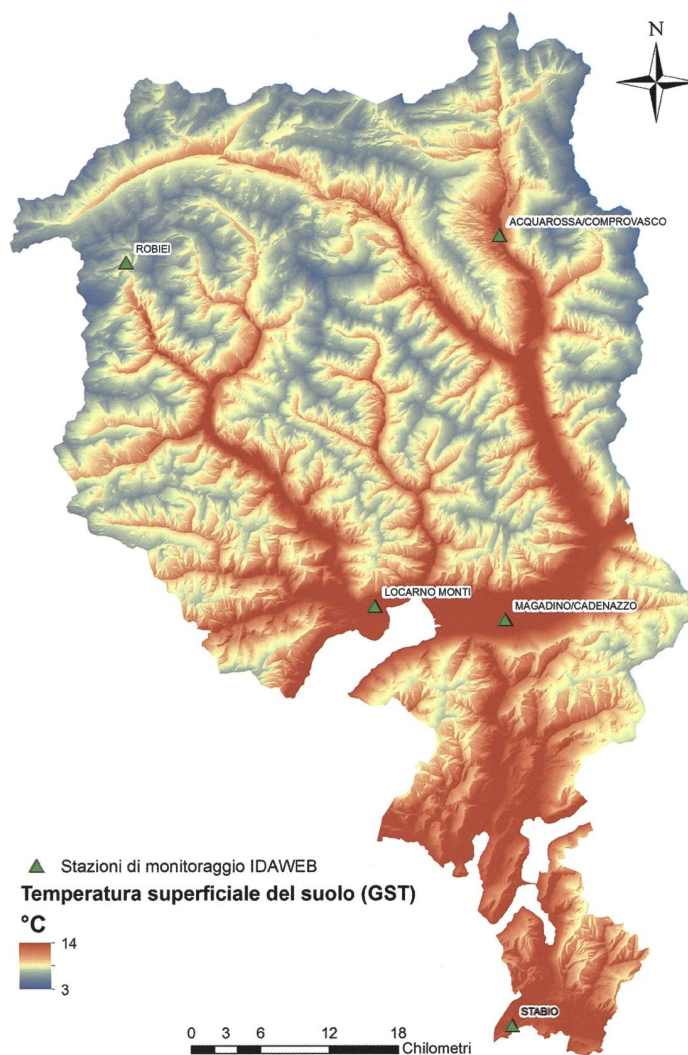


Figura 2: Carta di temperatura superficiale del suolo media annua (GST), con evidenziate le stazioni IDAWEB di monitoraggio utilizzate per il confronto (immagine modificata da Perego *et al.*, 2019).

stimate mappate potrebbero essere sistematicamente sottostimate e la lunghezza richiesta degli scambiatori di calore leggermente sovrastimata.

Depositi non consolidati

Per la caratterizzazione della porzione di territorio interessata dalla presenza di depositi non consolidati sono state prese in considerazione solo le principali falde acquifere monitorate: piano di Magadino, Laveggio, Vedeggio, Valle Maggia e acquifero di Chiasso. L'approccio utilizzato consiste inizialmente nel mappare la conducibilità idraulica e la superficie piezometrica della falda freatica per ogni acquifero monitorato. La prima ricostruzione è stata utile per assegnare proprietà termiche appropriate a ciascuna zona, mentre la seconda ricostruzione è stata utile per valutare la profondità delle acque sotterranee.

Lo spessore della zona vadosa (insatura) all'interno del sottosuolo influenza sia la conducibilità termica del sottosuolo che la velocità di trasferimento del calore come dimostrato sperimentalmente in Luo *et al.* (2018). La superficie piezometrica della falda freatica è stata ricostruita per gli acquiferi monitorati utilizzando

i dati presi tra il 2015 e il 2017 dalla rete di monitoraggio cantonale delle acque sotterranee, composta da 110 punti di monitoraggio (10 sonde automatiche e circa 100 tra piezometri e pozzi). Tali dati sono stati utilizzati per stimare gli spessori sia della zona vadosa che della porzione satura considerando 100 m profondità, che è comunemente considerata come la profondità tipica degli scambiatori di calore verticali (sonde geotermiche). L'utilizzo di un approccio secco/umido consente di descrivere più accuratamente l'influenza della zona vadosa sui valori di λ . Questo fattore di correzione non influisce in modo considerevole nelle zone con acque sotterranee poco profonde, ma è fondamentale per zone dove le acque sotterranee sono più profonde, come nei conoidi alluvionali. Per la caratterizzazione termica dei depositi non consolidati, si sono prima ricostruite le proprietà idrogeologiche dei sedimenti, in particolare la conducibilità idraulica. L'utilizzo di 556 valori di conducibilità idraulica misurati da prove di pompaggio ha permesso di costruire una mappa di proprietà idrogeologiche (vedi Perego et al., 2019).

La ricostruzione delle proprietà idrogeologiche è stata il punto di partenza per la caratterizzazione termica dei depositi Quaternari all'interno degli acquiferi monitorati. I depositi mappati sono stati divisi in classi litotessiturali fini, medie e grossolani, secondo dei valori rappresentativi di conducibilità idraulica, corrispondenti rispettivamente al limo, sabbia e ghiaia (Freeze & Cherry, 1979; Fetter, 2001; Perego et al., 2019). Con tale approccio, il 58% delle falde acquifere è stato classificato come ghiaioso, mentre la restante porzione è stata classificata come sabbiosa (39%) e argillosa (3%). I depositi non consolidati classificati sono stati caratterizzati termicamente assegnando a ciascuna classe litologica un valore λ di riferimento per uno scenario completamente umido e completamente secco (λ umido e λ secco). Tale approccio è stato adottato poiché vi sono zone situate principalmente nella parte settentrionale dell'area di studio (a nord del Piano di Magadino), unitamente ai conoidi alluvionali, che sono caratterizzate da un'elevata profondità delle acque sotterranee. La λ ponderata per ciascun pixel è stata dunque stimata spazialmente come:

$$\lambda_{\text{pesata}} = \frac{[(\lambda_{\text{secca}} * \text{spessore insaturo}) + (\lambda_{\text{bagnata}} * \text{spessore saturo})]}{100 \text{ m}} \quad (5)$$

È stata adottata una profondità di riferimento di 100 m per il calcolo della λ ponderata, poiché non erano disponibili dati specifici sulla profondità del basamento roccioso. Una conducibilità termica di 2 W/mK è stata assegnata a depositi generici del Quaternario non appartenenti a falde acquifere monitorate; si tratta di un valore ragionevole data la bassa profondità delle acque sotterranee e data la presenza di litologie grossolane osservate all'interno del sottosuolo del Cantone Ticino (Tab. 5). Alle ghiaie è stata assegnata una conducibilità termica secca di 0.4 W/mK e di 1.7 W/mK per una condizione completamente satura. Alle sabbie e ai limi sono stati assegnati rispettivamente conducibilità

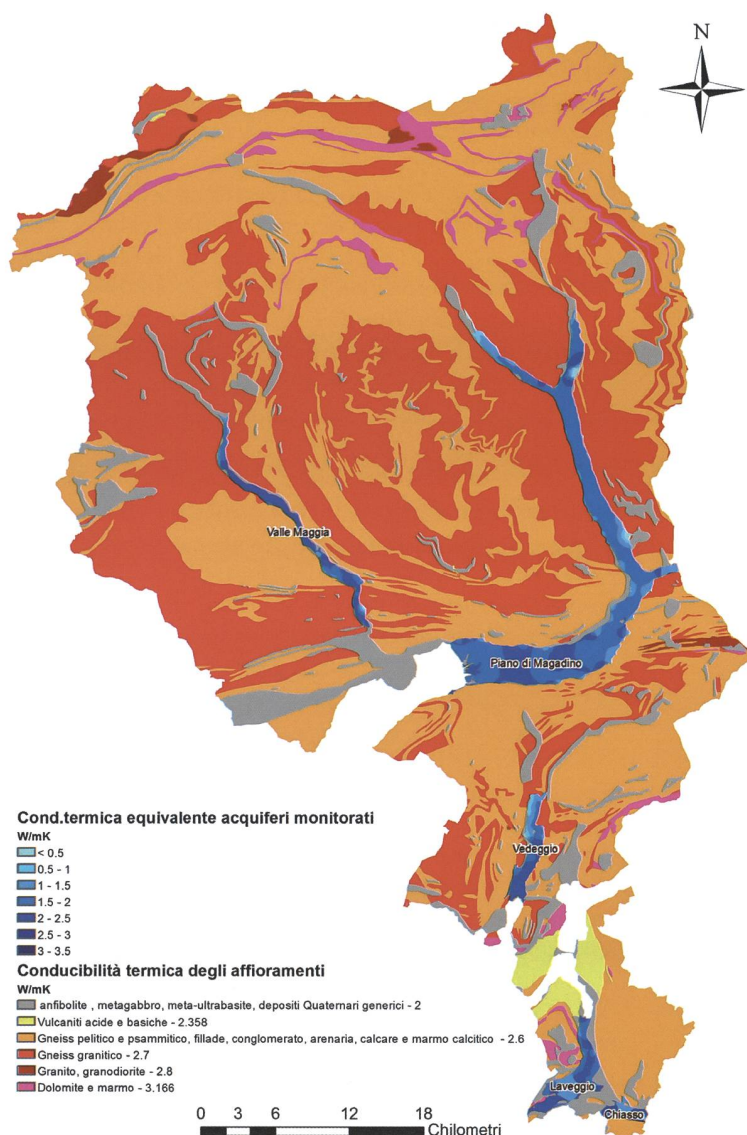


Figura 3: Ricostruzione spaziale della conducibilità termica in Cantone Ticino. I toni che vanno dal giallo al rosso rappresentano gli affioramenti rocciosi, mentre le sfumature di blu rappresentano gli acquiferi monitorati (immagine modificata da Perego et al., 2019).

termiche secche/bagnate di 0.5/2.3 W/mK e 0.6/1.4 W/mK.

I risultati della ricostruzione della conducibilità termica sia per gli affioramenti che per i sedimenti sono riportati in figura 3. Un TRT effettuato all'interno di depositi non consolidati vicino a Mendrisio (acquifero del Laveggio) è stato utilizzato per un confronto tra λ misurata e simulata. L'errore è stato quantificato nel 27% che potrebbe essere dovuto al contributo convettivo delle acque sotterranee, trascurato in questo studio. Una caratterizzazione termica più dettagliata del sottosuolo attraverso dati reali migliorerebbe il processo di mappatura e conseguentemente i risultati finali.

Vincoli tecnologici

Caratteristiche del sistema geotermico di riferimento

La stima della lunghezza necessaria degli scambiatori di calore è strettamente connessa all'identificazione di un'unità residenziale di riferimento che potrebbe

Tabella 7: Parametri del sistema geotermico di riferimento e valori usati nelle simulazioni EED.

Input	Parametro	Valore										
Perforazione e scambiatore di calore	Tipo di sonda	Doppia U										
	Disposizione	2x2 (No. 233) – 4sonde										
	Distanza tra sonde	8 m										
	Diametro perforazione	130 mm										
	Conducibilità termica grouting	1 W/mK										
	Portata fluido	2 l/s per sonda										
	Diametro esterno sonda	32 mm										
	Spessore	3 mm										
	Conducibilità termica materiale sonda	0.420 W/mK										
	Distanza tra tubi interni	80 mm										
Fluido termo-vettore	Conducibilità termica	0.48 W/mK										
	Calore specifico	3795 J/kgK										
	Densità	1052 kg/m3										
	Viscosità	0.0052 kg/ms										
	Punto di congelamento	-14 °C										
Resistenza termica sonde	Valori costanti	0.140 mK/W										
	- Fluido-terreno	0.450 mK/W										
	- Interno											
	Considera flussi di calore interni											
Capacità di riscaldamento		25 kW										
Performance	Coefficiente di prestazione stagionale	4										
Richiesta energetica	Richiesta energetica annua (comprende Acqua Calda Sanitaria)	30 MWh										
		22.5 MWh/anno forniti dal terreno										
		7.5 MWh/anno forniti dalla PdC										
	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Sett	Ott	Nov	Dic
Fabbisogno riscaldamento [MWh/mese]	4.65	4.44	3.75	2.97	1.92	0	0	0	1.83	2.61	3.51	4.32
Durata del carico di picco mensile [ore/mese]	6	5	5	3	3	0	0	0	3	3	5	6

rappresentare un edificio target. È stata scelta come rappresentativa un'unità residenziale composta da 5 appartamenti di 100 m² ciascuno (500 m² totali) che rappresenta la superficie media di un appartamento situato nel Cantone Ticino (USTAT, 2018) e in accordo con il Piano Energetico Cantonale che considera come target per le analisi energetiche un edificio residenziale plurifamiliare il cui riscaldamento è fornito da olio combustibile (Repubblica e Cantone Ticino, 2013). Il sistema geotermico di riferimento è stato identificato in un'installazione a quattro sonde, con una capacità di riscaldamento di 25 kW, come descritto in precedenza nell'introduzione.

Fabbisogno energetico ipotizzato

È stato utilizzato un indice energetico di 60 kWh/m²·anno come riferimento per stimare sia la domanda di calore annuale che la domanda di acqua calda sanitaria (ACS). L'indice, preso dal marchio di qualità MINERGIE®, rappresenta la domanda di energia per gli edifici costruiti prima del 2000 e poi ristrutturati. Per stimare il fabbisogno energetico non è stato considerato l'indice per edifici nuovi (38 kWh/m²·anno) al fine di mantenere un approccio conservativo ed evitare la sottostima della lunghezza degli scambiatori di calore, data la richiesta energetica notevolmente inferiore dei nuovi edifici, che non rappresenta lo status medio del settore residenziale nel Cantone. Il prodotto dell'indice MINERGIE® (60 kWh/m²·anno) per l'area di

riferimento considerata (500 m²) ha fornito 30 MWh di fabbisogno energetico annuo per il riscaldamento e l'acqua calda sanitaria: il profilo energetico mensile completo stimato è riportato nella tabella 7. Non è stata presa in considerazione una domanda estiva di raffreddamento principalmente perché in Cantone Ticino gli impianti geotermici a circuito chiuso non sono solitamente progettati per soddisfare esigenze sia di riscaldamento che di raffreddamento.

RISULTATI

Calcolo della lunghezza di scambiatori di calore necessaria

Il software EED sviluppato dalla Lund University per la modellazione di sonde geotermiche verticali è utilizzato sia per dimensionare impianti semplici che in progetti molto grandi e complessi. Esso consente di stimare la lunghezza e il layout del campo sonde ottimizzati, tramite funzioni che dipendono dalla spaziatura tra le sonde e dalla profondità. In questo lavoro, EED è stato utilizzato per simulare 128 scenari utilizzando un set fisso di parametri di sistema che rappresentano un sistema geotermico di riferimento (Tab. 7) dove alternativamente GST, λ , flusso geotermico e la capacità termica volumetrica sono stati modificati. L'intervallo dei valori per ciascun parametro rappresenta la variabilità all'interno delle aree mappate, ma sono stati presi in considerazione solo i valori più frequenti osservati

nelle zone più popolate. I valori GST da 3 a 10 °C non sono stati considerati nelle simulazioni poiché la maggior parte dei sistemi a circuito chiuso in Ticino si trova in zone in cui la GST ricade tra 11 e 14 °C, pertanto l'aggiunta di simulazioni per queste posizioni sarebbe stata ridondante. La scelta degli intervalli è stata fatta anche per accelerare i tempi di calcolo, evitando la realizzazione di migliaia di simulazioni che non avrebbero contribuito in maniera significativa all'identificazione della funzione polinomiale di regressione. La procedura descritta ha permesso di creare un buon numero di scenari risultanti in valori di lunghezza del campo sonde che possono essere messi in relazione con i valori GST e λ (precedentemente mappati nel Cap. 2). La correlazione tra la λ , GST e la lunghezza complessiva degli scambiatori è descritta da una funzione polinomiale di 2° grado (R^2 di 0.95 e RMSE di 16 m):

$$\text{Lunghezza richiesta degli scambiatori di calore} = 1236 - 269.1 * \lambda - 34.83 * \text{GST} + 34 * \lambda^2 + 2.47 * \lambda * \text{GST} \quad (6)$$

Questa regressione polinomiale è stata applicata alle mappe GST e λ al fine di ottenere una stima continua della lunghezza degli scambiatori di calore, per l'edificio di riferimento precedentemente definito. La mappa risultante della lunghezza stimata di scambiatori necessaria (Fig. 4) mostra che il potenziale è più basso dove l'altitudine è più elevata perché è fortemente influenzata dalla temperatura media annua del sottosuolo. Un potenziale più elevato si trova nelle principali valli del Cantone Ticino, a causa delle temperature annue più elevate e grazie alla presenza di acque sotterranee a bassa profondità. Queste aree sono anche interessate da restrizioni dovute alla presenza di zone di protezione delle acque sotterranee, che non consentono una diffusione completa di nuovi sistemi geotermici verticali. Le macchie bianche rappresentano il gran numero di laghi situati all'interno del Cantone Ticino: in queste zone il potenziale non è stato mappato.

Per comprendere l'affidabilità di questa mappa, la lunghezza stimata è stata confrontata con la lunghezza reale installata in Ticino per 51 sistemi verificati, installati in diversi contesti geologici e in cui la domanda di riscaldamento è prevalente. Questi GSHP sono quasi completamente situati in una porzione di territorio al di sotto dei 1'000 m di altitudine, ma sono stati osservati anche quattro sistemi installati sopra i 1'000 m. Per eseguire questo confronto, è stata eseguita la standardizzazione per la potenza di installazione e per il numero di sonde utilizzando la seguente proporzione:

$$\frac{\text{Lunghezza corretta per impianto reale} = \text{lunghezza stimata per impianto 25 kW} * \text{potenza reale installata}}{25 \text{ kW}} \quad (7)$$

Il confronto tra i valori misurati/dichiarati di m/kW e quelli stimati mostra che le installazioni con un errore stimato $\leq 10\%$ (27.4% del totale, 14 sistemi) sono localizzate in modo omogeneo all'interno del Cantone, da Nord a Sud e da Ovest a Est. 20 sistemi mostrano un

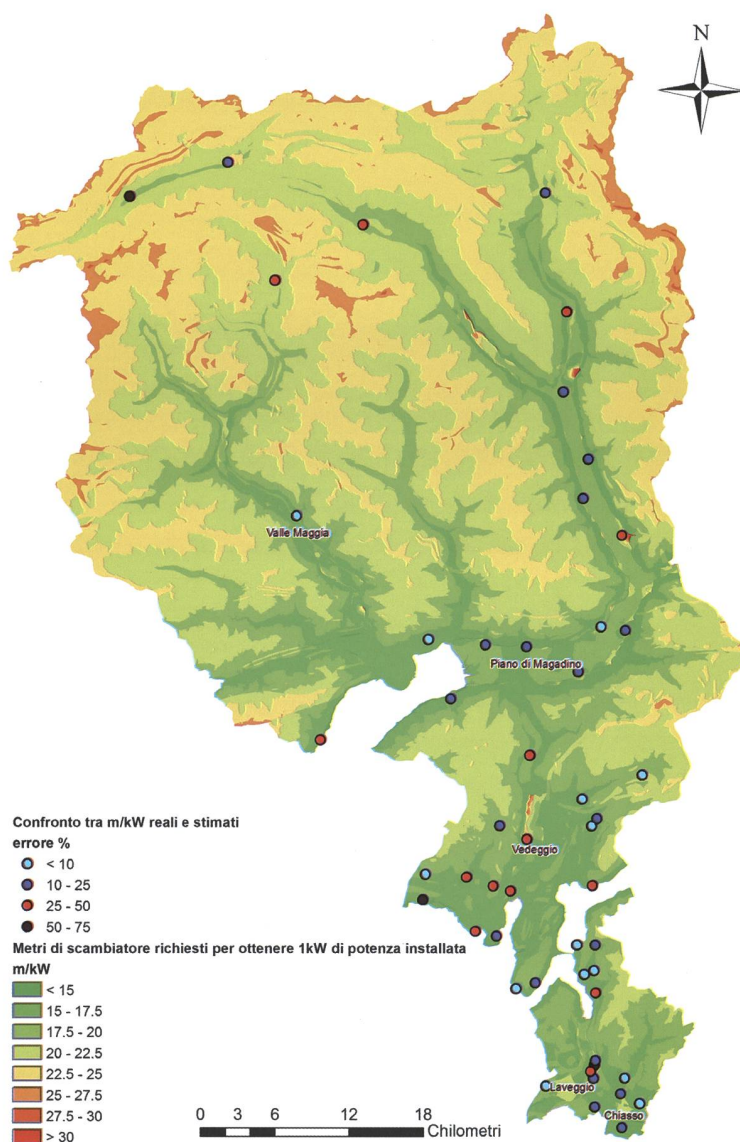


Figura 4: Carta dei metri richiesti di scambiatore di calore per ottenere 1 kW di potenza installata. I punti rappresentano i sistemi dove il dato reale è stato confrontato con il prodotto della mappatura (immagine modificata da Perego et al., 2019).

errore tra il 10 e il 25% (39.2% del totale), 14 sistemi (27.4% del totale) mostrano un errore percentuale tra 25 e 50%, mentre i restanti tre sistemi mostrano errori superiori al 50% (6% del totale).

Fondamentalmente gli stessi risultati sono stati ottenuti anche per sistemi sopra i 1'000 m di altitudine: il metodo può quindi essere considerato affidabile per diverse fasce altitudinali. I risultati mostrano che la mappa creata ha un valore semi-quantitativo a scala regionale, con un errore medio complessivo del 23% equivalente in media a ± 6 m/kW. Considerando che l'area di prova è di circa 3'000 km², i risultati possono ritenersi soddisfacenti. L'acquifero meno performante risulta essere il Laveggio, che richiede in media 18,4 m per fornire 1 kW di capacità installata, mentre l'acquifero più performante è quello di Chiasso, che richiede in media 17,4 m/kW. Questi valori devono essere considerati tenendo conto dell'incertezza della mappa m/kW stimata, che è $\pm 23\%$. Partendo da questa premessa, il potenziale stimato delle falde acquifere risulta essere

Confronto delle mappe tecno-economiche prodotte con l'attuale normativa

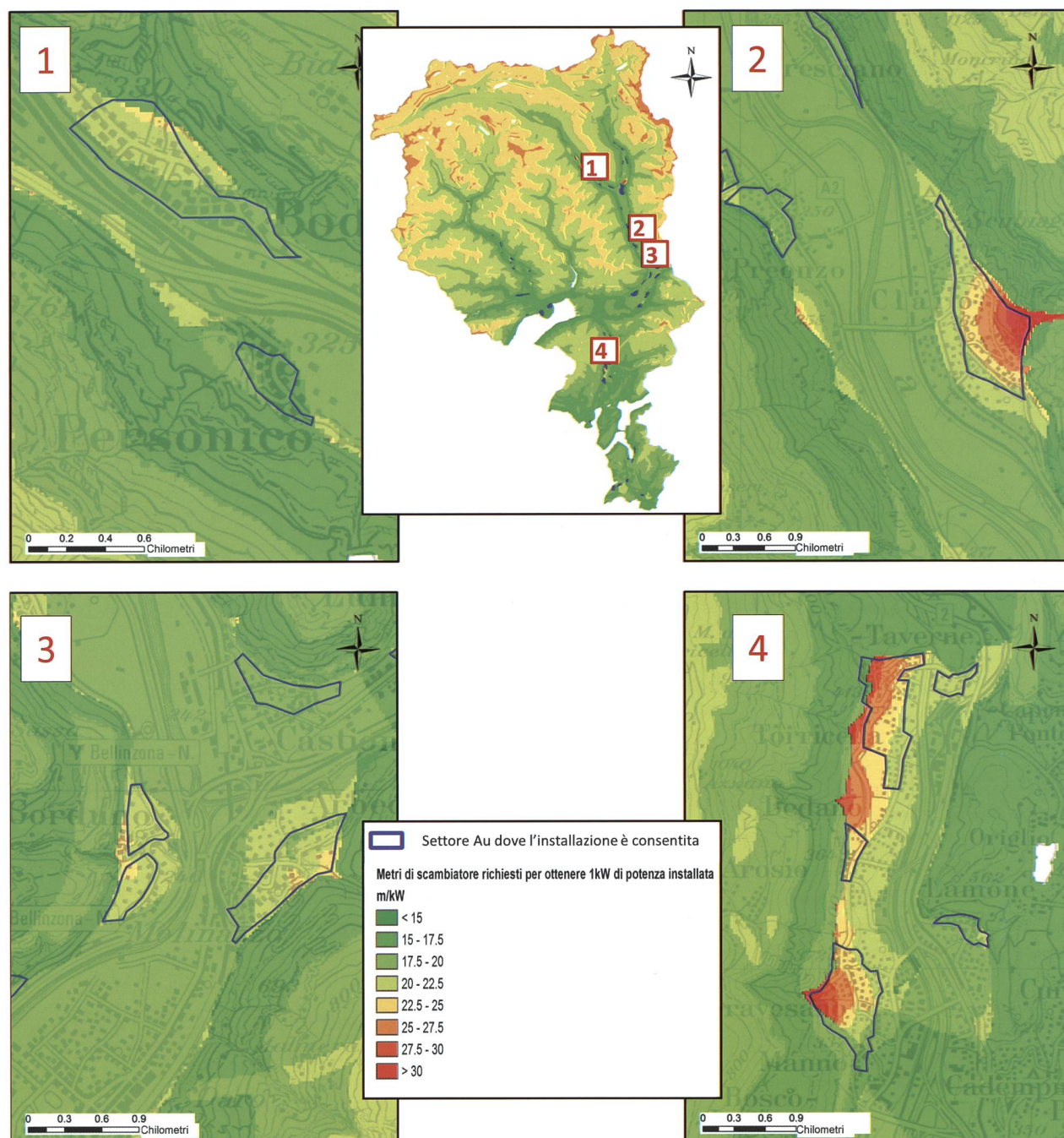


Figura 5: Confronto tra mappatura del potenziale espresso in m/kW e i settori Au (protezione delle acque sotterranee) dove l'installazione di sonde geotermiche verticali è consentita. 1) Bodio, 2) Claro, 3) Arbedo-Castione e Gorduno, 4) Manno-Taverne.

pressoché simile: si può dunque ipotizzare un'uniformità generale del potenziale di geoscambio all'interno dei principali acquiferi monitorati.

Il confronto tra la mappa m/kW e la carta normativa dei sistemi a circuito chiuso è riportato in figura 5. La figura mostra quattro diverse località da Nord a Sud scelte all'interno del Cantone Ticino: i riquadri riportano il confronto tra il potenziale stimato sotto forma di m/kW e le aree Au, soggette a protezione idrogeologica, dove i nuovi sistemi a circuito chiuso possono essere installati (contorno blu). Nel secondo e quarto riquadro (in alto a destra e in basso a destra nella figura) sono riportate due zone della parte centrale e meridionale del Cantone. La parte superiore dell'acquifero

del Vedeggio (Fig. 5, riquadro 4) presenta un potenziale geotermico molto basso, principalmente a causa della maggiore profondità delle acque sotterranee e della presenza di molti conoidi alluvionali. Ciò comporta maggiori costi di installazione e costi operativi più elevati a causa di perforazioni più profonde e minore capacità di geo-scambio. L'aspetto cruciale risulta nel fatto che le aree in cui è consentita l'installazione di sonde geotermiche verticali spesso mostrano un potenziale tecno-economico inferiore. D'altra parte, i risultati mostrano che le zone con un potenziale tecno-economico più elevato sono interessate dalla presenza di zone di protezione delle acque sotterranee, dove l'installazione di sistemi a circuito chiuso non è consentita.

Alla luce di questi risultati, è chiaramente osservabile come l'allocazione effettiva delle risorse termiche si riflette sulle prestazioni e sui costi dei sistemi. Date tutte le incertezze intrinseche a una mappatura regionale come quella proposta, l'allocazione degli impianti sembra essere non ottimizzata, evidenziando chiaramente come vi sia la necessità di miglioramenti nella gestione normativa/autorizzativa.

DISCUSSIONE

I risultati hanno mostrato che il sistema geotermico di riferimento che può soddisfare il fabbisogno di riscaldamento e acqua calda sanitaria per un edificio di 5 appartamenti di 100 m² richiederebbe una lunghezza di scambiatori di calore tra 400 e 700 m, o, se espressa come indice, tra 16 e 28 m per ogni kW di potenza termica installata (m/kW). Valori inferiori di questo indice (e quindi un potenziale più elevato) si trovano nelle principali valli: questo accade perché la temperatura media annua superficiale del terreno è maggiore e perché l'acqua sotterranea si trova a bassa profondità, con conseguente conducibilità termica dei sedimenti più elevata. La mappa m/kW è stata confrontata con 51 sistemi geotermici reali e l'errore medio è stato quantificato in 23% o ± 6 m/kW. Successivi studi potrebbero concentrarsi su una caratterizzazione idrogeologica e termica più dettagliata del sottosuolo utilizzando stratigrafie per ricostruire un modello geologico di dettaglio. Le zone dove è consentita l'installazione di nuovi sistemi geotermici verticali sono spesso i luoghi in cui si osserva un potenziale geotermico inferiore. Ciò si traduce in una gestione non ottimizzata della risorsa geotermica che può comportare un aumento dei costi, una diminuzione dell'efficienza e una potenziale perdita di attrattiva di questa energia rinnovabile. Inoltre, nei prossimi anni, si manifesterà probabilmente un forte problema di interferenza tra sistemi adiacenti, poiché i sistemi a circuito chiuso sono consentiti solo in piccole porzioni di territorio ed è riscontrato un numero stabile di nuove richieste annue. Alla luce di queste considerazioni, sarebbe opportuno consigliare una revisione dell'attuale normativa cantonale relativa all'energia geotermica superficiale e un'allocazione più adeguata della risorsa termica. Di seguito alcune potenziali soluzioni (a prescindere dalla fattibilità tecnico-economico-politica):

Ampliamento delle aree di ammissibilità: promuoverebbe l'installazione in nuove aree, ma ciò comporterebbe un aumento di nuove richieste, ponendo una seria minaccia alla qualità delle acque sotterranee (dal punto di vista chimico e termico);

Creazione di grandi sistemi geotermici superficiali che potrebbero attuare stoccaggio termico e teleriscaldamento: creando nuovi impianti geotermici superficiali in aree con elevato potenziale di geo-scambio e fornendo il calore scambiato a zone con potenziale inferiore si potrebbe ottimizzare la gestione della risorsa, dato che sarebbero necessari meno sistemi geotermici in aree a basso potenziale.

Questa soluzione potrebbe implicare l'uso di sistemi di accumulo dell'energia termica, costituiti da un gran numero di sonde geotermiche installate a breve distanza, il che è vantaggioso al fine di evitare perdite e dispersione di calore (o "freddo" in estate) all'esterno del campo sonde (Banks, 2012).

Data la complessità dei parametri in input e della procedura, i risultati della mappatura sono un buon punto di partenza per ulteriori analisi e per una migliore caratterizzazione del sottosuolo, al fine di ottenere mappe più accurate. Ciò potrebbe avvenire in futuro attraverso la raccolta e pubblicazione sistematica da parte delle agenzie di regolamentazione delle proprietà dei materiali del sottosuolo, attraverso lo sviluppo di un database facilmente accessibile e consultabile. In questo modo, i prodotti cartografici contribuirebbero a migliorare gli sforzi normativi nel tempo e potrebbero fornire un utile supporto alle aziende coinvolte nella progettazione e nella realizzazione di impianti geotermici a sonde verticali.

RINGRAZIAMENTI

Il lavoro è legato al progetto Cheap-GSHPs, che ha ricevuto finanziamenti dal programma di ricerca e innovazione HORIZON 2020 dell'Unione Europea, contratto n. 657982. Il progetto mira a ridurre i costi di installazione di impianti geotermici superficiali a circuito chiuso migliorando l'efficienza dei sistemi attraverso lo sviluppo di nuove tecnologie. SUPSI è stata coinvolta nella realizzazione di mappe multi-parametriche concernenti il potenziale geotermico superficiale a circuito chiuso, pertanto è stata necessaria la creazione di una metodologia: la progettazione e la sperimentazione della metodologia sono state eseguite sul Cantone Ticino. Il lavoro svolto dalla SUPSI nell'ambito di Cheap-GSHP non è stato direttamente finanziato dall'Unione Europea, ma è stato finanziato dalla Segreteria di Stato Svizzera per l'Istruzione, la Ricerca e l'Innovazione (SERI) tramite il contratto n° 15.0176.

BIBLIOGRAFIA

- Arola T., Eskola L., Hellen J. & Korkka-Niemi K. 2014. Mapping the low enthalpy geothermal potential of shallow Quaternary aquifers in Finland. *Geothermal Energy*, 2: 9.
- Banks D. 2012. An introduction to thermogeology: ground source heating and cooling. John Wiley & Sons. 526 pp.
- Bertermann D., Klug H. & Morper-Busch L. 2015. A pan-European planning basis for estimating the very shallow geothermal energy potentials. *Renewable energy*, 75: 335-347.
- Casasso A. & Sethi R. 2017. Assessment and mapping of the shallow geothermal potential in the province of Cuneo, Piedmont, NW Italy. *Renewable energy*, 102: 306-315.
- Consiglio Federale Svizzero 1998. Ordinanza sulla protezione delle acque (OPAc). 814.201. Berna.
- Dipartimento del territorio 2017. Rendiconto del Consiglio di Stato - Allegato statistico. Repubblica e Cantone Ticino Bellinzona 243 pp. <https://www4.ti.ch/fileadmin/CAN/TEMI/>

- RENDICONTOCDS/2017/RENDICONTO/Allegato_statistico_2017_documento_completo.pdf (ultima consultazione 16.10.2019).
- Fetter C.W. 2001. Applied hydrogeology, Prentice Hall, Upper Saddle River. 598 pp.
- Freeze R. & Cherry J. 1979. Groundwater, Englewood, New Jersey. 604 pp.
- Galgaro A., Di Sipio E., Teza G., Destro E., De Carli M., Chiesa S., Zarrella A., Emmi G. & Manzella A. 2015. Empirical modeling of maps of geo-exchange potential for shallow geothermal energy at regional scale. *Geothermics*, 57: 173-184.
- García-Gil A., Vázquez-Suñe E., Alcaraz M.M., Juan A.S., Sánchez-Navarro J.Á., Montlleó M., Rodríguez G. & Lao J. 2015. GIS-supported mapping of low-temperature geothermal potential taking groundwater flow into account. *Renewable energy*, 77: 268-278.
- Gemelli A., Mancini A. & Longhi S. 2011. GIS-based energy economic model of low temperature geothermal resources: A case study in the Italian Marche region. *Renewable energy*, 36: 2474-2483.
- GESPOS <https://geoservice.ist.supsi.ch/gespos/> (ultima consultazione 16.10.2019).
- Hellström G. & Sanner B. 2000. Earth energy designer. User's Manual, version 2.
- IDAWEB <https://gate.meteoswiss.ch/idaweb/login.do> (ultima consultazione 16.10.2019).
- Lund J. & Boyd T. 2016. Direct utilization of geothermal energy 2015: worldwide review. *Geothermics*, 60: 66-93.
- Luo J., Tuo J., Huang W., Zhu Y., Jiao Y., Xiang W. & Rohn J. 2018. Influence of groundwater levels on effective thermal conductivity of the ground and heat transfer rate of borehole heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 128: 508-516.
- MINERGIE® <https://www.minergie.ch> (ultima consultazione 16.10.2019). Berna.
- Perego R., Guandalini R., Fumagalli L., Aghib F.S., De Biase L. & Bonomi T. 2016 Sustainability evaluation of a medium scale GSHP system in a layered alluvial setting using 3D modeling suite. *Geothermics*, 59: 14-26.
- Perego R., Pera S. & Galgaro, A. 2019. Techno-economic mapping for the improvement of shallow geothermal management in Southern Switzerland. *Energies*, 12: 279.
- Repubblica e Cantone Ticino 2013. Piano Energetico Cantonale (PEC). Piano d'azione. Bellinzona.
- Schiel K., Baume O., Caruso G. & Leopold U. 2016. GIS-based modelling of shallow geothermal energy potential for CO₂ emission mitigation in urban areas. *Renewable energy* 86: 1023-1036.
- SIA 2010. Sondes géothermiques. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein 384/6, Zurigo.
- Signorelli S. & Kohl T. 2004. Regional ground surface temperature mapping from meteorological data. *Global and Planetary Change* 40: 267-284.
- Soma L. 2015. Interplay between opposite vergence thrusts along the Southern Alps margin in Canton Ticino (Switzerland): geometry and kinematics in support of the characterization of geothermal potential. Tesi di dottorato. Università di Pavia.
- USTAT 2018. Energia panoramica del tema, Ufficio cantonale di statistica <https://www3.ti.ch/DFE/DR/USTAT/index.php?fuseaction=temi.tema&proId=43&p1=44> (ultima consultazione 16.10.2019).
- UFAM 2009. Exploitation de la chaleur tirée du sol et du sous-sol. Aide à l'exécution destinée aux autorités d'exécution et aux spécialistes de géothermie. L'environnement pratique n. 0910. Ufficio federale dell'ambiente, Berna, 51 pp. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/eaux/publications/publications-eaux/exploitation-chaleur-tiree-sol-sous-sol.html> (ultima consultazione 16.10.2019).
- UFAM 2016. Fattori di emissione di CO₂ secondo l'inventario svizzero dei gas serra. Scheda informativa. Ufficio federale dell'ambiente, Berna.

