Capitolo 1

Introduzione

L'energia geotermica è l'energia generata per mezzo di fonti geologiche di calore e rientra nelle forme di energia alternativa e rinnovabile: prevede, infatti, lo sfruttamento del calore naturale della Terra (gradiente geotermico) dovuto all'energia termica rilasciata dai processi di decadimento nucleare naturale degli elementi radioattivi quali l'uranio, il torio e il potassio, contenuti naturalmente all'interno della Terra (nucleo, mantello e crosta terrestre).

Il più comune criterio di classificazione delle risorse geotermiche si basa sull'entalpia dei fluidi, i quali trasferiscono il calore dalle rocce calde profonde alla superficie.

All'interno del campo delle applicazioni geotermiche a bassa entalpia, negli ultimi anni ha avuto un sempre maggior sviluppo l'idea di accoppiare alla funzione strutturale delle fondazioni e opere in sotterraneo la possibilità di sfruttare le risorse geotermiche: pali di fondazione, diaframmi e tunnel sono solo alcuni esempi di strutture sotterranee che offrono grandi potenzialità termiche.

A partire dagli anni '80, soprattutto nei paesi centro europei quali Austria, Germania e Svizzera, il numero di strutture così realizzate è aumentato esponenzialmente grazie alla semplicità ed economicità di realizzazione delle strutture energetiche. Questa tecnologia prevede, infatti, l'annegamento all'interno del calcestruzzo di un circuito idraulico che permetta la realizzazione dello scambio termico e accoppiando questo sistema a pompe di calore, è possibile fornire riscaldamento invernale e condizionamento estivo agli edifici di superficie, mentre

l'utilizzo diretto del calore a bassa temperatura trova applicazione nel mantenere strade e marciapiedi liberi da ghiaccio e neve.

In quest'ottica il terreno rappresenta un serbatoio da cui prelevare o in cui depositare energia termica e da qui nasce la necessità di andare ad individuare le aree che risultano essere maggiormente favorevoli all'installazione di scambiatori di calore per lo sfruttamento della risorsa geotermica.

Nel corso degli anni numerosi sono stati gli autori che si sono occupati di enunciare teorie per la determinazione del potenziale geotermico di numerose aree di studio basandosi su dati raccolti in situ e formulando espressioni analitiche per il calcolo.

Lo scopo principale del presente lavoro di tesi è quello di analizzare i risultati ottenuti dall'applicazione del metodo G.POT, formulato da Casasso & Sethi (2016), valutando i risultati ottenuti su un'area della Città Metropolitana di Torino comprendente il grattacielo Intesa San Paolo e il Palazzo dell'Area Metropolitana di Torino.

Nel secondo capitolo di questa tesi verranno introdotti i concetti base della geotermia, facendo una panoramica su quelli che sono i vari sistemi geotermici e la loro classificazione. Successivamente verranno descritte le varie tipologie di impianti geotermici utilizzati principalmente per il condizionamento e raffrescamento della singola abitazione e le diverse strutture geotecniche che possono essere sfruttate geotermicamente, le cosiddette *geostrutture energetiche*.

Nel terzo capitolo viene focalizzata l'attenzione sulle diverse metodologie che sono state sviluppate negli anni per il calcolo del potenziale geotermico, tra cui anche il metodo G.POT.

Nel capitolo 4 viene inquadrata l'area di studio dal punto di vista idrogeologico e viene applicato il metodo G.POT all'area di interesse.

Nel capitolo 5 verrà descritto il software utilizzato, e in dettaglio la costruzione del modello rappresentativo delle condizioni in sito.

In questo capitolo verranno analizzati i risultati ottenuti dalla modellazione numerica dell'area di studio con il software di calcolo FEFLOW dove verranno attivati termicamente un BHE (*Borehole Heat Exchangers*) e gli impianti già presenti nell'area del grattacielo Intesa San Paolo e del Palazzo dell'Area Metropolitana di Torino.

L'obiettivo di tale lavoro risulta quindi quello di studiare come i valori ottenuti di potenziale geotermica in condizione di terreno naturale vengano influenzati dall'interferenza di nuovi scambiatori e impianti geotermici già esistenti.

Infine, verranno tratte le conclusioni a cui si è giunti al termine del lavoro con osservazioni generali sui risultati ottenuti.

Capitolo 2

La Geotermia

2.1 Premessa

La Geotermia, dal greco "*geo*" (terra) e "*termia*" (calore), è la disciplina che studia l'insieme dei fenomeni naturali che permettono di sfruttare il calore proveniente dall'interno della terra. Oltre il 99% del calore terrestre supera infatti i 1000°C e solo i 3 km più superficiali presentano una temperatura inferiore a 100°C.

L'origine di questa energia è stata attribuita principalmente al calore primordiale del pianeta e al calore *radiogenetico* generato dal decadimento radioattivo di elementi come uranio, torio e potassio presenti nella crosta terrestre.

Fino a 15-20 m di profondità, la temperatura della crosta può essere influenzata dalle variazioni climatiche stagionali, al di sotto si riscontra una zona dove la temperatura si mantiene costante tutto l'anno per effetto del bilanciamento tra il flusso di calore che proviene dal nucleo e dal mantello terrestre, gli apporti di energia solare alla superficie terrestre e, talvolta, ma non necessariamente, il contributo dell'energia apportata dalle acque sotterranee.

In *figura 1* è riportato un esempio dell'andamento di vari profili di temperatura in funzione della profondità e si può notare come, sebbene in prossimità della superficie l'andamento di questi profili risulta essere molto diverso a seconda delle stagioni, ad una profondità di circa 15 m la temperatura si assesta su valori costanti.

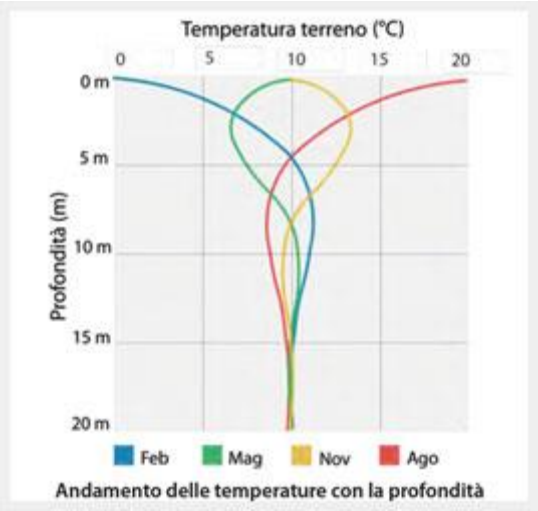

Figura 1 - Profili della temperatura del terreno in funzione della profondità (www.unienergia.it)

Procedendo con la profondità, però, il valore di temperatura aumenta e grazie al *gradiente geotermico* è possibile quantificare questo incremento. Il valore medio è uguale a 2,5°-3°C/100 m per cui pensando che la temperatura nei primi metri sotto la superficie, corrisponda, con buona approssimazione, alla temperatura media annua dell'aria esterna, ovvero 15°C (valore medio globale), si può prevedere che la temperatura sarà di 65°-75°C a 2000 m di profondità, 90°-105°C a 3000 m e via di seguito per alcune migliaia di metri.

Questo calore terrestre si dissipa con continuità verso la superficie della Terra, ma i suoi effetti sono in generale poco percettibili. Non è distribuito, però, in maniera uniforme poiché esistono delle aree di discontinuità della crosta terrestre, come ad esempio le dorsali oceaniche o i margini delle placche continentali, che permettono l'affioramento di masse magmatiche determinando così l'incremento della temperatura in determinate zone chiamate giacimenti. In queste zone il gradiente geotermico può essere anche 10-15 volte superiore quello medio (3°C/100m). Questo però, è valido solo per quanto riguarda la crosta terrestre, nel resto del globo l'aumento di temperatura con la profondità è sensibilmente minore.

In particolare nel mantello e nel nucleo esterno il gradiente geotermico segue un andamento di tipo adiabatico, e si attesta su valori medi rispettivamente di 0,3 °C/km e 0,8 °C/km.

Con il termine "energia geotermica" si intende quella parte di calore terrestre immagazzinato nel sottosuolo e che può essere estratto per trovare impiego

nell'infinita gamma di attività umane in cui sia richiesto l'uso del calore come fonte di energia alternativa, grazie alla ridotta produzione di CO2 (la produzione geotermica di calore nel 2015 rimpiazza oltre 52 milioni di tonnellate di petrolio e riduce l'emissione di CO_2 nell'atmosfera di 148 milioni di tonnellate), e rinnovabile dato che il potenziale teorico del calore terrestre è potenzialmente inesauribile.

Lo sfruttamento di questa risorsa avviene secondo due metodologie differenti. Utilizzando principalmente fluidi a bassa temperatura è possibile, tramite pompe di calore (PDC), produrre energia termica da utilizzare per la produzione di acqua calda sanitaria e per il riscaldamento di edifici; mentre l'energia elettrica viene prodotta utilizzando apposite turbine che sfruttano i vapori prodotti da fluidi ad alte temperature.

Non è un caso quindi che, a livello mondiale, l'impiego dell'energia geotermica stia crescendo vertiginosamente grazie anche alla possibilità di produrre energia elettrica e calore geotermico 24 ore su 24 indipendentemente dalle condizioni meteorologiche e all'indipendenza degli impianti che non necessitano di materie prime energetiche provenienti dall'estero.

2.2 Risorse Geotermiche

Come già detto, esiste una differenza di temperatura tra le zone profonde, più calde, e quelle superficiali, più fredde, che porta all'innescarsi di un flusso di calore dall'interno verso l'esterno della Terra al fine di stabilire condizioni di uniformità.

Sono state eseguite 24.774 misure su oltre 20.000 siti al fine di valutare un *flusso di calore terrestre* medio pari a 65 mWm^{-2} nelle aree continentali e 101 mWm^{-2} nelle aree oceaniche, con una media ponderale globale di 87 mWm^{-2} (*Pollack* et al*., 1993*). Questi valori coprono circa il 62% della superficie terrestre e nelle aree non coperte da misure, il flusso di calore terrestre è stato stimato tenendo conto della distribuzione delle unità geologiche.

Il nostro pianeta, come mostrato in *figura 2*, è formato dalla *crosta*, che ha uno spessore di circa 20-65 km nelle aree continentali e 5-6 km in quelle oceaniche, dal *mantello*, spesso approssimativamente 2900 km, e dal *nucleo*, che ha un raggio di circa 3470 km.

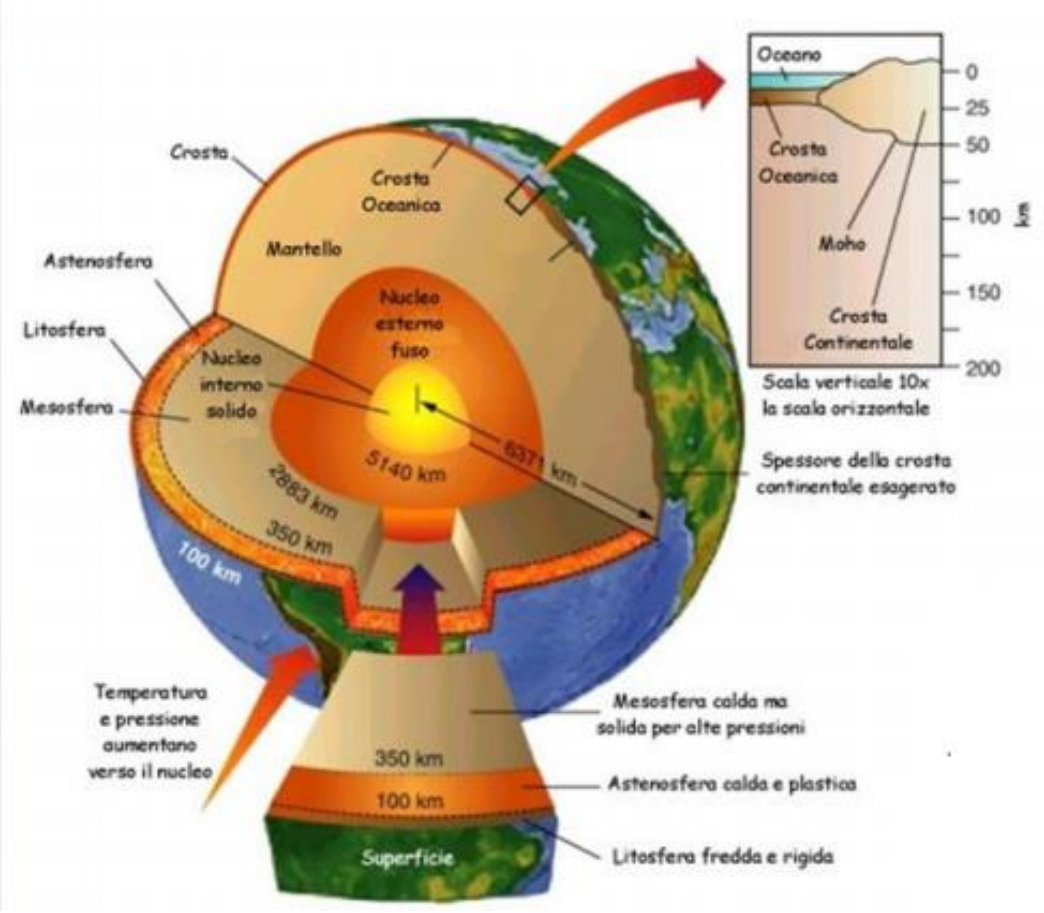

Figura 2 - Struttura interna della Terra (www.planetariumpythagoras.com)

Le proprietà fisiche e chimiche di crosta, mantello e nucleo variano andando dalla superficie verso l'interno della Terra. L'involucro esterno del globo, che prende il nome di *litosfera*, è formato dalla crosta e dalla parte più esterna del mantello. La litosfera, che ha uno spessore che va da meno di 80 km nelle aree oceaniche a più di 200 km in quelle continentali, si comporta come un corpo rigido.

Sotto la litosfera si trova l'*astenosfera*, formata dalla parte alta del mantello, che, rispetto alla prima, ha un comportamento "meno rigido" o "più plastico" simile a quello di un fluido viscoso.

Le differenze di temperatura tra le diverse parti dell'astenosfera hanno prodotto moti convettivi nei materiali che la costituiscono, e il loro lentissimo movimento (pochi centimetri l'anno) è sostenuto dal calore prodotto in continuazione dal decadimento degli isotopi radioattivi e da quello che proviene dalle parti profonde del pianeta. Quello che accade è che enormi volumi di rocce profonde, allo stato fuso o semifuso, più calde, meno dense e più leggere dei materiali sovrastanti, risalgono

verso la superficie, mentre le rocce più vicine alla superficie, più fredde, più dense e più pesanti, tendono a scendere per riscaldarsi e risalire di nuovo. La quantità totale di calore contenuto nel nostro pianeta è calcolata essere di 12.6 x 10 alla 24 MJ mentre quello nella crosta terrestre è stimato sui 5,4 x 10 alla 21 MJ (Dickson e Fanelli, 2004): un valore enorme, 10 alla 8 volte (cioè cento milioni di volte) la generazione mondiale di elettricità nel 2005.

Quando si parla genericamente di risorse geotermiche, di solito ci si riferisce a quelle che più precisamente dovrebbero essere chiamate *risorse di base accessibili*, intendendo con questo termine tutta l'energia termica contenuta tra la superficie terrestre ed una determinata profondità, in un'area definita e misurata partendo dalla temperatura media annua locale (Muffler e Cataldi, 1978). Le risorse di base accessibili comprendono le *risorse di base accessibili utili* , ovvero quella parte delle risorse di base accessibili che potrebbe essere estratta, economicamente in accordo con la legislazione locale, entro un periodo di tempo definito (meno di 100 anni).

Per la classificazione delle risorse geotermiche bisogna far riferimento all'entalpia dei fluidi, che trasferiscono il calore dalle rocce calde profonde alla superficie. L'entalpia serve ad esprimere il contenuto termico (energia termica) dei fluidi e può essere considerata più o meno proporzionale alla temperatura; essa permette di avere una suddivisione delle risorse in bassa, media ed alta entalpia (o temperatura), secondo diversi criteri come mostrato in *tabella 1*.

Tabella 1- Classificazione delle risorse geotermiche in base alla temperatura

Classificazione delle risorse geotermiche in base alla temperatura (°C)				
	(a)	(b)	(c)	(d)
Risorse a bassa entalpia	<90	<125	<100	≤150
Risorse a media entalpia	90-150	125-225	100-200	*
Risorse ad alta entalpia	>150	>225	>200	>150
a) Muffler e Cataldi, 1978				
b) Hochstein, 1990				
c) Benderitter e Cormy, 1990				
d) Nicholson, 1993				

Quando si parla di fluidi geotermici è bene, comunque, indicare la loro temperatura, o almeno un intervallo di temperatura, perché i termini bassa, media o alta possono avere significati diversi e creare errori di interpretazione.

Le risorse geotermiche si distinguono quindi in:

- risorse geotermiche ad alta entalpia (T > 150°C), impiegate negli usi indiretti del calore tramite impiego di fluidi geotermici nei cicli di produzione di energia elettrica;

- risorse geotermiche a media entalpia (90°C< T <150°C) per cui si hanno sia impieghi diretti che indiretti, quest' ultimi tramite sistemi a ciclo binario atti a produrre energia elettrica, dove il fluido geotermico viene utilizzato per vaporizzare un fluido di lavoro, solitamente organico (es. isopentano), con basso punto di ebollizione ed elevata pressione di vapore a bassa temperatura;

- risorse geotermiche a bassa entalpia (T< 90°C), impiegate negli usi diretti del calore sia per i comuni usi terapeutici, termali e balneari, che per agricoltura, itticoltura, processi industriali, riscaldamento e raffrescamento di ambienti tramite pompe di calore.

2.3 Sistemi Geotermici

Un sistema geotermico (*figura 3*) è generalmente definito come "*un sistema fluido convettivo, che, in uno spazio confinato nella parte superiore della crosta terrestre, trasporta il calore dalla sorgente termica, al luogo, generalmente la superficie, dove il calore stesso è assorbito (disperso o utilizzato)"* (Hochstein,1990).

Attraverso le rocce del sottosuolo il calore può propagarsi per conduzione o per convezione, mentre la propagazione per irradiamento è praticamente trascurabile, e questo determina una prima suddivisione del sistemi geotermici in *convettivi* e *conduttivi*: nei primi la trasmissione del calore verso gli strati superficiali è resa possibile dalla presenza di acqua, nei secondi invece manca il vettore che trasporta il calore contenuto nelle rocce.

Per essere tale, in un sistema geotermico è necessario distinguere una *fonte di calore*, una *roccia serbatoio*, una *roccia di copertura* e un *fluido* (acqua o vapore), naturale o iniettato, necessario al trasporto del calore stesso.

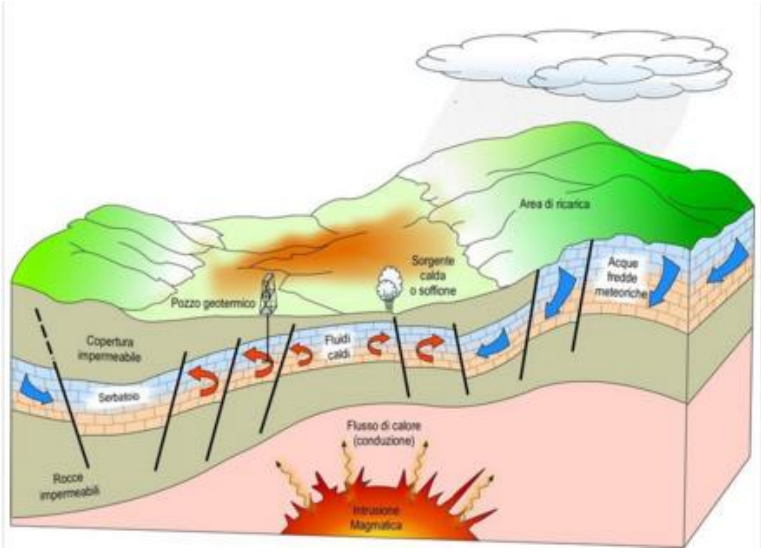

Figura 3 - Rappresentazione schematica di un sistema geotermico (www.unionegeotermica.it)

La fonte di calore è localizzata in zone che presentano una temperatura intorno ai 700°C dovuta ad esempio alla presenza di magma a profondità modeste (dell'ordine di 5-10 km) o nelle regioni prossime ai margini delle zolle crostali, ma anche in zone che presentano un gradiente geotermico normale o poco più alto.

Nel primo caso si può raggiungere una vasta gamma di temperature, da basse sino ad oltre 400°C, mentre nel secondo caso si hanno temperature che non superano i 100°C a profondità economicamente utili. Le rocce serbatoio sono parti del sottosuolo formate da rocce porose e permeabili dove possono fluire quantità di fluidi e assorbire calore. Queste rocce sono generalmente ricoperte da rocce impermeabili che limitano la dispersione di fluidi, infatti in condizioni ottimali in questi serbatoi, oltre all'acqua in fase liquida, può essere contenuta la fase vapore che ovviamente presenta un contenuto energetico più elevato.

L'alimentazione del sistema è generalmente rappresentata da acque meteoriche che attraverso rocce permeabili penetrano nel sottosuolo e vengono riscaldate dal calore contenuto nel sottosuolo raggiungendo temperature anche di alcune centinaia di gradi. A questo punto il fluido può risalire in superficie attraverso vie naturali, come faglie e fratture, o artificialmente tramite l'impiego di pozzi geotermici da cui poi verrà inviato agli impianti di utilizzazione.

Usualmente i sistemi geotermici vengono classificati in 5 gruppi:

- *Sistemi idrotermali*, i quali attualmente sono gli unici ad essere sfruttati a livello industriale, sia nella produzione di energia elettrica che negli impieghi diretti. Sono costituiti dai serbatoi geotermici che contengono acqua sia in fase liquida che di vapore (a seconda delle condizioni di pressione e temperatura), ricoperti da rocce impermeabili. Tra i sistemi idrotermali si possono distinguere a loro volta i sistemi "acqua dominante" e i sistemi "vapore dominante". Nei primi l'acqua liquida è la fase continua, che controlla la pressione mentre il vapore può essere presente in forma di bolle e sono i più diffusi al mondo. Nei secondi è il vapore la fase continua che controlla la pressione e coesiste nel serbatoio con acqua liquida e risultano essere i migliori per la produzione di energia elettrica anche se sistemi geotermici di questo tipo sono piuttosto rari.
- *Sistemi ad acqua calda,* i quali contengono acqua a temperatura inferiore ai 100° C (50-82° C) utilizzabile soprattutto per usi diretti (riscaldamento delle abitazioni, delle serre, impianti industriali).
- *Sistemi geopressurizzati*, sistemi che contengono acqua a temperature maggiori rispetto a quelli idrotermali e con pressioni superiori di quella idrostatica che gli competerebbe a causa della loro profondità; sono quindi sistemi ad elevata temperatura e pressione e possono produrre energia geotermica, meccanica, chimica anche se non si è provveduto ancora ad uno sfruttamento di tali sistemi.
- *Sistemi a rocce calde secche (Hot Dry Rock),* ovvero rocce in cui non è presente la circolazione di fluidi in quanto impermeabili e che essendo caratterizzate da elevata termalità (temperature comprese fra i 200°C e i 350°C), è possibile sfruttare tramite la fratturazione artificiale e la circolazione forzata del fluido.
- *Sistemi magmatici,* in cui artificialmente si vuole sfruttare il calore diretto di un magma con temperature che vanno dai 600°C ai 1400°C per riscaldare un fluido di lavoro.

2.4 Cenni storici

Il rapporto delle antiche popolazioni italiche con le manifestazioni del calore terrestre risale al Neolitico medio-superiore (4°-3° millennio a.C.), periodo nel quale viene praticato l'uso "termale" delle acque geotermiche in tutte quelle regioni dove sono presenti manifestazioni naturali di fluidi caldi (sorgenti, laghetti, geyser, etc…).

Lo sviluppo nella forma balneo-sanitaria assume forme evolute già nell'Età del Bronzo (2° millennio a.C.), quando vengono erette strutture organizzate con ambienti termicamente differenziati, ma l'apice di diffusione viene raggiunto nel 3° secolo d.C. durante il periodo di massimo splendore dell'Impero di Roma.

Dopo la caduta dell'Impero di Roma, il termalismo e l'uso dei sottoprodotti dell'energia geotermica subiscono in Italia un forte declino per tutta la parte iniziale del Medio Evo (500-1000 d.C.), ma hanno una certa ripresa nei primi secoli dopo l'anno mille, sia in Toscana che in alcune delle altre aree geotermiche italiane. A partire poi dal 1400 circa la pratica della balneoterapia in alcune delle principali stazioni termali d'Italia e l'uso in certi luoghi di minerali idrotermali ed altri sottoprodotti del calore terrestre presenta una nuova fioritura che, pur non arrivando mai al livello raggiunto al tempo di Roma, acquisisce però localmente una significativa importanza sul piano commerciale e sociale.

La nuova fioritura si verificò in particolare in Toscana, nella zona dove nascerà Larderello, dove Uberto Hoefer, chimico austriaco del granducato di Toscana, nel 1777 scopre l'acido borico e nel 1779 il naturalista Paolo Mascagni escogita un metodo per estrarlo industrialmente dalle acque geotermiche, ma è solo nel 1827 che Francesco Lardarel, proprietario di una industria di estrazione dell'acido borico, idea un sistema per sfruttare il calore dei fluidi borici derivanti dall'evaporazione piuttosto che legname da bruciare, che si andava esaurendo rapidamente, brevettando così il primo vero utilizzo in forma diretta dell'energia geotermica. Nello stesso periodo si comincia a sfruttare il vapore a bassa pressione per il riscaldamento di edifici residenziali e industriali.

La nascita della termoelettricità è attribuita al principe Piero Ginori Conti (*figura 4*), il quale nel 1904 a Larderello riesce ad accendere 5 lampade utilizzando una dinamo azionata da una macchina a vapore da 0,75 CV alimentata da un "soffione geotermico".

Figura 4 - Larderello 1904. La prima macchina (un motore alternativo accoppiato ad una dinamo), che ha prodotto elettricità sfruttando il vapore geotermico. A fianco, il Principe Piero Ginori Conti, succeduto a Francesco Larderel nella proprietà dell'industria boracifera. (www.unionegeotermica.it)

E' nel 1913 che inizia, sempre a Lardarello, la generazione di elettricità dal vapore geotermico a livello *commerciale* con una potenza installata di 250 kWe e per circa 50 anni l'Italia rimane l'unico paese del mondo a sfruttare il calore geotermico per la produzione di energia elettrica.

Ma a seguito dell'esperienza italiana, altri paesi decidono di esplorare il campo geotermico avviando programmi di generazione elettrica.

E' nel decennio successivo che lo sviluppo della produzione geotermoelettrica si allarga ad una più vasta platea di paesi, fino ad interessare nazioni appartenenti ai quattro continenti come USA, Giappone, Messico e Nuova Zelanda raggiungendo una potenza installata, valutata nel 2007, superiore ai 9730 MWe.

2.5 Situazione attuale

Attualmente l'utilizzo dell'energia geotermica riguarda un totale di 82 paesi facendo registrare un aumento rispetto ai 78 segnalati nel 2010, i 72 segnalati nel 2005, i 58 segnalati nel 2000 e i 28 nel 2005.

La potenza termica installata per un utilizzo diretto alla fine del 2014 risulta essere pari a 70.885 MWt, con un aumento del 46,2% rispetto ai dati del 2010 quindi una crescita del 7,9% all'anno.

L'energia termica utilizzata, invece, raggiunge valori pari a 592.638 TJ/anno, ovvero 164.635 GWh/anno), valore incrementato del 39,8% rispetto al 2010, ovvero il 6,9% annuo. Questi valori sono riportati in *tabella 2*.

Tabella 2 - Riassunto dei dati sull'uso diretto in tutto il mondo per regione e continente (J.W. Lund & T.L.Boyd, 2015)

Region/Continent (# countries/regions)	MWT	TJ/year	GWH/year	Capacity factor
Africa (8)	140	2,538	705	0.575
Americas (16)	19,610	99,899	27,752	0.162
Central America and Caribbean (5)	9	181	50	0.634
North America (4)	19,031	91,442	25,403	0.152
South America (7)	570	8,276	2,299	0.460
Asia (18)	25,369	260,198	72,283	0.325
Commonwealth of Independent States (5)	399	7,094	1,971	0.564
Europe (32)	24,863	214,093	59,475	0.273
Central and Eastern Europe (15)	2,819	26,220	7,284	0.295
Western and Northern Europe (17)	22,044	187,873	52,191	0.270
Oceania (3)	504	8,816	2,449	0.555
Total (82)	70,885	592,638	164,635	0.265

Tuttavia, andando ad analizzare i dati in termini di superficie o popolazione, emerge che sono i paesi nordici che presentano i risultati più rilevanti, considerando la grande quantità di risorse geotermiche presente in questi territori.

La distribuzione di energia termica utilizzata per categoria, mostrata in *figura 5* e *figura 6*, è pari a circa il 55,2 % per impianti GSHP (*Ground Source Heat Pumps*), 20,2 % per la balneazione e il nuoto (compresa la balneologia), 15% per il riscaldamento degli ambienti (del quale l' 89% è per il teleriscaldamento), 4,9% per le serre e il riscaldamento a pavimento aperto, 2% per il riscaldamento di acquacoltura e canalizzazione , 1,8% per il riscaldamento nei processi industriali, 0,4% per sciogliere la neve, 0,3% per l'essiccazione agricola e 0,2% per altri usi.

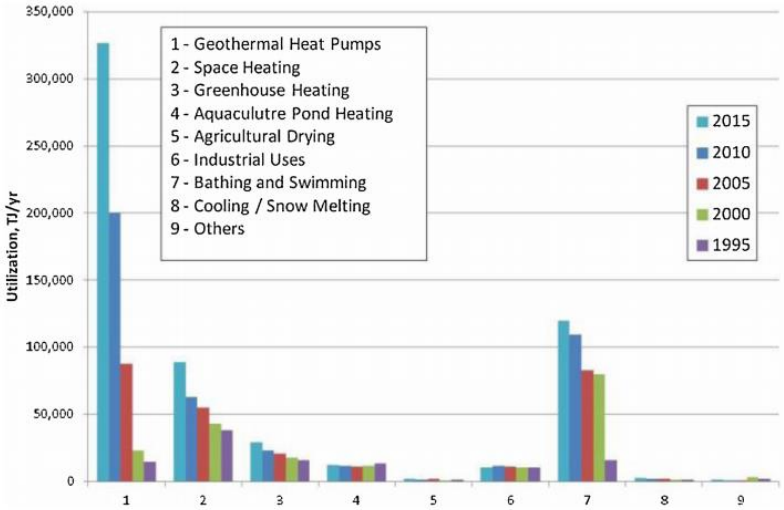

Figura 5 - Comparazione dell'energia geotermica di uso diretto a livello mondiale in TJ / anno valutata nel 1995, 2000, 2005 e 2010 (J.W. Lund & T.L.Boyd, 2015)

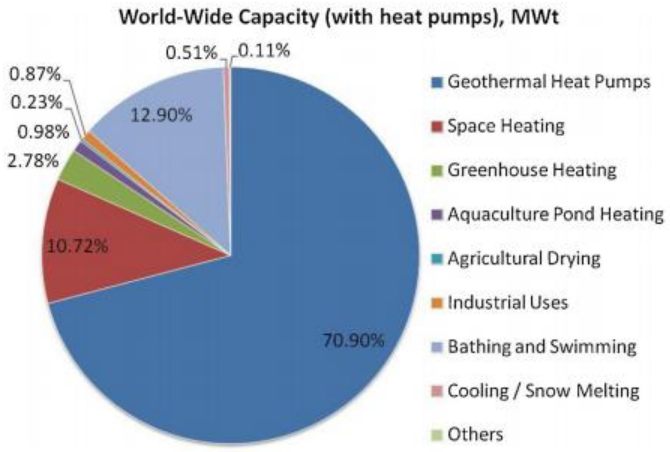

Figura 6 - Applicazioni geotermiche dirette in tutto il mondo nel 2015, distribuite in base alla percentuale della capacità installata totale (MWt) (J.W. Lund & T.L.Boyd, 2015)

2.6 Utilizzi

I settori di impiego dell'energia geotermica sono funzione del potenziale termico del particolare serbatoio considerato. L'energia termica del vapore o dell'acqua calda in pressione può essere usata per la produzione di energia elettrica, che può essere trasportata a notevoli distanze, o impiegata per usi non elettrici come per il riscaldamento degli edifici, di serre, in processi industriali e permette un uso economicamente vantaggioso soprattutto se la risorsa è relativamente vicina agli impianti di utilizzazione (qualche chilometro).

L'utilizzo diretto per la produzione di energia elettrica e calore è garantito dalle risorse a media o alta entalpia, mentre per le risorse a bassa entalpia è impensabile la produzione di energia elettrica date le basse temperature raggiunte.

Le risorse a bassa entalpia risultano comunque vantaggiose essendo ampiamente diffuse, facilmente accessibili e particolarmente abbondanti e vengono utilizzate generalmente in settori quali:

- Teleriscaldamento
- Riscaldamento e/o raffreddamento domestico
- Usi agro-alimentari
- Usi industriali
- Balneologia

2.6.1 Usi agro-alimentari

I fluidi che presentano basse temperature al di sotto dei 100 °C, sono ampiamente diffusi per scopi agricoli, in quanto permettono la coltivazione di vegetali e l'allevamento di animali e pesci. Vengono inoltre impiegati per il riscaldamento del suolo all'aperto e delle serre, poiché riscaldando il terreno con acqua calda, sul suolo a cielo aperto si crea un microclima favorevole allo sviluppo delle piante. Nel caso delle serre, invece, l'acqua calda circola in tubi di polietilene sepolti per il riscaldamento del suolo ed attraverso aeratori per il riscaldamento dell'aria.

I tubi nel terreno possono essere connessi in serie, con la possibilità di avere temperature differenti in diverse parti del suolo, oppure in parallelo ed in tal caso si ha la stessa temperatura ovunque.

L'uso dell'energia geotermica per il riscaldamento delle serre permette di ridurre significativamente i costi operativi, che in alcuni casi arrivano anche al 35% del costo dei prodotti.

2.6.2 Usi industriali

L'energia geotermica trova impiego anche nel settore industriale, in cui viene impiegata in particolare nei processi di produzione a caldo, come ad esempio l'essicazione della Diatomite, roccia di origine organica che grazie alle sue caratteristiche viene utilizzata come inerte nella dinamite.

Altri utilizzi a livello industriale riguardano tutti quei processi di evaporazione, estrazione di sostanze chimiche e decongelamento.

2.6.3 Balneoterapia

I bagni termali rappresentano, come già detto, la forma più antica di sfruttamento dell'energia geotermica. Le sorgenti di acqua calda che arrivano in superficie esercitano un'azione curativa grazie alla loro composizione.

2.6.4 Condizionamento di ambienti

Nell'utilizzo diretto dell'energia geotermica si sfrutta il calore direttamente prodotto dal sottosuolo, attraverso i processi di cogenerazione geotermica (generazione congiunta di elettricità e calore) oppure l'acqua proveniente da aree dove il terreno è caldo (zone vulcaniche o termali). Si tratta in questo secondo caso di geotermia superficiale ("*shallow*").

La possibilità di produrre, oltre che acqua calda per il riscaldamento invernale e per gli usi sanitari, anche acqua fredda per raffrescare durante l'estate, rende gli impianti geotermici l'alternativa ideale ai tradizionali impianti. Il grande vantaggio deriva dal fatto che un sistema geotermico racchiude in unico impianto le stesse funzioni normalmente richieste a due diversi apparecchi, cioè caldaie e condizionatori.

Un impianto geotermico, se opportunamente dimensionato, è in grado di riscaldare e raffrescare un edificio senza l'ausilio di altri apparecchi.

I 3 elementi fondamentali di un impianto geotermico (*figura 7*) sono:

1. *sistema di captazione del calore* → Di norma si tratta di tubature in polietilene che fungono da scambiatori di calore, sfruttando l'energia termica presente nel sottosuolo o nell'acqua. Le tubature possono essere interrate verticalmente nel terreno a grandi profondità (sonde geotermiche verticali), oppure orizzontalmente a 1-2 metri di profondità (sonde o collettori orizzontali). Anche l'utilizzo dell'acqua, come sorgente di calore in alternativa al terreno, comporta l'utilizzo di sonde verticali.

E' proprio la scelta del sistema di captazione, a seconda anche dalle caratteristiche geologiche e climatiche del luogo scelto per l'installazione, a caratterizzare le diverse opzioni impiantistiche dei sistemi geotermici.

2. *pompa di calore geotermica* → Installata all'interno degli edifici, la pompa di calore geotermica è il cuore dell'impianto. Consente infatti di prelevare calore dalla sorgente a T più bassa, il terreno o l'acqua, e trasferirlo all'ambiente interno, a T più alta, in fase di riscaldamento. Inoltre il ciclo può essere invertito nella fase di raffreddamento.

3. *sistema di accumulo e distribuzione del calore* → Gli impianti geotermici sono particolarmente adatti per lavorare con terminali di riscaldamento/raffrescamento funzionanti a basse temperature (30-50°C). La presenza di un serbatoio di accumulo per l'acqua calda risulta indispensabile per immagazzinare il calore e quindi distribuirlo all'edificio –per il riscaldamento e per gli usi sanitari- quando vi è richiesta.

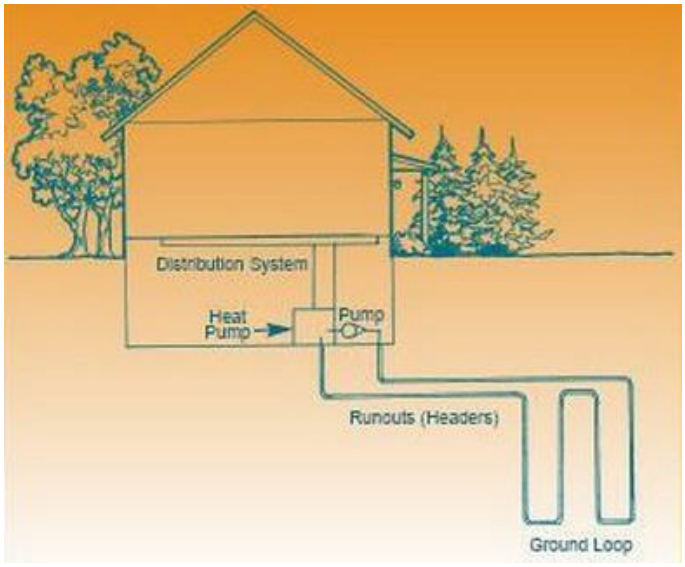

Figura 7 - Schema di impianto geotermico (www.pallisergroup.com)

Nei sistemi a bassa entalpia è previsto il raggiungimento di minori profondità nel terreno, quindi minori complicazioni nella fase di perforazione, rispetto ai sistemi ad alta entalpia; l'utilizzo di un diverso fluido termovettore, ed un diverso livello termico elaborato. Tutto ciò fa sì che la geotermia a bassa entalpia possa essere ben impiegata anche per applicazioni residenziali di taglia media e piccola, con costi non eccessivi se confrontati con i notevoli risparmi economici ottenibili.

Il raffreddamento di ambienti è realizzabile quando gli impianti ad assorbimento funzionano seguendo un ciclo che utilizza il calore invece dell'elettricità come sorgente di energia. Il raffreddamento è ottenuto utilizzando due fluidi: un refrigerante, che circola, evapora (assorbendo calore) e condensa (cedendo calore), e un fluido secondario o assorbente.

Allo scopo di elevare la temperatura del fluido ai livelli necessari per alimentare impianti di riscaldamento urbano, viene estratta energia geotermica attraverso l'uso delle pompe di calore, ovvero macchine che spostano il calore in

direzione opposta a quella in cui tenderebbe a dirigersi naturalmente e che permettono di estrarre e impiegare economicamente il calore contenuto in corpi a bassa temperatura come terreno, acquiferi poco profondi e masse d'acqua superficiali (10°C nel caso di fiumi e laghi) in cui la temperatura si mantiene grossomodo costante durante l'arco dell'anno per la climatizzazione e la produzione di acqua calda sanitaria. Molte pompe di calore sono reversibili ed il loro funzionamento può essere invertito, potendo operare alternativamente come unità riscaldanti o raffreddanti.

Nella pompa di calore uno speciale fluido, detto *frigorifero*, attraversa un circuito chiuso sotto forma di liquido o di vapore a seconda delle condizioni di temperatura e pressione in cui si trova. Questo circuito chiuso è composto da un *compressore*, una *valvola di espansione,* un *condensatore* e un e*vaporatore*; questi ultimi due sono costituiti da scambiatori di calore, ovvero da tubi posti a contatto con un fluido di servizio (acqua o aria) nei quali scorre il fluido frigorigeno: fornendo energia al fluido frigorigeno con il compressore, questo, nell'evaporatore, assorbe calore dal mezzo circostante e lo cede al mezzo da riscaldare tramite il condensatore.

Potendo invertire il ciclo, può essere naturalmente utilizzata anche per la climatizzazione estiva; in questo caso il terreno viene impiegato per raffreddare l'abitazione, avendo accumulato freddo nel corso dell'inverno.

Il trasferimento di calore non avviene in modo spontaneo, ma richiede l'introduzione nel ciclo di una certa quantità di lavoro che per queste macchine coincide con l'energia elettrica assorbita dal compressore.

I sistemi pompa di calore-terreno GSHP sono molto convenienti dal punto di vista energetico, non solo per l'utente finale ma anche per il sistema energetico globale, in quanto con 1 KWh di energia elettrica si producono almeno 4 KWh di energia termica, quindi una quantità superiore rispetto a quella che si è consumata.

Inoltre, più piccola è la differenza di temperatura tra il sottosuolo e la casa, minore sarà l'energia necessaria al funzionamento della pompa di calore, quindi maggiore sarà il risparmio.

Dallo schema riportato in *figura 8* è evidente come l'utilizzo di una pompa di calore permetta di ottenere energia in modo efficiente: infatti per produrre il 100% dell'energia per il riscaldamento è necessario consumarne solo il 25%, mentre il restante 75% viene ricavato dal terreno.

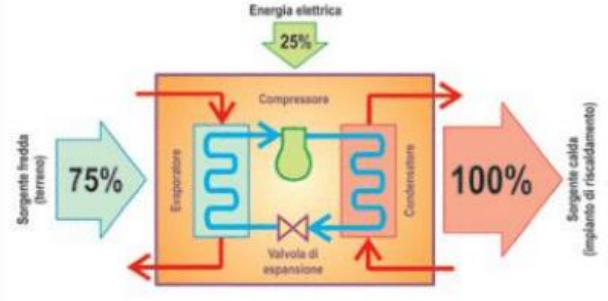

Figura 8 - Schema impiantistico del funzionamento di una pompa di calore (A. Verrone, 2009)

L'efficienza di una pompa di calore è misurata grazie al *coefficiente di prestazione "*C.O.P", ovvero il rapporto tra energia fornita (calore ceduto al mezzo da riscaldare) ed energia elettrica consumata.

Il C.O.P. sarà tanto maggiore quanto più bassa è la temperatura a cui il calore viene ceduto (nel condensatore) e quanto più alta quella della sorgente da cui viene assorbito (nell'evaporatore). Utilizzando un sistema con pompe di calore è quindi opportuno individuare una sorgente fredda a temperatura non eccessivamente bassa (il terreno è ideale) e scegliere un sistema di riscaldamento che operi a bassa temperatura (ad esempio sistema ad aria o, meglio ancora, sistema radiante).

Il C.O.P. è variabile a seconda del tipo di pompa di calore e delle condizioni di funzionamento ed ha, in genere, valori prossimi a 3,5 nel caso di scambio termico con il terreno, e di 4 se la pompa è accoppiata ad un pozzo con scambio termico con acqua di falda. Questo vuol dire che per 1 kWh di energia elettrica consumato, fornirà 3,5-4 kWh di calore al mezzo da riscaldare.

Il mezzo esterno da cui il fluido frigorigeno assorbe calore tramite l'evaporatore è detto *sorgente fredda*, e le principali sono l'aria, l'acqua e il terreno.

L'aria esterna è la più comune sorgente termica per le pompe di calore (contrariamente all'acqua calda); i comuni sistemi di condizionamento, infatti, utilizzano da anni questa soluzione, ma la variabilità della temperatura e dell'umidità dell'aria riducono il rendimento medio delle pompe.

L'acqua rappresenta la sorgente calda ideale, purtroppo non sempre è facilmente reperibile nelle quantità richieste. L'acqua alla quale ci si riferisce è quella che sfrutta come fonte di calore l'energia geotermica che dal nucleo terrestre si irradia verso la superficie, ed è proprio per questo che tale tipologia di sorgente viene utilizzata dagli scambiatori di calore a terreno.

2.7 Circuiti idraulici chiusi: tipologie di sonde di geoscambio

Un'efficace alternativa all'uso delle due sorgenti sopra citate è l'impiego di impianti accoppiati direttamente con il terreno, attraverso un sistema di tubazioni a circuito chiuso al cui interno scorre un fluido termovettore.

È il sistema più adattabile alle diverse condizioni, anche per quanto riguarda la disposizione stessa che le tubazioni possono assumere nel terreno, che possono essere a sviluppo orizzontale o verticale , e invisibili dopo la perforazione.

La caratteristica principale a vantaggio del terreno come sorgente termica, trascurando la minore rumorosità e il minor impatto estetico (rispetto a quelli ad aria), è la sua elevata inerzia termica (o capacità di accumulo).

Questo consente di avere una temperatura media costante durante tutto l'anno, consentendo di raggiungere buoni valori del coefficiente di effetto utile.

2.7.1 Sistema a sonde orizzontali (SGO)

Nel caso di impianti a sonde orizzontali, di cui un esempio è rappresentato in *figura 9*, gli scambiatori vengono interrati a circa 1-2 m di profondità, per rimanere ampiamente al di sotto dell'eventuale livello di congelamento del terreno, per cui rappresenta l'impianto più facile da installare.

Questa tipologia di impianti permette di utilizzare solo l'energia geotermica molto superficiale: la sorgente di calore per questo tipo di impianti è rappresentata dal calore solare, per cui l'area al di sopra degli scambiatori non deve essere coperta da edifici, pavimentazioni o alberi ad alto fusto e sempreverdi e risulta evidente che per l'installazione è necessaria un'ampia area verde limitrofa all'edificio.

Gli impianti vengono realizzati utilizzando tubi in PE disposti secondo differenti configurazioni (a tutto campo, a trincea, ecc…) differenti fra loro a seconda della forma disegnata dalla tubazione, del numero di tubi impiegati e della connessione fra i rami e per praticità si realizzano diversi circuiti che convergono in

due collettori di mandata e di ritorno, da cui partono i collegamenti con la pompa di calore.

La superficie verde occupata da un sistema a sonde orizzontali è, indicativamente, almeno doppia rispetto alla superficie da riscaldare nell'edificio: in considerazione della tipologia del terreno, il rapporto da considerare è di circa 25 mq per prelevare 1kw.

Rispetto alla soluzione a sonde verticali, questo impianto presenta il vantaggio di avere una minore incidenza dei costi della parte di captazione geotermica ma risulta un sistema meno performante perché la sua efficienza è influenzata dalle temperature esterne.

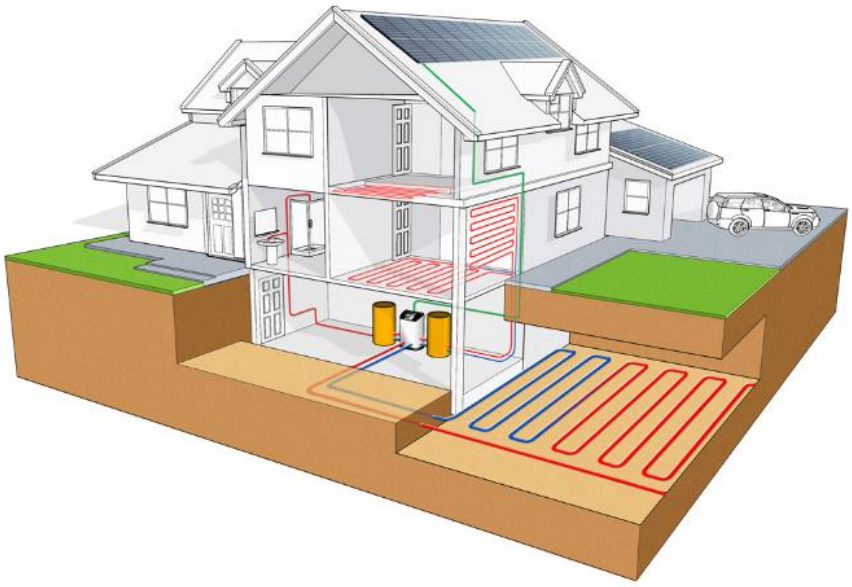

Figura 9 - Sistema a sonde orizzontali (SGO)
(www.geonovis.com)

2.7.2 Sistema a sonde verticali (SGV) o *Borehole Heat Exchanger* (BHE)

Le sonde geotermiche verticali, di cui la *figura 10* ne mostra un esempio, sono particolarmente diffuse in Europa centrale e rappresentano la soluzione standard se ci si riferisce a installazioni commerciali ed edifici pubblici in quanto possono essere installati quasi ovunque.

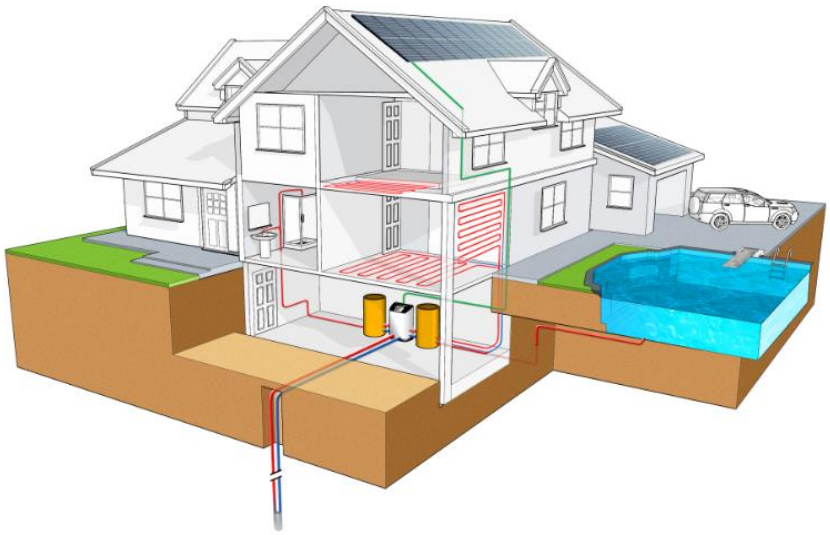

Figura 10 - Sistema a sonde verticali (SGV)
(www.geonovis.com)

Questi impianti sono favoriti in quanto la temperatura del terreno ad una certa profondità (15-20 m circa) rimane costante e in seguito alla necessità di una certa capacità termica in aree ristrette. Questa stabilità termica rispetto alla temperatura esterna variabile nelle stagioni, determina un'ottima possibilità e capacità di scambio e una conseguente miglior efficienza della PDC sia nella funzione riscaldamento che in quella del raffrescamento.

La maggior parte degli impianti BHE presenta un tubo singolo ad U e una miscela di acqua e glicol etilene (al 20%) come fluido termovettore e sono a tutti gli effetti scambiatori a circuito chiuso tra pompa di calore e terreno.

Le perforazioni, aventi un diametro di circa 15 cm, arrivano ad una profondità di 100-150 metri, valore determinato dal carattere geologico o idrogeologico del sito in questione, come anche dalla disponibilità di superficie esterna all'edificio. Nel foro

realizzato vengono inserite le sonde geotermiche che scendono e risalgono in unico circuito e spesso vengono utilizzate zavorre fissate al piede di sonda per agevolarne la discesa (*figura 11*).

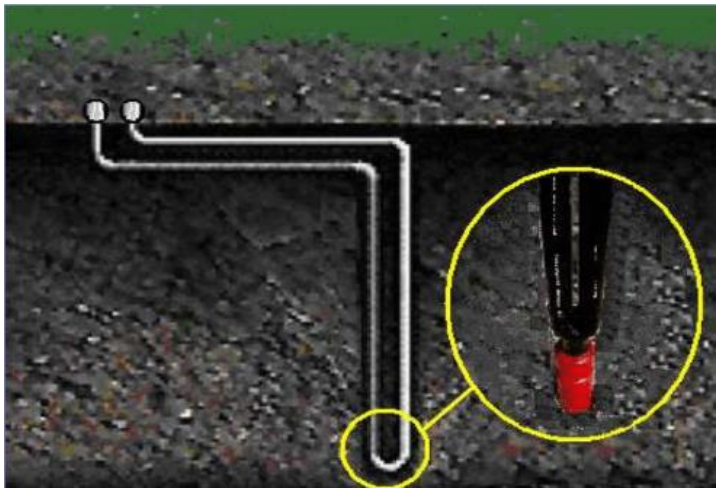

Figura 11 -Sonda geotermica verticale a singolo tubo a U (particolare zavorra)
(Luigi Fanizzi, "L'uso termico della risorsa naturale suolo)

Dopodiché lo spazio vuoto all'interno della sonda viene riempito dal fondo tramite un *tremie pipe* con un prodotto specifico premiscelato di cementi bentonitici, allo scopo di saturare gli spazi e creare la miglior conducibilità tra fluido circolante nelle sonde e terreno circostante e di impedire la comunicazione tra eventuali falde acquifere attraversate dalla perforazione.

Se, come normalmente succede, le sonde sono diverse, attraverso collegamenti orizzontali realizzati a circa 1 metro dal piano campagna le stesse convergono in un collettore geotermico che a sua volta sarà poi collegato idraulicamente alla PDC con singoli circuiti di mandata e di ritorno mentre nel caso di sonda singola, essa verrà collegata direttamente alla PDC.

La lunghezza dello scambiatore geotermico, e di conseguenza la lunghezza e il numero delle sonde, vengono dimensionati in funzione della potenza della pompa di calore necessaria all'edificio da climatizzare. Al termine della fase di realizzazione il terreno viene risistemato senza lasciare traccia.

Le tipologie di scambiatori (*figura 12*) esistenti sono due che a loro volta si suddividono in:

- Singola U: all'interno della perforazione vengono inseriti un tubo di mandata e uno di ritorno collegati sul fondo;
- Doppia U: realizzato come il precedente, con la differenza che nella perforazione si inseriscono quattro tubi collegati a due a due sul fondo;
- Tripla U e Quadrupla U: rispettivamente sei e otto tubi collegati a due a due sul fondo;

Altra tipologia è costituita da scambiatori coassiali che si suddividono in:

- Tubi coassiali semplici: il tubo di ritorno è interno a quello di mandata, che occupa tutta la sezione della perforazione e quindi, se il diametro del tubo esterno è uguale o di poco più piccolo di quello della perforazione, non è necessario il getto di riempimento;
- Tubi coassiali complessi: simile al precedente, l'unica differenza sta nel fatto che tra tubo interno ed esterno ci sono delle alette di collegamento che garantiscono la coassialità e un migliore scambio termico; durante la fase di ritorno il fluido anziché nella tubazione interna può essere fatto circolare in alcuni dei canali periferici di modo che possa scambiare calore con il terreno in entrambi i sensi di percorrenza.

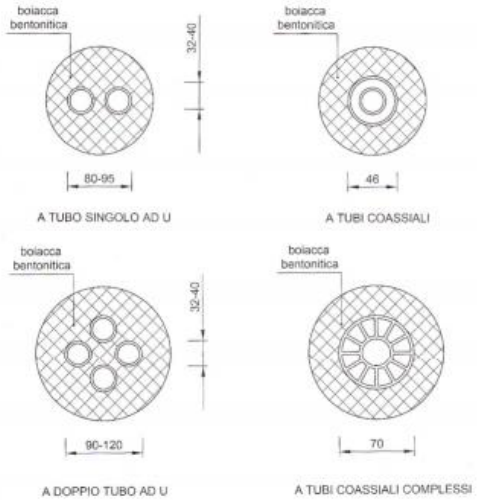

Figura 12 - Tipologie di scambiatori
(L. Fanizzi, 2013)

I costi di realizzazione risultano essere non trascurabili poiché è necessario l'utilizzo di macchinari specifici in fase di perforazione e posa, ma questi costi vengono attenuati dai minimi costi di gestione che ne giustificano ampiamente l'investimento iniziale.

2.8 Circuiti idraulici aperti

Esiste tuttavia anche una soluzione a circuito aperto (*figura 13*) che permette lo sfruttamento del calore naturale di laghi, pozzi e falde. L'acqua freatica, infatti, risulta ottimale nell'accoppiamento con una pompa di calore in quanto presenta la capacità di accumulare il calore del sole per un lungo periodo e mantenere temperature generalmente costanti di 9-12°C.

Gli impianti a circuito aperto richiedono la presenza di un primo pozzo per la captazione dell'acqua, dopo una pompa di calore permette di fornire una temperatura sufficiente per il riscaldamento delle abitazioni e infine, una volta raffreddata, l'acqua viene reimmessa in falda mediante un secondo pozzo o, in alternativa, iniettata nella rete comunale d'approvvigionamento idrico.

La progettazione dei pozzi dipende, oltre che dalle proprietà geologiche del sito, anche dalla portata d'acqua necessaria alla pompa di calore in considerazione del fatto che la portata necessaria ad 1 kW termico oscilla tra i 150 l/h e 200 l/H. Di conseguenza il prelievo di queste portate deve essere compatibile con il tempo di ricarica della falda e non comprometterne la dinamica.

Inoltre, la perforazione dei pozzi può rappresentare un rischio potenziale per le falde idriche sotterranee, qualora vengano compromesse le barriere idrauliche naturali che separano le falde profonde da quelle superficiali e che porterebbe a portare in contatto tra loro acque di diversa qualità, provocandone la contaminazione.

I rischi non sono legati solo alla fase realizzativa, ma anche a quella gestionale e riguardano le eventuali contaminazioni chimiche delle acque reimmesse in falda dovute ad eventuali perdite nel circuito idraulico, le modificazioni delle specie chimiche disciolte nelle acque sotterranee indotte dalla variazione termica e le modificazioni del contenuto microbiologico delle acque sotterranee.

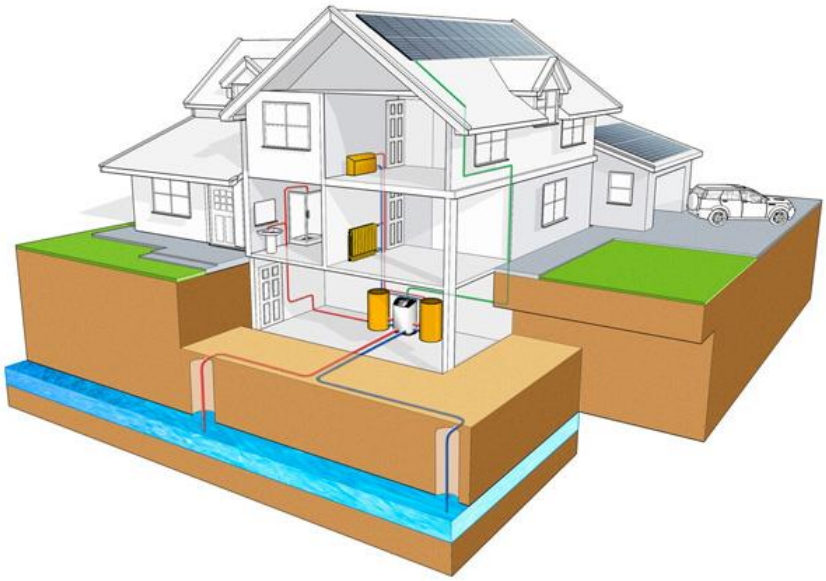

Figura 13 - Sistema a circuito aperto (www.geonovis.com)

2.9 Impatto ambientale

L'utilizzo del calore geotermico presenta un impatto ambientale abbastanza modesto e ben controllabile. Inoltre, l'energia geotermica, rispetto ai combustibili fossili o nucleari, presenta il grande vantaggio di un ciclo di produzione e un uso estremamente limitato nello spazio, in quanto l'utilizzo della fonte avviene nelle immediate vicinanze del luogo di estrazione. Non richiede nemmeno trattamenti e processi di trasformazione intermedi, come avviene invece nel settore petrolifero e nucleare.

Nel vapore dei maggiori campi geotermici è contenuta una quantità >99% di anidride carbonica, ma la quantità di CO_2 rilasciata in atmosfera risulta comunque largamente inferiore ai valori prodotti dai combustibili fossili; basti pensare che per ogni kWhe prodotto, la quantità di CO_2 prodotta da una centrale geotermica è in media pari a 170 g/kWhe contro i 453 g/kWhe del gas naturale, i 906 g/kWhe del petrolio e i 1042 g/kWhe del carbone e bisogna considerare che si tratta di CO_2 che non proviene da processi di combustione, ma da processi geologici che anche in assenza di coltivazione della risorsa geotermica producono per natura emissioni di CO_2.

Altro problema è rappresentato dai diversi elementi chimici disciolti nell'acqua e nel vapore condensato quali l'arsenico, il mercurio, il piombo, lo zinco, il boro e lo zolfo; questi elementi presentano una tossicità che risulta comunque essere proporzionale alla loro concentrazione.

Inoltre l'inquinamento termico può comportare un cambiamento del chimismo delle acque sotterranee poiché con il variare della temperatura varia la capacità di dissoluzione dell'acqua dei minerali che attraversa; i più sensibili sono anche i più solubili come il ferro, il calcio e gli idrogenocarbonati che potrebbero modificarne la composizione chimica.

2.10 Rischio sismico

La procedura di reiniezione di fluidi è considerata responsabile nel determinare fenomeni di microsismicità nelle zone interessata da campi geotermici, infatti l'attività di monitoraggio sismico nelle aree geotermiche è iniziata in concomitanza con l'utilizzo della tecnica di reiniezione al fine di verificare una correlazione tra lo sfruttamento dei campi geotermici e i fenonemi sismici.

La geotermia poco profonda, però, non comporta alcun rischio sismico, in altre parole l'utilizzo della geotermia per uso privato o per una impresa non comporta pericoli.

2.11 Geostrutture energetiche

Le strutture geotecniche sotterranee, come fondazioni profonde e superficiali, diaframmi, rivestimenti di gallerie e tiranti, vengono sempre più impiegate per scambiare calore con il terreno e fornire energia termica per il riscaldamento e raffreddamento degli edifici e per lo sghiacciamento delle infrastrutture e rappresentano un oggetto di ricerca in ambito nazionale e europeo.

Oltre ad essere costruite per il primario ruolo strutturale, esse vengono equipaggiate in maniera tala da scambiare calore con il terreno e fornire quindi energia per gli usi sopracitati sfruttando i principi della geotermia superficiale.

Grazie ad una PDC, il calore viene estratto dal terreno durante l'inverno per soddisfare la necessità di riscaldamento, mentre nel periodo estivo il calore viene iniettato nel terreno al fine di mantenere la temperatura refrigerata negli ambienti.

Per queste strutture, quindi, la fase di progettazione risulta più complessa rispetto ai progetti tradizionali a causa del loro duplice ruolo.

Inoltre, nell'utilizzo di una struttura per approvvigionamento energetico bisogna tenere in considerazione una serie di altri problemi quali la progettazione e il dimensionamento delle apparecchiature geotermiche, lo studio della domanda di energia e la conseguente ottimizzazione del sistema e gli effetti addizionali indotti dalla variazione di temperatura sulla struttura stessa in termini di stress e spostamenti, oltre che sul terreno.

In una struttura geotermica si distinguono principalmente due circuiti: il primo è installato all'interno dell'elemento strutturale e permette lo scambio di calore con il terreno e quest'ultimo è collegato attraverso una pompa di calore ad un circuito secondario all'interno della costruzione. La pompa di calore permette un aumento di temperatura, tipicamente da 10-15°C fino ad un livello compreso tra i 25°C e i 35°C.

Il loro vantaggio, rispetto ai classici scambiatori geotermici, risiede principalmente nei minori costi di realizzazione dell'impianto, dal momento che vengono utilizzate opere già previste per scopi strutturali. Inoltre, nelle geostrutture il trasferimento di calore risulta essere più alto rispetto a quello registrato nei pozzi grazie al calcestruzzo che presenta una buona conducibilità termica e una capacità di stoccaggio termico, che lo rendono un mezzo ideale come scambiatore di calore. Al fine di utilizzare queste proprietà, all'interno del calcestruzzo vengono installati tubi di plastica in polietilene ad alta densità aventi diametro pari a 20 o 25 mm e uno spessore rispettivamente pari a 2,0 o 2,3 mm.

2.11.1 I pali energetici

I pali energetici, oltre ad avere una funzione di fondamenta e sostentamento per edifici di tutte le dimensioni, sono geostrutture che vengono equipaggiate con un sistema per lo scambio del calore, come mostrato in *figura 14:*

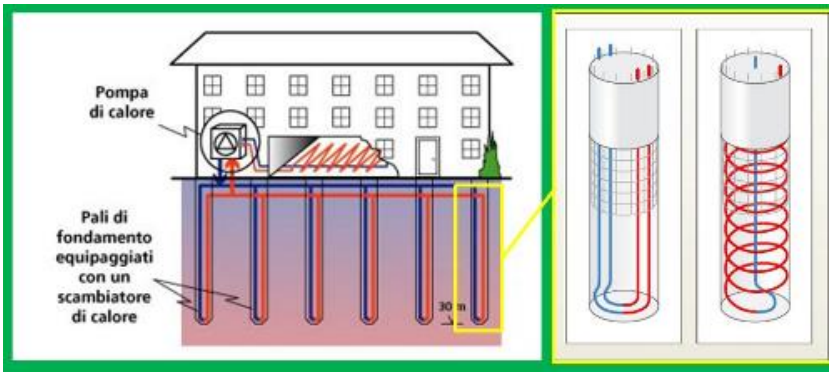

Figura 14 - Schema rappresentativo dei pali geotermici

Quelli realizzati in cemento armato sono abbastanza spessi, con un diametro compreso tra 0,4 e 1,5 m mentre la lunghezza varia a seconda delle condizioni geologiche, può arrivare a 30 m e poiché il potenziale energetico aumenta con la profondità, fondazioni più profonde risultano essere più vantaggiose.

L'integrazione tra elemento strutturale e impianto termico è ottenuto andando a posare le tubazioni in senso longitudinale all'interno dell'armatura e serrate a quest'ultima attraverso elementi di fissaggio o fascette (*figura 15*); sono poi immerse nel calcestruzzo per assicurare un buon contatto termico, operazione che viene eseguita in sito per cui è necessaria un'area di lavoro speciale in cantiere e questo permette di abbassare il rischio di danni alle tubazioni.

Figura 15 -Particolare del posizionamento dei tubi all'interno dell'armatura (Facciorusso J. et al. , 2007)

E' molto importante garantire che per tutta la lunghezza del palo i tubi siano distanziati omogeneamente lungo la circonferenza così da evitare reciproche interferenze.

I funzionamento di questi "pali energetici" prevede estrazione di calore dal terreno durante la stagione di riscaldamento e iniezione del calore nel terreno durante il periodo di climatizzazione secondo un ciclo annuale.

I pali energetici permettono di risolvere i problemi relativi alle configurazioni con sonde verticali e con collettori orizzontali: in primo luogo, rispetto ad una SGV, viene sfruttato lo scavo in profondità legato alla posa dei pali di fondazione per applicare anche le sonde e ridurre i costi realizzativi dell'impianto geotermico, legati principalmente alle attività di trivellazione; rispetto alla SGO, non hanno bisogno di una grande superficie esterna dove adagiare le sonde.

2.11.1.1 Modalità di trasmissione del calore in un sistema di pali energetici

La trasmissione del calore avviene secondo i principi della termodinamica:

- L'energia termica ceduta da un sistema deve essere uguale a quella ricevuta dall'altro;
- Il calore passa dal corpo più caldo a quello più freddo fino a che i due corpi raggiungono la stessa temperatura, quella di equilibrio termico.

Le modalità di scambio termico sono essenzialmente per conduzione e per convezione (*figura 16*). L'irraggiamento non viene considerato in quanto influenza solamente gli strati superficiali di terreno. La forza motrice di questi meccanismi è proprio la differenza di temperatura tra il fluido termovettore e il terreno circostante.

Il flusso di calore per convezione si verifica tra sistemi termodinamici che si muovono relativamente l'uno rispetto all'alto, in altre parole per mezzo del flusso stesso; si è già detto che il sottosuolo, a determinate profondità, si trova ad una temperatura pressoché costante e questo calore può essere captato da un fluido termovettore che viene fatto circolare all'interno dei tubi opportunamente disposti nel palo.

Il calore trasportato dalla circolazione dell'acqua risulta pari a :

$$q_{conv,i} = c_w \rho_w \bar{v}_w (T - T') \quad \left[\frac{W}{m^2}\right]$$

dove c_w e ρ_w rappresentano il calore specifico e la densità dell'acqua, $\bar{v}_w$ è il vettore della velocità dell'acqua, pari a ki , e T' è la temperatura di riferimento del terreno circostante.

Questo valore appena calcolato risulta essere più significativo nei materiali ad elevata permeabilità mentre risulta trascurabile nei materiali a bassa permeabilità.

Ogni palo energetico possiede un volume di terreno di competenza che ha spesso la forma di un cilindro verticale; al suo interno la propagazione del calore avviene invece per conduzione e il flusso di calore relativo è pari a:

$$q_{cond} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad \left[\frac{W}{m^2}\right]$$

dove λ rappresenta la conducibilità termica del mezzo mentre $\frac{\partial T}{\partial n}$ rappresenta il gradiente di temperatura nella direzione del flusso n.

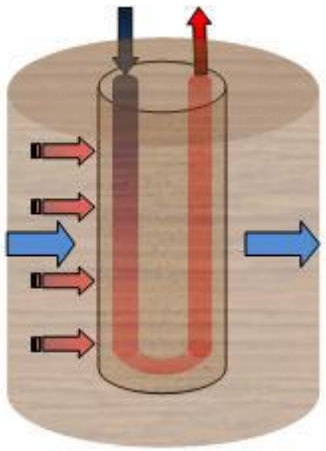

Figura 16 - Modalità di scambio termico per un palo energetico (A. Verrone, 2009)

La capacità di scambio termico è uno dei parametri fondamentali che permettono di caratterizzare un sistema con pali energetici dal punto di vista termico; indicato come UA (W/m), equivale alla potenza termica che si può scambiare nel terreno una volta raggiunto un regime stazionario, data una differenza di 1 K tra la temperatura media del fluido termovettore e la temperatura media del terreno.

Questo parametro dipende dalla resistenza termica globale tra la temperatura media del fluido e la temperatura media del terreno.

La resistenza termica di un palo è solo una componente della resistenza termica globale, indicata come R_b , che in regime stazionario e per una potenza trasferita conosciuta, permette di quantificare lo scarto di temperatura tra il fluido che circola nei pali e il terreno in contatto con il palo stesso.

Questa differenza di temperatura arriva facilmente a parecchi gradi, o addirittura a una decina per un caso sfavorevole.

Allora la capacità di scambio termico UA risulterà:

$$UA = \frac{N_p L_a}{R_b + R_s}$$

dove N_p è il numero di pali energetici (-), L_a è la lunghezza attiva di un palo energetico (m), R_b è la resistenza termica dei pali energetici (K/(W/m) e R_s è la resistenza termica del terreno in flusso stazionario (K/(W/m).

La capacità di scambio termico di un sistema di pali è dunque nota se si conosce la resistenza termica dei pali, le loro dimensioni (diametro, lunghezza attiva e numero), la distanza media tra di essi e la conduttività termica media del terreno.

Da questo parametro è possibile ricavare una relazione lineare tra la potenza trasferita dai pali e la differenza di temperatura tra il fluido e il terreno in situazione di flusso stazionario:

$$P_{th} = UA \cdot (T_{fluid} - T_{soil})$$

dove P_{th} è la potenza termica iniettata o estratta dai pali energetici (W), T_{fluid} è la temperatura media del fluido (°C), $T_f = (T_i + T_o)/2$ con T_i e T_o che rappresentano le temperature di entrata e di uscita del fluido nei pali (°C) e T_{soil} è la temperatura media del terreno nella zona perturbata dai pali energetici (°C).

2.11.2 I diaframmi energetici

Negli ultimi anni è divenuta fonte di interesse anche una nuova tecnologia che prevede di incorporare gli scambiatori di calore nella parete dei diaframmi; i tubi dello scambiatore infatti vengono sepolti dopo essere stati posati a meandro e serrati alla gabbia di rinforzo del diaframma stesso tramite elementi di fissaggio o fascette, come mostrato in *figura 17*:

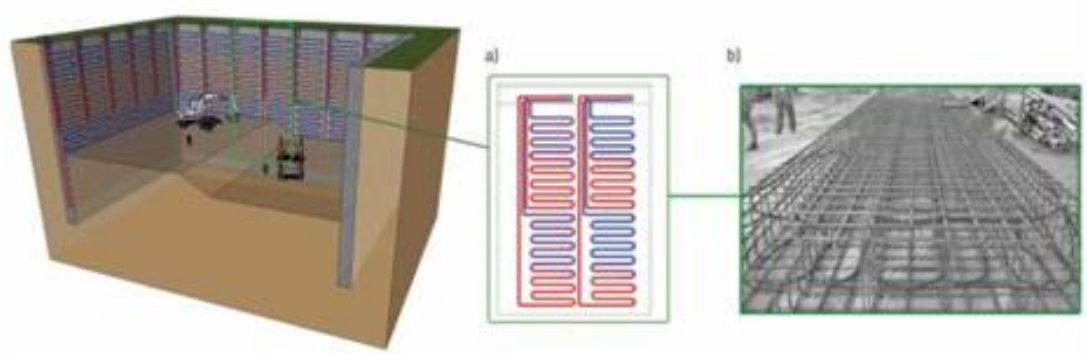

Figura 17 - Diaframma energeticamente attivo: a9 schema del posizionamento dei tubi; b) tubi geotermici fissati all'armatura del diaframma
(Facciorusso J. et al. , 2007)

Anche in questo caso si ha quindi l'accoppiamento della funzione strutturale con la capacità di sfruttare l'energia geotermica del suolo.

L'utilizzo di questa tecnologia risulta essere comunque recente: le prime applicazioni si sono avute solo nel 1996 in Austria e Svizzera, mentre nel 2003 per la linea metro U2 di Vienna i tubi sono stati incorporati nei diaframmi, nelle fondamenta e nel rivestimento del tunnel (*Caichu Xia et al., ,2012)*.

Uno studio sull'attivazione termica di un diaframma energetico, normalmente richiesti per costruzioni in ambiente urbano come parcheggi sotterranei o per tunnel realizzati con il metodo "*cut and cover*" è stato condotto per la sezione 1 della linea 2 della metro di Torino (*M. Barla et al., 2016)*, rappresentata in verde in *figura 18:*

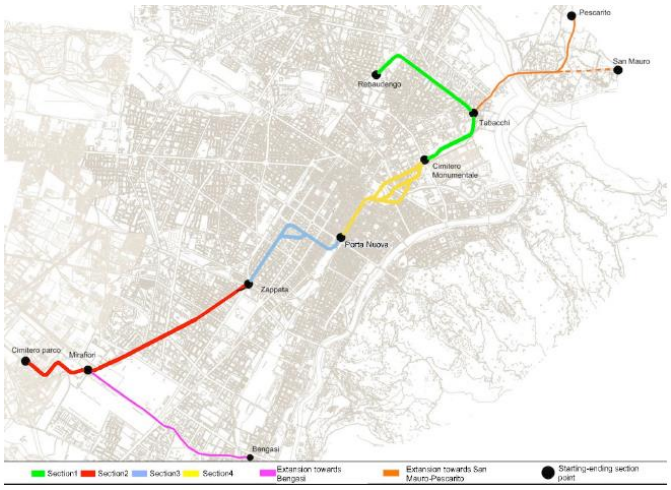

Figura 18 - Schema della Linea 2 per la metro di Torino (Barla M. et al., 2016)

La struttura di contenimento è composta da due diaframmi laterali aventi 80 cm di spessore e 14 cm di profondità, mentre il basamento è costituito da una lastra di cemento di 80 cm di spessore posizionata a 8 m dalla superficie superiore ed è larga 7 m (*figura 19*).

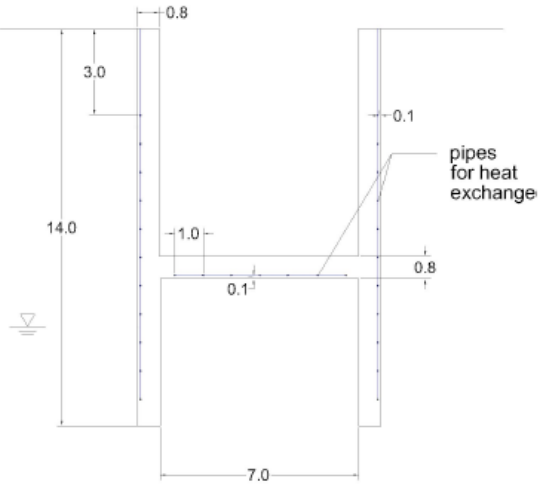

Figura 19 - Schema rappresentativo del diaframma energetico (Barla M. et al., 2016)

I tubi del circuito geotermico sono realizzati in polietilene reticolato (Pe-Xa) e presentano un diametro di 25 mm con uno spessore di 2,3 mm. Essi vengono

installati ad una distanza di 10 cm dal bordo esterno della parete, sempre serrandoli all'armatura della struttura e vengono collegati idraulicamente in parallelo, come mostrato in *figura 20:*

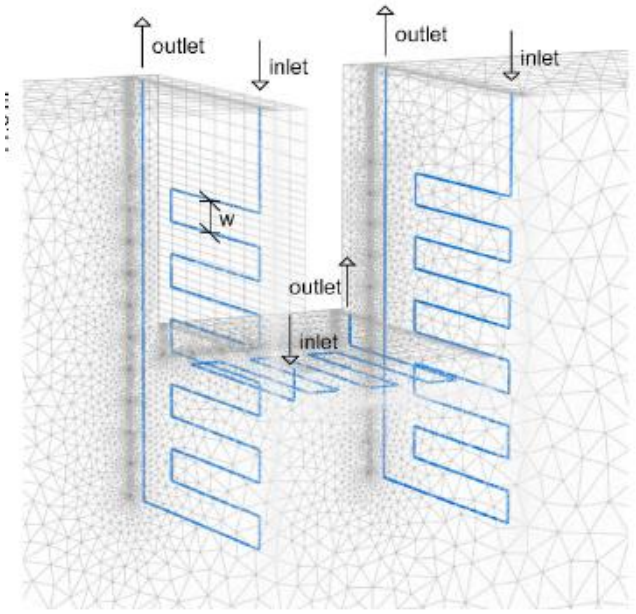

Figura 20 - Modellazione tridimensionale dei tubi all'interno della paratia (Barla M. et al., 2016)

Gli scambiatori di calore delle pareti dei diaframmi differiscono da quelli del pozzo in molti aspetti tra i quali la profondità di sepoltura, le tipologie di scambiatori di calore che vengono installati, la temperatura del sottosuolo e il materiale che circonda gli scambiatori di calore.

La profondità sepolta, infatti, viene influenzata dalla profondità della parete del diaframma, vengono raggiunti infatti i 20-40 m, distanza molto più piccola della profondità degli scambiatori di calore nel pozzo che raggiunge gli 80-100 m. Inoltre, i due tubi singoli a U possono essere disposti con interasse più ampio non avendo limitazioni per la limitazione delle dimensioni del foro che si hanno in un pozzo.

Si registra anche un incremento della temperatura del terreno in quanto l'idratazione del calcestruzzo può liberare calore che porta in calcestruzzo a raggiungere una temperatura che può arrivare ad un massimo di 60-70 ° C; la temperatura del sottosuolo è un fattore molto importante poiché influenza il tasso di scambio termico, in altre parole maggiore è la temperatura del sottosuolo, il tasso di scambio termico si abbassa per il raffreddamento e aumenta per il riscaldamento dell'ambiente.

Infine, il mezzo circostante i tubi assorbitori nel pozzo è il *backfill* e il terreno, mentre la parete del diaframma è in cemento, avendo quest'ultimo una maggiore conduttività termica e capacità termica, è evidente che gli scambiatori di calore nella parete del diaframma possono funzionare meglio di quelli nel pozzo se tutte le altre condizioni sono uguali.

Nelle paratie è possibile, inoltre, disporre i tubi a W, ovvero tue tubi singoli a U che vengono collegati in serie, come rappresentato in *figura 21*.

Rispetto ai singoli scambiatori di calore a forma di U nelle stesse condizioni, la velocità di trasferimento del calore dello scambiatore di calore a forma di W nelle pareti dei diaframmi è superiore del 25-40% (*Caichu Xia et al., 2012).*

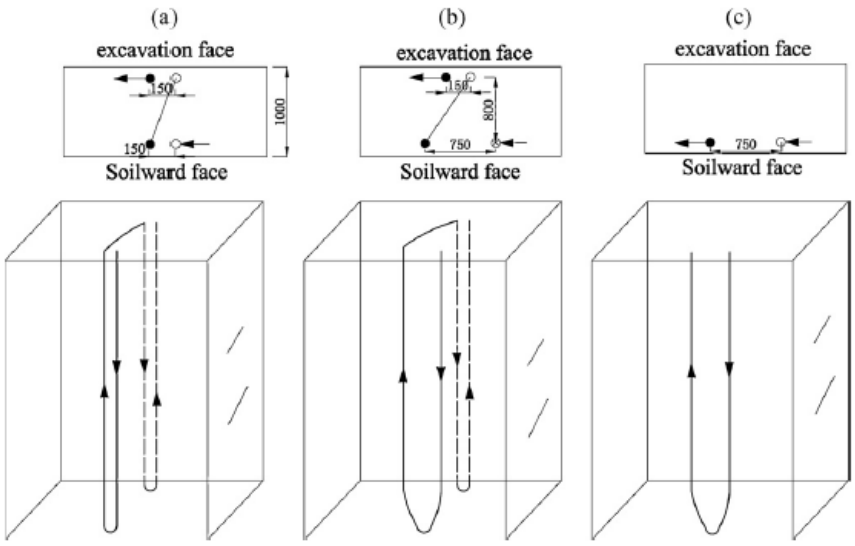

Figura 21- Disposizione dei tubi assorbitori all'interno delle paratie: a) tipologia a W; b) tipologia a W implementata; c) tipologia a singola U
(Barla M. et al., 2016)

2.11.3 Le gallerie energetiche

Anche per le gallerie superficiali è possibile eseguire un'attivazione termica grazie all'installazione di una rete di tubazioni in materiale plastico all'interno del rivestimento.

Negli anni sono state sviluppate diverse tecniche di integrazione delle tubazioni geotermiche all'interno del supporto delle gallerie:

- La prima tecnologia di scavo è il cosiddetto "*cut and cover method*" (*figura 22*), il quale si basa sullo scavo a cielo aperto in cui vengono inserite delle paratie laterali in calcestruzzo armato con immediato getto di una piattaforma superiore, mentre lo scavo e l'armatura della galleria vera e propria vengono eseguiti in un secondo momento, dopo che la platea stradale è stata ripristinata. In questo caso la procedura di installazione delle tubazioni geotermiche segue gli stessi criteri relativi alle paratie, già citati precedentemente.

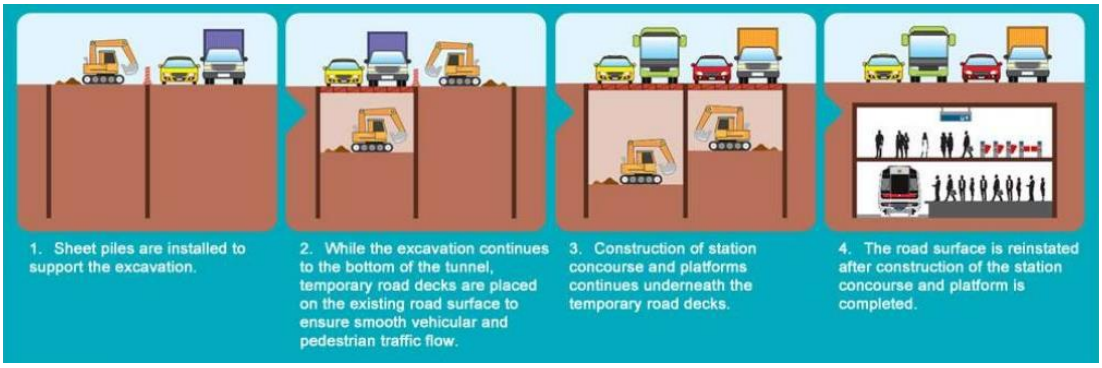

Figura 22 - Fasi realizzative del metodo "Cut and Cover"
(Rutul D., 2015)

- La seconda tecnologia di scavo consiste nello scavo a piena sezione con TBM realizzato mediante una testa rotante su cui sono montati dei dischi taglianti. In questo caso il sistema di supporto è costituito da conci in calcestruzzo prefabbricati. Tali conci possono essere termicamente attivati inserendo, in stabilimento, le tubazioni geotermiche disposte a meandro all'interno dei conci, così da massimizzare l'efficienza dello scambio termico, e fissandole all'armatura come mostrato in *figura 23*.

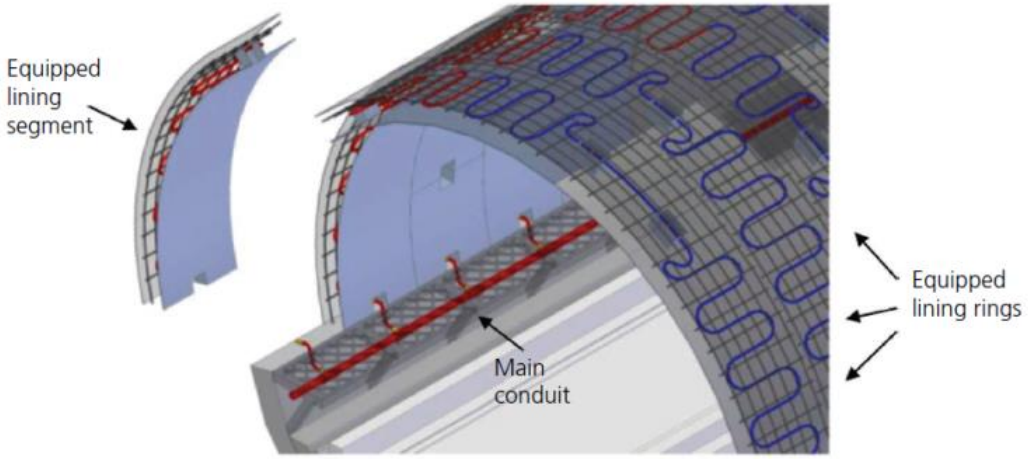

Figura 23 - Rappresentazione schematica di un rivestimento di una galleria costituito da conci equipaggiati con tubi scambiatori di calore (Barla M. et al., 2016)

- La terza tecnologia di scavo è il cosiddetto New Austrian Tunneling Method (NATM); tale metodo prende in considerazione la capacità dell'ammasso roccioso di autosostenersi attraverso il controllo del processo di ridistribuzione della forza nell'anello che circonda lo scavo e la scelta delle opere di sostegno.

  Le operazioni di *spritz beton* (*sprayed concrete*) armato e no, *bullonatura* a tenuta puntuale o totale, *centinatura* con centine telescopiche collassabili (tollerano le deformazioni iniziali della roccia senza danneggiarsi) caratterizzano tale metodo.

  Le tubazioni geotermiche, in questo caso, possono essere fissate ad un geotessuto posto tra il rivestimento di prima fase e quello definitivo (*Adam D., Markiewicz R., "Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers",2009*). In *figura 23* è mostrato il particolare del rivestimento di una galleria realizzata con il metodo NATM in cui è evidenziata la posizione delle tubazioni fissate al geotessuto.

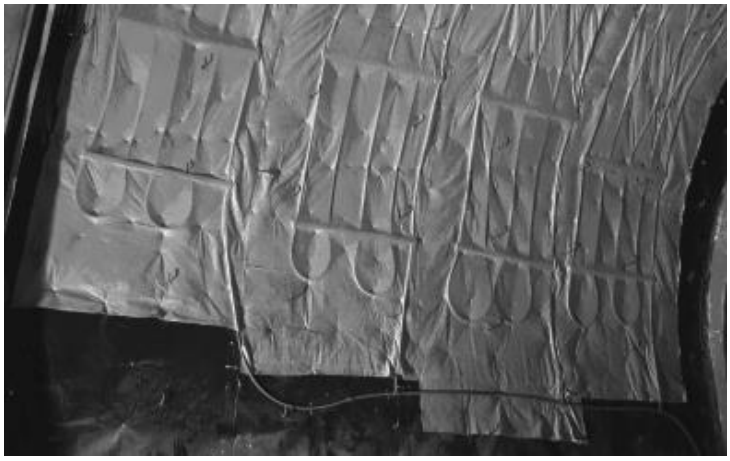

Figura 24 - Dettaglio degli scambiatori di calore fissati al geotessuto (Adam D., Markiewicz R., 2009)

La stragrande maggioranza delle gallerie degli ultimi anni è stata realizzata utilizzando quest'ultima tecnologia, visto che permette lo scavo in ammassi rocciosi e terreni di non elevate caratteristiche meccaniche comportando rischi minimi di danneggiamento per le strutture in superficie e di conseguenza essa si configura come una tecnica particolarmente vantaggiosa per la realizzazione di scavi all'interno di città (*Franzius J. N., Pralle N., 2011)*. Per il supporto di queste gallerie vengono messi in opera conci prefabbricati in calcestruzzo armato collegati trasversalmente a formare anelli di 1 - 2 m di larghezza. Essi si differenziano dai conci tradizionali esclusivamente per l'introduzione, prima del getto, di un sistema di tubi per lo scambio termico fissati alla gabbia di armatura (*figura 25*).

L'introduzione di un sistema di scambio termico all'interno dei conci di rivestimento deve in ogni caso soddisfare alcuni requisiti:

- l'integrità strutturale del rivestimento non deve essere compromessa;
- l'impermeabilità del rivestimento deve essere mantenuta;
- il processo di inserimento del sistema di scambio termico deve essere integrato nel ciclo di produzione;
- il collegamento tra tubazioni di conci adiacenti non deve interferire con l'avanzamento della TBM e deve garantire i requisiti di durabilità.

Figura 25 - Disposizione tubi in PE all'interno della gabbia di armatura (Franzius J. N., Pralle N., 2011)

Recentemente è stata sviluppata una nuova tipologia di concio energetico, nell'ambito del progetto "ENERTUN", per il quale è stata depositata domanda di brevetto italiana dal Politecnico di Torino (*Barla M., Di Donna A., 2015*).

Il nuovo concio è caratterizzato da una disposizione innovativa delle tubazioni (*figura 26*) e consente:

- il riscaldamento invernale ed il condizionamento estivo degli edifici mediante un sistema energetico sostenibile e rinnovabile;
- la diminuzione delle perdite di carico dell'impianto complessivo;
- una maggiore efficienza del sistema di scambio termico per le applicazioni in cui la direzione del flusso d'acqua interstiziale nel terreno è perpendicolare all'asse della galleria;
- la limitazione del surriscaldamento interno della galleria dovuto al traffico di esercizio e la riduzione della necessità di ventilazione forzata, grazie all'estrazione del calore dall'interno della galleria e al controllo della sua temperatura;
- la compensazione dei danni ambientali prodotti dalla realizzazione di opere in sotterraneo, grazie all'accoppiamento della costruzione delle infrastrutture necessarie con un sistema di fornitura di energia rinnovabile.

Figura 26 - Anello di rivestimento ENERTUN
(Barla M. et al., 2017)

Questo concio è stato utilizzato nel Per la progettazione della galleria della linea 1 della Metropolitana di Torino è stato condotto uno studio di fattibilità per investigare sull'utilizzo di questi conci prefabbricati come scambiatori di calore andando ad inserire un prototipo formato da due anelli dotati di tubi nel rivestimento della galleria.

La lunghezza totale della linea 1 attualmente in servizio è di 13,4 km con 21 stazioni. Un nuovo prolungamento sud (1,9 km con 2 stazioni) è in costruzione e collegherà la stazione Lingotto a piazza Bengasi. La galleria principale è stata realizzata a profondità variabili tra 15-20 m mediante quattro TBM EPB di 6,8 m di diametro e 80 m di lunghezza. Il rivestimento della galleria è costituito da 7 conci prefabbricati per ogni anello di profondità di circa 1,4 m. L'avanzamento è avvenuto completando circa 7 anelli al giorno e quindi con una velocità di avanzamento media di circa 10 m/giorno. La profondità media del tratto di galleria è di 21,5 m e lo scavo avverrà al di sotto del livello di falda.

Lo schema dell'impianto geotermico è riportato in *figura 27* :

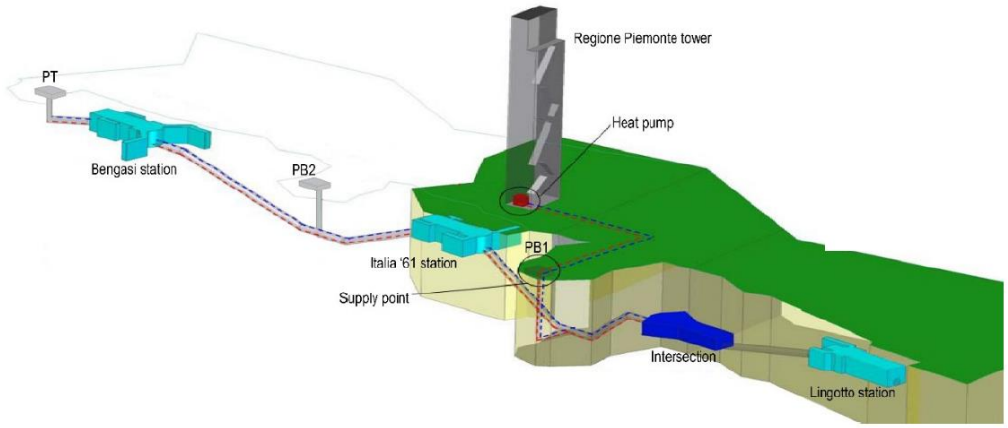

Figura 27 - Schema dell'impianto geotermico del prolungamento sud della linea 1 della metropolitana di Torino
(Barla M. et al., 2016)

Nel sistema ENERTUN, ogni anello di rivestimento ha uno spessore di 30 cm e i tubi in polietilene reticolato ad alta densità (Pe-Xa) vengono inseriti sull'estradosso esterno, a 10 cm dal bordo, con spaziatura di 30 cm, diametro esterno di 25 mm e spessore di 2,3 mm e sono in grado di far circolare un fluido termovettore costituito da glicole propilenico miscelato con acqua in grado di lavorare anche sotto i -20°C (*Barla M., Di Donna A., 2016*).

La connessione dei tubi tra un concio e l'altro e con la condotta di mandata e ritorno avviene, dopo la posa, tramite appositi manicotti che rimangono facilmente ispezionabili.

Lo studio ha dimostrato che l'attivazione termica del rivestimento della galleria porta a benefici di tipo economico e ambientale, si è registrato, infatti, una variazione modesta della temperatura di falda con recupero completo al termine del ciclo annuale di funzionamento il costo aggiuntivo per attivare termicamente la galleria è risultato inferiore all'1% del costo totale dell'opera ed è il 41% inferiore dell'utilizzo di sonde verticali, a parità di fabbisogno termico (*Barla M., Di Donna A., 2016*).

Capitolo 3

Le tecniche di mappatura del potenziale geotermico

3.1 Premessa

Lo sfruttamento dell'energia geotermica superficiale negli anni ha seguito un trend crescente dovuto, come già detto, ai vantaggi che questa risorsa presenta rispetto alle altre fonti di energia rinnovabile, ovvero il basso impatto ambientale, il non essere influenzato dalle condizioni meteorologiche e una produzione decentralizzata e localizzata.

L'uso di scambiatori di calore è cresciuto costantemente nell'ultimo decennio ma diversi fattori hanno limitato una diffusione più vasta di impianti per lo sfruttamento della geotermia superficiale, come ad esempio il costo delle perforazioni per i BHE (*Borehole Heat Exchanger*). Ma le limitazioni, oltre che spaziali, risultano essere anche temporali in quanto l'utilizzo dell'impianto per lunghi periodi può condurre al raffreddamento del terreno, il che si traduce in una caduta del potenziale geotermico della zona.

Esiste, inoltre, una barriera di tipo non tecnologico che limita la diffusione di questa tipologia di impianti, ovvero l'adattabilità di un territorio ad installazioni per il condizionamento degli ambienti. E' necessario, quindi, individuare aree idonee allo sfruttamento del potenziale geotermico e queste zone vengono individuate andando

ad analizzare una correlazione spaziale tra gli eventi geotermici e i fenomeni geologici circostanti.

La fase di esplorazione della superficie rappresenta il primo *step* per l'utilizzo di questa risorsa prima di arrivare alla progettazione degli impianti e la stima dei costi di tali progetti. Gli scambiatori di calore, infatti, presentano una fattibilità tecnologica ed una redditività economica che dipendono dalle proprietà termiche e idrogeologiche specifiche del terreno *in situ*, quindi dalla zona in cui viene installato l'impianto.

Le caratteristiche del suolo come la granulometria e la densità apparente, infatti, vanno ad influenzare la conduttività termica del terreno mentre la distribuzione di acqua/neve e il conseguente processo di scongelamento e infiltrazione interstiziale risultano importanti per il trasporto dell'energia termica dalla superficie al sottosuolo: questi parametri influenzano il potenziale geotermico superficiale, definito come la potenza termica che può essere efficientemente scambiata da un BHE di una certa profondità.

Data questa situazione, è essenziale stabilire un sistema di gestione efficiente di questa risorsa, tuttavia, vi è una scarsità di metodologie di sfruttamento dell'energia geotermica a causa di diversi fattori. Le altre fonti rinnovabili, come ad esempio l'energia solare o eolica, presentano impatti sul territorio facilmente misurabili e controllabili, il che le rende regolabili agevolmente dalle entità amministrative.

Al contrario, la fonte geotermica e il suo impatto sul territorio risulta essere di difficile quantificazione. Inoltre, esiste una grande varietà di parametri di controllo e soglie in regolamenti e legislazioni che, però, non sono scientificamente fondati.

Il primo tentativo di gestire le risorse geograficamente è stato sviluppato a Stoccolma nel 2010 attraverso un sito Web in cui gli utenti potevano richiedere una perforazione domestica per sistemi a circuito chiuso a foro singolo verticale ma vennero sviluppate anche altre applicazioni geografiche basate sul Sistema di Informazione Geografico (GIS) per la quantificazione.

Tuttavia, nessuno di questi metodi è in grado di supportare un'efficiente distribuzione della *Shallow Geothermal Energy*, SGE, poiché non tengono conto delle caratteristiche locali relative al comportamento delle acque sotterranee nell'area di studio, alla forma dell'appezzamento dove l'energia potrebbe essere dissipata o estratta o i BHE (*Borehole Heat Exchangers*) esistenti e le loro affezioni termali.

Appare evidente quindi la necessità di sviluppare altri metodi per la valutazione del potenziale geotermico e per far ciò diversi autori si sono dedicati alla realizzazione di tecniche di mappatura al fine di ottenere un utile strumento di pianificazione utilizzabile da privati e pubbliche amministrazioni per installazioni future.

3.2 Analisi con i modelli di integrazione

L'identificazione di quelle aree che presentano un alto potenziale geotermico può dimostrarsi un compito oneroso, ma l'intera procedura può essere semplificata con processi decisionali *step by step*.

Nelle metodologie presentate di seguito il processo decisionale è basato sulla raccolta di dati con il sistema GIS che vengono integrati e combinati grazie a modelli di integrazione che permettono di definire le aree favorevoli per lo sfruttamento della risorsa geotermica.

3.2.1 Analisi MCDA (*Multi Criteria Decision Analysis*)

E' possibile ricorrere ad una analisi decisionale a più criteri (*Multi Criteria Decision Analysis, MCDA*) ovvero una ricerca operativa che valuta in modo esplicito i molteplici criteri conflittuali nel processo decisionale.

Basata sul sistema GIS, è stata ampiamente utilizzata in passato, come fatto da *Noorollahi et al. (2008), Carranza et al. (2008), Kiavarz Moghaddam et al. (2014) e Sadeghi e Khalajmasoumi (2015),* ed ha come idea di base quella di utilizzare i dati geografici e una funzione di aggregazione MCDA andando quindi a combinare i dati spaziali e i pesi dati ai rispettivi criteri così da individuare aree di interesse geotermico.

Il sistema GIS e l'analisi MCDA appartengono a due rami di ricerca distinti ma la loro integrazione risulta ragionevole al punto da diventare complementari l'uno per l'altra in ambito geotermico.

Infatti la MCDA fornisce una vasta collezione di algoritmi e procedure per la valutazione del potenziale geotermico delle regioni, mentre il sistema GIS è comunemente riconosciuto come strumento necessario per la raccolta di un gran numero di dati.

I primi studi GIS-MCDA appartengono alle due classi principali di analisi decisionale basate rispettivamente sul metodo *Boolean Overlay* (operazioni *"AND"* e *"OR"*) e sul metodo *Index Overlay* (*"Weighted Linear Combination* o *WLC*).

L'utilizzo del sistema GIS è giustificato anche dalla bassa capacità del sistema di fare errori poiché il processo decisionale per la localizzazione delle aree di interesse comporta la combinazione dei risultati ottenuti da una serie di indagini e di studi diversi che rendono la procedura complessa e inevitabilmente affetta da errore umano.

3.2.1.1 Modello GIS

Con la creazione del modello si va a determinare una relazione tra i pozzi geotermici e i *layers* geologici, geochimici e termici all'interno del GIS; è necessario, quindi, realizzare delle carte tematiche che verranno in seguito combinate.

In generale per lo sviluppo in ambito geotermico vengono considerate 5 differenti classi di dati che includono la distribuzione di:

- rocce vulcaniche, in quanto si presume che il duomo lavico sia collegato a qualsiasi corpo intrusivo profondo che funge da fonte di calore per il sistema idrotermale;
- faglie e fratture, poiché esse generalmente presentano un alto valore di permeabilità;
- zone di alterazione idrotermica acida, infatti la loro locazione e distribuzione può aiutare ad identificare aree permeabili poiché collegate alla risalita di fluido da un sistema geotermale profondo;
- sorgenti calde, che da sempre sono state considerate manifestazioni in superficie collegate a fonti di calore sotterranee anche se la posizione di queste ultime non è necessariamente collocata direttamente al di sotto di queste insorgenze;
- bassa resistività elettrica in profondità, dal momento che aree che presentano valori di resistività inferiore a 10 Ωm vengono considerate come potenziali siti per esplorazioni geotermiche.

La valutazione iniziale di una prospettiva geotermica si basa principalmente sui risultati di indagini geologiche, geofisiche e geochimiche eseguite durante le prime

fasi dell'esplorazione. I dati geoscientifici vengono esaminati per dedurre la natura, le caratteristiche e le dimensioni probabili della risorsa geotermica e per costruire un modello concettuale del sistema. Sulla base di questo modello, che fornisce informazioni sulla probabile origine e temperatura di origine dei fluidi geotermici, si decide se perforare pozzi esplorativi e/o effettuare ulteriori studi geoscientifici.

A questo punto, sulla base dei dati raccolti durante la fase di esplorazione, vengono introdotti i modelli di integrazione GIS per i suddetti dati, ovvero i modelli *Boolean Logic* e *Index Overlay*.

Le caratteristiche dei modelli vengono riportate di seguito.

3.2.1.2 Boolean Integration Model

La modellazione booleana comporta la combinazione logica di mappe binarie risultanti dall'applicazione degli operatori condizionali *"AND"* e *"OR"*. In pratica, a ciascuno dei criteri combinati viene assegnata un'importanza diversa e ogni elemento di prova deve essere ponderato in base al suo significato relativo.

Nello sviluppo del modello logico booleano le zone nell'area di studio vengono suddivise assegnando una delle due diverse classi di probabilità: alle zone favorevoli all'installazione di scambiatori di calore per lo sfruttamento della risorsa geotermica viene assegnato un valore pari a 1 mentre alle aree non favorevoli un valore pari a 0.

Un esempio di modello concettuale basato sul metodo booleano è rappresentato in *figura 28*:

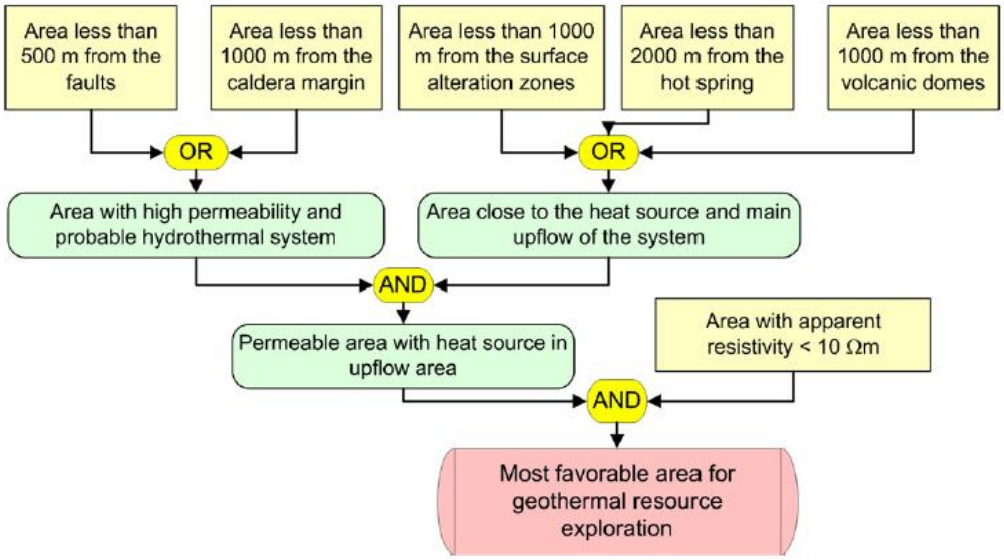

Figura 28 - Diagramma di flusso per il modello di integrazione Boleano usato nelle esplorazioni geotermiche (Y. Noorollahi et al., 2008)

3.2.1.3 Index Overlay Model

La sovrapposizione dell'indice è un'operazione sui dati raccolti nel sistema GIS in base alla quale gli strati con un'area comune vengono uniti in base alla loro occupazione dello spazio (Bonham-Carter, 1994; Clarke, 1999).

Questa funzione permette di creare mappe composte combinando diversi set di dati e a ciascuna mappa viene assegnato un punteggio diverso così da rendere il sistema di pesatura più flessibile. Inoltre, i punteggi e i pesi delle mappe possono essere adattati per riflettere il giudizio di un esperto sul caso di studio in esame.

In ciascun punto considerato si avrà che il punteggio di output, S, è definito come:

$$S = \frac{\sum W_i A_i}{\sum W_i}$$

dove Wi rappresenta il peso della i-esima mappa, e Ai è il punteggio nella mappa i-esima.

Anche questa operazione permette di delimitare le aree favorevoli all'installazione di scambiatori di calore andando a sovrapporre le mappe di idoneità

geologica e geofisica con la mappa di resistività: l'area considerata risulta così suddivisa in zone che presentano classi di vantaggiosità per lo sfruttamento della risorsa geotermica che va da bassa (classe inferiore o uguale a 5) ad alta (classe 9).

La *figura 29* mostra il diagramma di flusso per il metodo di sovrapposizione dell'indice utilizzato nell'analisi della preferenza geotermica.

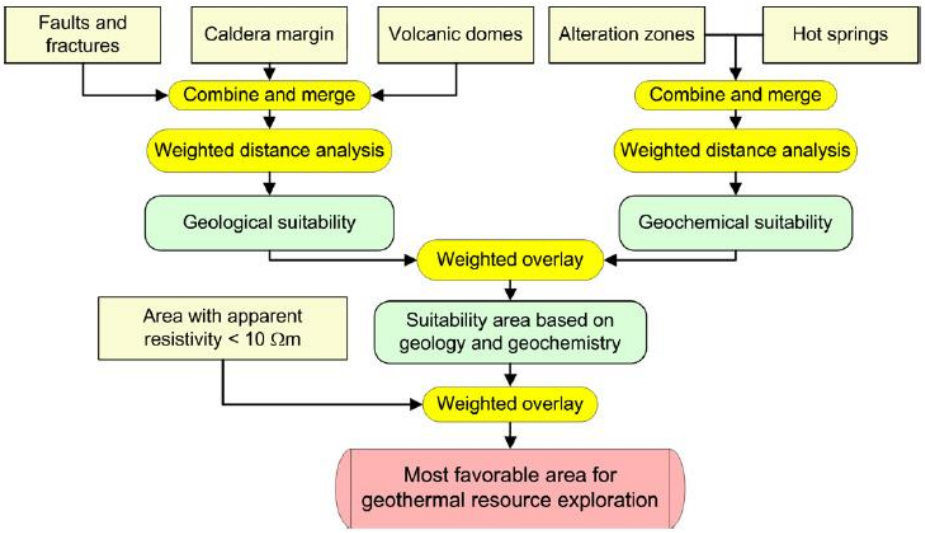

Figura 29 - Diagramma di flusso per il modello di sovrapposizione dell'indice per l'identificazione delle aree idonee alle esplorazioni geotermiche (Y. Noorollahi et al., 2008)

3.2.2 Analisi *GIS-based Ordered Weighted Averaging*

Il metodo proposto da Kiavarz et al. (2017) rappresenta uno strumento analitico appropriato per la mappatura del potenziale geotermico. Esso rientra nella analisi MCDA, ma in aggiunta prevede l'utilizzo del fattore OWA, il quale viene utilizzato per incorporare il concetto di rischio nell'analisi e sviluppare quindi una mappa geotermica a basso o alto rischio.

Nell'applicazione del metodo si parte dallo sviluppo e normalizzazione delle mappe secondo diversi criteri, a cui segue la scelta del progettista per specificare le proprie preferenze per i criteri raccolti, in altre parole viene assegnato un "peso" diverso a ciascun criterio.

Si procede quindi all'utilizzo del modello accoppiato OWA basato sul GIS al fine di integrare le mappe raccolte secondo i diversi criteri e le preferenze fornite dal progettista in una valutazione complessiva dei siti individuati.

Si ottiene così una mappa di prospettività del potenziale geotermico di cui dovrà essere verificata la validità e l'accuratezza secondo due diverse misure.

3.2.2.1 L'operatore OWA

Il concetto di operatore OWA è stato proposto per la prima volta da Yager nel 1988 al fine di fornire una famiglia di metodi di aggregazione parametrizzati.

Dal punto di vista matematico, questo operatore viene definito come una funzione per un dato set di *n* attributi (in questo caso, i criteri):

$$F : I^n \rightarrow I$$

A cui viene associato un set di pesi di ordine V la cui sommatoria è uguale a uno:

$V = [v_1, v_2, v_3, \dots v_n]$; $v_j \epsilon [0,1]$ con $j = 1, 2, \dots, n$

$$\sum_{j=1}^{n} v_j = 1$$

Quindi, dato un set di attributi standardizzati A:

$A_i = [a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}, \dots a_{in}]$; $a_{ij} \epsilon [0,1]$ con $i = 1, 2, \dots, m$

Dove a_{ij} è definito come il j-esimo attributo associato all' i-esimo sito, è possibile andare a definire l'operatore OWA come segue:

$$OWA_i(a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}, \dots a_{in}) = \sum_{j=1}^{n} v_j z_{ij}$$

Con $z_{i1} \geq z_{i2} \geq \dots \geq z_{in}$.

La sequenza dei valori di z_{ij}viene ottenuta andando a riordinare gli attributi standardizzati a_{ij}.

Questo è un processo di particolare importanza nella definizione del fattore perché implica l'associazione del peso v_j con una particolare posizione ordinata degli attributi a_{ij} per l'i-esimo sito preso in considerazione.

In altre parole, l'ordine con il peso più alto, ovvero v_1, viene assegnato all'attributo a_{ij} più alto per l'i-esimo sito, v_2 viene assegnato al secondo attributo più alto sempre per lo stesso i-esimo sito e così via fino a v_n che verrà di conseguenza assegnato all'attributo più basso.

E' importante notare che un particolare valore di a_{ij} non è associato ad un particolare peso v_j ma piuttosto è il peso che viene assegnato ad una determinata posizione ordinata degli a_{ij}.

La funzione del fattore OWA, quindi risiede nella capacità di implementare una vasta gamma di operatori per combinazioni di mappe selezionando pesi di ordine appropriati.

3.2.2.2 Standardizzazione degli attributi

Come già detto, gli attributi devono essere standardizzati e per far ciò viene adottata una procedura di standardizzazione che utilizza o il valore massimo o il valore minimo degli attributi considerati come *scaling points*, ovvero come punto rispetto al quale le grandezze vengono ridimensionate l'una rispetto all'altra.

A seconda dell'attributo che deve essere massimizzato o minimizzato, vengono rispettivamente utilizzate due equazioni che convertono il valore grezzo in standardizzato:

$$a_{ij} = \frac{S_{ij} - S_j^{min}}{S_j^{max} - S_j^{min}}$$

$$a_{ij} = \frac{S_j^{max} - S_{ij}}{S_j^{max} - S_j^{min}}$$

Dove S_{ij} rappresenta il valore grezzo per il sito i-esimo e il j-esimo attributo, S_j^{min} rappresenta il valore minimo per il j-esimo attributo, S_j^{max}invece è il valore massimo sempre per il j-esimo attributo e infine a_{ij} è il valore standardizzato per il sito i-esimo e il j-esimo attributo il cui valore varia da 0 a 1.

3.2.2.3 *Order Weights* (Pesi di ordine)

Caratteristica dell'operatore OWA però è quella di concentrarsi esclusivamente sul peso di ordine ignorando che i problemi decisionali basati sul GIS richiedono differenti pesi da assegnare ai criteri; di conseguenza Yager stesso (1997), al fine di superare questo problema, propose un approccio basato sulla modifica dei pesi degli attributi così da introdurre il peso dell'attributo all'interno dell'operatore OWA, come mostrato di seguito:

$$v_j = \left(\frac{\sum_{l=1}^{j} u_l}{\sum_{l=1}^{n} u_l}\right)^{\alpha} - \left(\frac{\sum_{l=1}^{j-1} u_l}{\sum_{l=1}^{n} u_l}\right)^{\alpha}$$

Con u_j che rappresenta l'attributo j-esimo riordinato di peso, ovvero w_j, in base al valore dell'attributo riordinato z_{ij}.

Il peso w_j viene quindi assegnato all'attributo j-esimo per tutti i siti al fine di indicare l'importanza dell'attributo in funzione delle scelte fatte dal progettista, rappresenta la priorità che viene data a ciascun attributo.

Nelle procedure di valutazione multicriteriali basate su GIS, i pesi degli attributi hanno tipicamente la seguente di proprietà

$$\sum_{j=1}^{n} w_j = 1$$

E di conseguenza

$$\sum_{j=1}^{n} u_j = 1$$

Quindi v_j può essere espresso come:

$$v_j = \left(\sum_{l=1}^{j} u_l\right)^{\alpha} - \left(\sum_{l=1}^{j-1} u_l\right)^{\alpha}$$

Il che porta a definire l'espressione finale dell'operatore OWA come:

$$OWA_i = \sum_{j=1}^{n} \left(\left(\sum_{l=1}^{j} u_l\right)^{\alpha} - \left(\sum_{l=1}^{j-1} u_l\right)^{\alpha}\right) z_{ij}$$

Il valore di α è collegato al grado di rischio (*ORness*) secondo la seguente relazione:

$$ORness = \frac{1}{\alpha + 1}$$

Il cui valore varia da 0 a 1 e indica la posizione dell'OWA su un *continuum* tra le regole di combinazione AND o OR.

Pertanto, con diversi valori di *ORness* (o parametri α) si possono generare diversi set di pesi OWA e, a loro volta, una varietà di strategie di combinazione di mappe basate su GIS che vanno da una combinazione di tipo minimo (corrispondente all'operatore logico AND) a tutti i tipi intermedi fino alla combinazione di tipo massimo (corrispondente all'operatore logico OR) quindi gli operatori AND e OR rappresentano i casi estremi di OWA.

Scegliendo un particolare valore di *ORness*, è possibile controllare il livello di rischio per il problema decisionale passando da strategie decisionali pessimiste a ottimistiche come mostrato in *figura 30:*

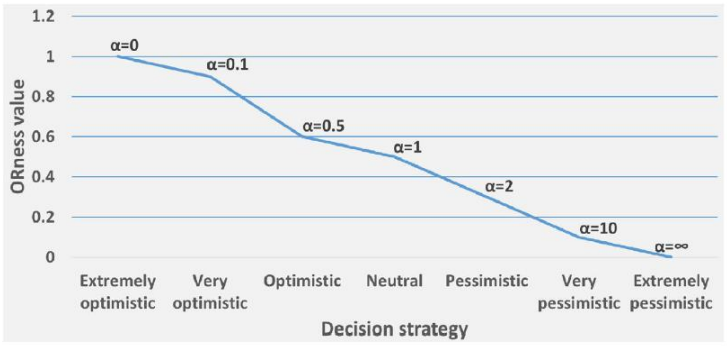

Figura 30 - Valori ORness e corrispondenti strategie decisionali o di combinazione (M.Kiavarz & M. Jelokhani-Niaraki, 2017)

La strategia associata con un valore di *ORness* = 0 (quindi l'operatore booleano AND) viene definita strategia pessimistica (estremamente pessimistica) e rappresenta la situazione decisionale in cui solo il valore di attributo più basso di ciascun appezzamento è considerato nel processo di valutazione.

Se il valore di attributo più basso soddisfa un valore minimo desiderato, tutti gli altri punteggi di attributo soddisfano (e superano) tale valore minimo.

Ciò implica che l'operatore AND è un'operazione molto conservativa o avversa al rischio, in cui una posizione è considerata idonea solo se tutti i criteri sono stati soddisfatti (*Eastman J., "IDRISI Andes Tutorial", 2006*).

Viceversa, la strategia estremamente ottimistica, corrispondente al valore di ORness = 1, quindi l'operatore booleano OR, assegna un peso dell'ordine di 1 al valore più alto in ciascuna posizione. In base a questa strategia, il processo decisionale è

caratterizzato da atteggiamenti ottimistici rappresentati dal miglior risultato possibile, ovvero, viene selezionato solo il valore più alto possibile in ciascuna posizione.

Mentre il booleano AND richiede che tutti gli attributi siano soddisfatti per essere accettabili, l'OR booleano richiede che venga soddisfatto almeno un attributo (ovvero il valore dell'attributo più alto) (Eastman, 2006) ma questa strategia decisionale è troppo rischiosa perché, per l'appezzamento scelto, tutti tranne l'attributo massimo potrebbero essere inaccettabili.

Un esempio dell'intero procedimento è rappresentato in *figura 31*:

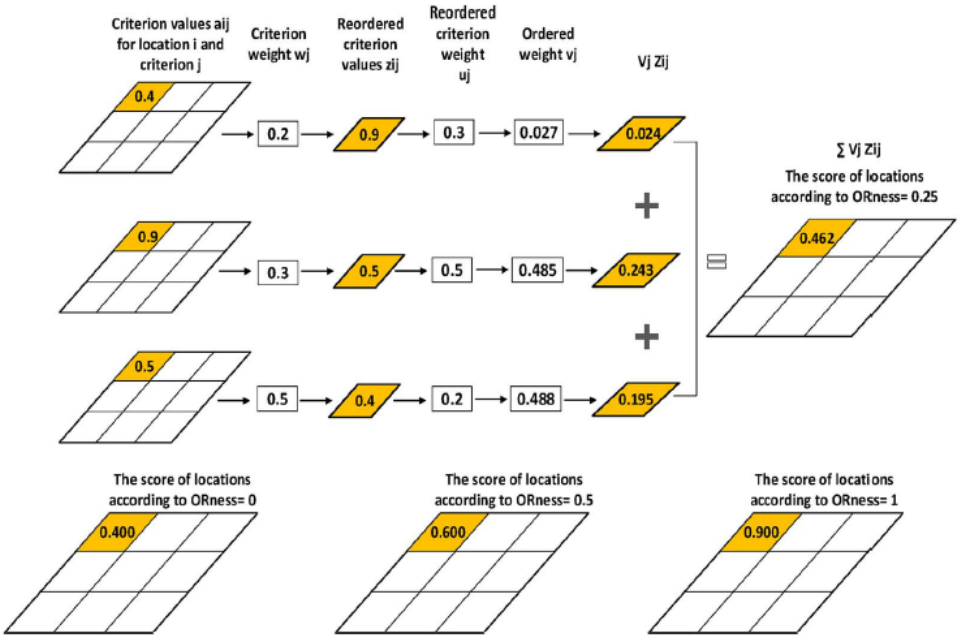

Figura 31 -Esempio di calcolo del fattore OWA per l'i-esimo appezzamento e valori di ORness pari a 0, 0.25, 0.5 e 1. (M.Kiavarz & M. Jelokhani-Niaraki, 2017)

3.3 Analisi del potenziale geotermico secondo Garcìa-Gil (2016)

Per promuovere l'utilizzo delle pompe di calore geotermiche, è stata sviluppata da García-Gil et al. (2016) una metodologia utilizzata per il calcolo del potenziale geotermico a bassa temperatura (*Low Temperature Geothermal Potential*, LTGP).

Il LTGP è inteso come l'energia massima per unità di tempo trasferibile tra l'impianto geotermico e il terreno senza produrre un cambiamento di temperatura o una caduta piezometrica superiore a un certo valore nel punto di sfruttamento.

Il procedimento viene applicato a scala regionale ed è applicabile sia a sistemi a circuito chiuso che a sistemi a circuito aperto.

3.3.1 La metodologia

Base comune a tutti i metodi, come già detto, è la raccolta di dati; per questo metodo, poiché lo scambio di flusso di calore viene determinato per ciascun punto del dominio di studio, è necessario che le informazioni di input vengano determinate per ciascun punto dello spazio. Ne risulta che la quantità di informazioni da gestire risulta elevata e per ridurre l'onere computazionale, impossibile da eseguire manualmente, viene utilizzato un sistema GIS per la raccolta dati.

Vengono inseriti dati geometrici, che includono la litologia e lo spessore del materiale nelle differenti unità di trivellazione, dati idraulici, che rappresentano i pozzi d'acqua con i rispettivi parametri di caratterizzazione, e i dati termici, riguardanti informazioni climatiche.

Tutti questi dati vengono integrati in un modello GIS tridimensionale il quale è composto da strati differenti la cui zonazione rappresenta la distribuzione dei terreni e rocce con le rispettive proprietà termo-idrauliche.

Questa metodologia, applicabile a scala regionale, tenta di tenere conto delle velocità di flusso delle acque sotterranee ed è adattabile allo stato giuridico locale sull'uso dell'energia geotermica superficiale e alle restrizioni di pompaggio dell'acqua stabilite dagli amministratori locali.

Una delle limitazioni del metodo è che le soluzioni analitiche utilizzate in questo studio sono applicabili in condizioni limite specifiche predeterminate: il terreno è considerato un mezzo omogeneo e semi-infinito, i pozzi di pompaggio sono schermati in tutti gli spessori della falda, non ci sono altri pozzi o scambiatori di calore nei dintorni, la velocità di riscaldamento è costante, etc...

Questi presupposti risultano essere critici soprattutto per quelle zone in cui l'eterogeneità è rilevante.

Inoltre, il LTGP di un sito potrebbe essere compromesso dall'uso termico esistente nelle aree limitrofe, specialmente nelle aree densamente popolate.

3.3.2 Calcolo per i sistemi a circuito aperto

Il potenziale dei sistemi a circuito aperto viene calcolato in funzione di un flusso di acqua rimovibile in maniera sostenibile e della differenza di temperatura tra le acque sotterranee e un corpo estraneo di riferimento. Infatti se l'acqua freatica pompata ha una temperatura diversa da quella di un elemento esterno, l'energia potenzialmente trasferita tra l'acqua sotterranea e quell'elemento per unità di tempo è data dall'equazione seguente, dove $c_w\rho_w$ rappresenta la capacità termica delle acque sotterranee, ΔT è la differenza di temperatura tra la temperatura dell'acqua di falda e un certo corpo esterno, e Q è il flusso d'acqua pompato fuori:

$$P = Qc_w\rho_w\Delta T$$

Per calcolare il flusso di acque sotterranee rimovibili, viene utilizzata la soluzione analitica proposta da Thiem per prove di pompaggio in condizioni stazionarie:

$$s(r) = \frac{Q}{2\pi T} Ln\left(\frac{R}{r}\right)$$

Dove s è il quantitativo di acqua che può essere prelevato ad una distanza radiale r, T è la trasmissività omogenea della falda acquifera, R è il raggio d'influenza e Q è il flusso d'acqua pompato costante.

Considerando un certo raggio di influenza in falde acquifere non confinate e confinate, il prelievo massimo ammissibile è valutato in funzione della trasmissività

locale come una certa percentuale dello spessore saturo della falda calcolata nella parete del pozzo.

Dall'equazione si ricava quindi il flusso d'acqua di pompaggio sostenibile ma è necessario tenere in considerazione una limitazione realistica delle velocità di pompaggio nelle zone ad alta trasmissività per rappresentare limitazioni tecniche nel processo di pompaggio.

L'ultimo passo per il calcolo riguarda un'integrazione verticale su tutti gli n-layers del modello geologico che permette di ricavare il valore cercato del potenziale a bassa temperatura: nel caso di sistemi a circuito aperto è sufficiente sommare i valori di calore scambiato dall'acquifero sotto il punto considerato.

3.3.3 Calcolo per i sistemi a circuito chiuso

Per i sistemi a circuito chiuso il potenziale viene valutato con una approssimazione che calcola lo scambio di flusso di calore ammissibile con il terreno secondo una soluzione analitica dell'equazione di trasporto del calore in mezzi porosi.

Infatti quando uno scambiatore di calore geotermico viene collocato nel terreno, la propagazione del calore all'interno del mezzo poroso produce un'anomalia di temperatura o un *plume* termico.

Se esiste una variazione massima tollerabile di temperatura nel terreno per motivi ambientali, il massimo flusso di calore scambiato (LTGP) dipende dall'efficienza dei processi di trasporto del calore in atto.

Maggiore è l'efficienza dei processi di trasporto del calore, maggiore è il flusso di calore che può essere scambiato senza raggiungere un certo incremento di temperatura.

Nella zona insatura del suolo e della roccia avviene solo la conduzione del calore mentre nella zona saturata, i processi di trasporto devono essere considerati come un processo accoppiato di conduzione del calore tra la matrice solida e i fluidi interstiziali a cui si aggiunge l'advezione dovuta al flusso di acque sotterranee.

In questa analisi, l'equazione risolta analiticamente per la stima del LTGP è la seguente:

$$\Delta T(x;y) = \frac{q_l}{2\pi k} exp\left(\frac{Ux}{2a}\right) K_0\left(\frac{U\sqrt{x^2+y^2}}{2a}\right)$$

Con

$$U = \frac{uc_w\rho_w}{\rho c}$$

Dove ΔT rappresenta l'incremento di temperatura nelle direzioni x e y, q_l è la velocità di riscaldamento per lunghezza della fonte di calore; k è la conducibilità termica; $K_0(z)$ è la funzione di Bessel modificata del secondo tipo di ordine zero; $a = k/(\rho c)$ è l'effettiva diffusività termica e infine U è la velocità rivista che prende in considerazione la velocità di avanzamento u, il calore volumetrico specifico dell'acqua e il calore specifico volumetrico del mezzo poroso rc.

Sempre nelle ipotesi considerate per la derivazione della soluzione analitica, viene adottato un aumento di temperatura massimo tollerabile nel punto di iniezione e vien stabilita una variazione minima di temperatura al di sotto della quale non viene assunta alcuna anomalia termica.

Quindi, una volta stabilite le proprietà termiche e idrogeologiche in un punto di iniezione arbitrario del modello geologico, viene calcolata la velocità di riscaldamento per lunghezza della sorgente (q_l) per l'aumento di temperatura massimo tollerabile fissato precedentemente. Si ricava così l'area interessata con un aumento di temperatura superiore all'aumento minimo; quest'operazione viene eseguita autonomamente su una piattaforma GIS e permette di andare ad individuare l'area del *plume* termico, indicata con A_{plume}.

La stima di LTGP nella zona insatura o in strati aventi bassa conducibilità idraulica è ottenuta dall'applicazione del modello a sorgente lineare espresso nell'equazione seguente:

$$T(r,t) = \frac{q_l}{4\pi k}\left(ln\left(\frac{4at}{r^2}\right) - \gamma\right)$$

dove q_l è la velocità di riscaldamento per lunghezza della sorgente; $T(r,t)$ è la temperatura funzione di r; r è la distanza radiale dalla sorgente e t è l'intervallo di

tempo che deve essere considerato in quanto non viene raggiunta una situazione stazionaria; k è la conduttività termica, γ è la costante di Eulero, $a = k/(\rho c)$ è la diffusività termica effettiva, e ρc è il calore specifico volumetrico del mezzo poroso, includendo sia la matrice solida che l'acqua nei suoi pori.

Il calcolo della velocità di raffreddamento può essere effettuato nella stessa maniera esposta per i terreni saturi, mentre per il calcolo dell' A_{plume} si può utilizzare il valore del raggio trovato nell'espressione, essendo l'area di *plume* termico considerata come un cerchio.

Anche per i sistemi a circuito chiuso viene effettuata un'integrazione verticale su tutti gli n-layers del modello geologico grazie all'applicazione della formula seguente:

$$LTGP_{close\ loop} = \sum_{i=0}^{n} \frac{z_i \cdot q_{li}}{A_{plume_i}}$$

dove q_{li} è la velocità di riscaldamento per unità di lunghezza dal livello i-esimo; z_i è lo spessore del livello i-esimo; e A_{plume_i} è l'area del pennone termico calcolato dal livello i-esimo.

3.4 Analisi del potenziale geotermico secondo Bertermann et al. (2014)

Bertermann et al. (2014) propongono un metodo che, a differenza degli altri già citati, permette di valutare fino a 10 metri di profondità il vSGP (*very Shallow Geothermal Potential*), ovvero il potenziale dovuto esclusivamente all'irraggiamento solare, trascurando il calore interno della terra.

Il metodo proposto porta alla creazione di una carta a scala europea (EOM, European Outline Map) che mostra i valori di conduttività termica in W/m*K, considerata come la proprietà che controlla il flusso di calore tra materiali di diverso tipo.

3.4.1 Il metodo

Punto di partenza per le successive valutazioni, come negli altri metodi, è l'analisi delle caratteristiche del suolo che influenzano la variabilità spaziale dei valori di conduttività termica: l'*European Outline Map* sul vSGP mira a riflettere infatti le condizioni geotermiche naturali principalmente influenzate dal clima, dalla topografia, dall'idrologia e geologia dell'ambiente considerato.

Questi valori vengono raccolti in set di dati ambientali e quelli usati per questo studio sono raccolti in *tabella 3*:

Tabella 3- Set di dati utilizzati per la EOM (D.Bertermann et al., 2014)

Compartment	Parameter	Source	Purpose
Climate	■ Annual average precipitation and temperature data for humidity index, monthly data for climate chart	WorldClim [63]; http://www.worldclim.org/) [61]	To be used to calculate the humidity index according to [50].
Pedology	■ Soil texture according to ESDAC (European Soil Data Centre) ■ Soil type according to WRB [36]	The European Soil Database (ESDB v2.0 [45], from the European Soil Data Centre (ESDAC, http://www.eusoils.jrc.ec.europa.eu/wrb/) used datasets: ■ TXSRFDO (Dominant surface textural class) and WRBLV1 (World Reference Base for Soil Resources: Soil reference group) ■ Soil map of Iceland [57]	■ Indication of textural class 'no mineral texture (Peat soils)' with high share of organic material unsuitable for very shallow horizontal or vertical geothermal installations ■ Indication of soil types with limited suitability for very shallow horizontal or vertical geothermal installations (Histosols, Cryosols, Leptosols, Gleysols, Planosols)
Hydrology	■ Water table	Not available as pan-European dataset	Estimation procedure based on unsaturated conditions
Nature Conservation	■ Protection zones	Natura 2000 areas from the European Environment Agency European Environment Agency [60] and Nationally designated areas CDDA et al [60] European Environment Agency [59] for Iceland	Limited suitability criteria; legal constraints or complicated authorisation process for very shallow horizontal or vertical geothermal installations
Topography	■ Global 90 m SRTM data resampled to 500 m resolution (without Iceland) ■ Slope > 15°	Digital Elevation Model (DEM) from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM v4.1, http://srtm.csi.cgiar.org) in 90 m spatial resolution [62] and DEM3 (Auxiliary DEM of Iceland [58])	Limited suitability criteria; additional limited suitability criterion for installation, venting and operating of very shallow horizontal or vertical geothermal systems

La modellazione, dopo la raccolta dati, procede seguendo 4 *steps* riportati in *figura 32* attraverso l'identificazione di:

1. Criteri di esclusione e fattori limitanti
2. Caratteristiche idrogeologiche
3. Proprietà del suolo
4. Calcolo finale

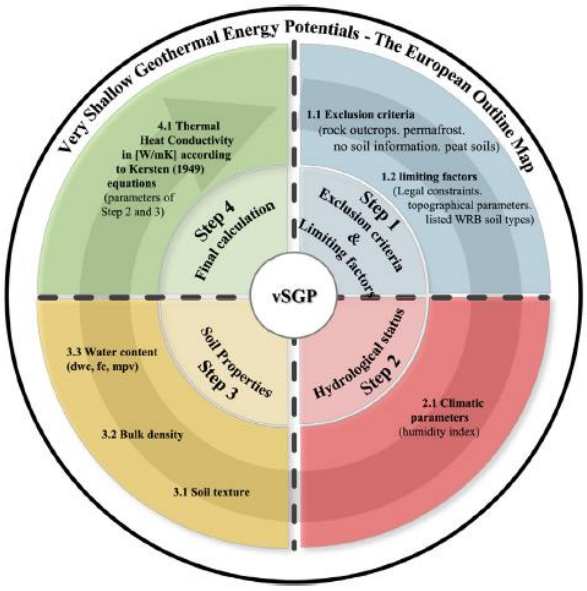

Figura 32 - Schema rappresentativo dell'approccio per il calcolo di vSGP (D.Bertermann et. al, 2014)

3.4.1.1 Criteri di esclusione e fattori limitanti

Nel primo step le aree che presentono condizioni non favorevoli allo sfruttamento della risorsa geotermica superficiale vengono escluse dall'analisi. L'inadattabilità dipende da condizioni del terreno come ad esempio terreni consolidati/rocce, affioramenti rocciosi, permafrost, siti in cui non è disponibile nessuna informazione sul suolo e suoli di torba.

Tra i fattori limitanti, invece, rientrano parametri quali ad esempio la pendenza del territorio che lo rende non idoneo quando presenta una pendenza superiore ai 15°. Questo valore deriva dalla difficoltà di installazione incontrate dalle compagnie verificatasi su casi reali.

La seconda limitazione deriva dalla classificazione dei territori fornita dall'*European Soil Databese* (ESDB) da cui si ricavano 4 categorie di suolo ritenute inappropriate per l'utilizzo del potenziale geotermico superficiale e che sono elencate di seguito:

- Istosuoli, aventi idoneità limitata a causa di una quota molto elevata di materiale organico, come ad esempio la torba),

-Criosuli, i quali vengono condizionati dalla presenza di brina e ghiaccio,

- Leptosuoli ritenuti non idonei a causa delle bassa profondità o delle caratteristica estremamente ghiaiosa,

-Gleisuoli, poiché fortemente influenzati delle acque sotterranee), e

- Planosuoli, la cui idoneità è limitata a causa di improvvise discontinuità materiche e acqua stagnante.

L'ultima limitazione è di tipo legale, poiché le aree naturali protette vengono escluse dall'analisi.

3.4.1.2 Stato idrogeologico del sistema

L'idrologia del territorio assume una particolare importanza in quanto il contenuto d'acqua aumenta proporzionalmente la quantità di calore geotermico generato dall'energia solare che attraversa il suolo per unità di tempo. Pertanto, le aree dove l'acqua scarseggia non vengono considerate nell'analisi.

Per lo studio, non avendo a disposizione mappe annuali di umidità, è stata applicata la metodologia di calcolo dell'"Indice di umidità" il quale viene espresso secondo 5 classi del suolo (arido, semi-arido, sub-umido, umido e per-umido).

Per le diverse classi, la formula per il calcolo assume espressioni diverse pur essendo enunciate in funzione di N, precipitazione annuale media espressa in cm, e T, temperatura annuale media espressa in gradi Celsius.

3.4.1.3 Proprietà del suolo

Nell'analisi le proprietà del suolo si riferiscono principalmente al quantitativo di materiale organico presente e alla dimensione delle particelle. Per la classificazione del suolo si utilizza il sistema USDA *Soil Taxonomy*, catalogazione elaborata dal Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti, la quale propone il triangolo riportato in *figura 33* come base di riferimento per l'analisi della tessitura del suolo. Pertanto, le cinque classi di *texture* del suolo dell'ESDB devono essere integrate con i quattro gruppi di *texture* principali (basate su 12 classi di *texture*) utilizzate nel sistema di classificazione USDA.

Da questa integrazione è possibile valutare la distribuzione della dimensione dei pori con i relativi parametri quali i valori di capacità d'aria (ca), la capacità di campo (fc) e il contenuto di acqua (dwc).

La densità apparente del terreno non consolidato ha un impatto sulla conduttività termica e viene presa in considerazione nella fase 4. Tuttavia, le informazioni paneuropee sulla densità apparente in diverse profondità non sono disponibili e poiché un'indagine a livello di area sulla stima della profondità della zona di roccia molle non è realizzabile, viene assegnato un valore pari a 1,3 g/cm^3 all'intera profondità.

3.4.1.4 Calcolo finale

La conduttività termica (TC) riflette l'abilità del terreno e del materiale roccioso molle di condurre calore e viene espressa in Watts su metro per Kelvin (W/m*K).

Per il calcolo è necessario riferirsi alla catalogazione mostrata in *figura 33*:

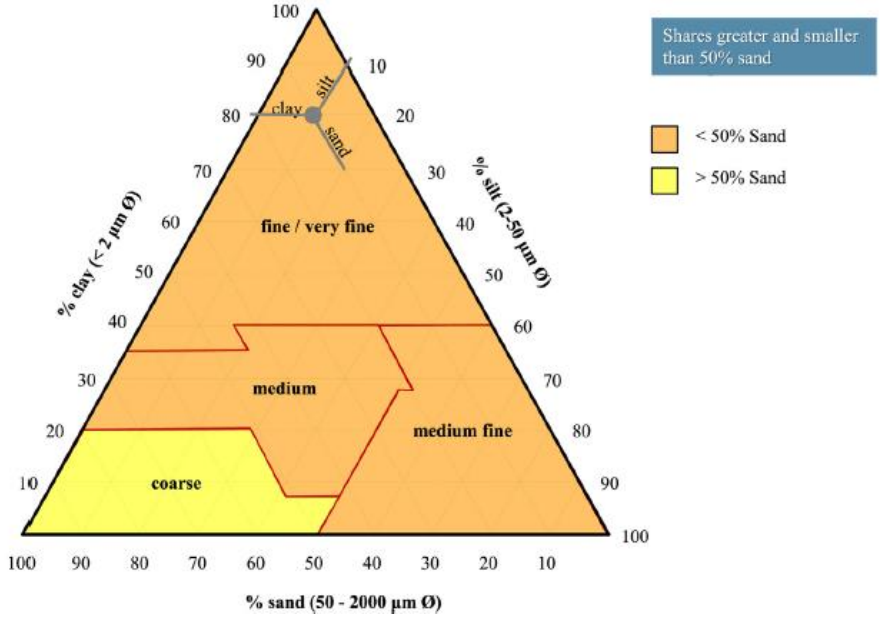

Figura 33 - Classificazione del suolo USDA (D.Bertermann et al., 2014)

Nel campo arancio, sono raccolti i materiali che presentano un contenuto di sabbia inferiore al 50 % e per il calcolo della conduttività termica di questa categoria la formula utilizzata è la seguente:

$$\lambda = 0.1442 \cdot \left(0.7 \cdot \left(log\frac{PSD}{BD}\right) + 0.4\right) \cdot 10^{(O.6243 \cdot BD)}$$

Mentre i materiali con percentuale sabbiosa che supera il 50%, rientranti nel campo giallo, la TC viene valutata con la seguente espressione:

$$\lambda = 0.1442 \cdot \left(0.9 \cdot \left(log\frac{PSD}{BD}\right) - 0.2\right) \cdot 10^{(O.6243 \cdot BD)}$$

Nelle formule è presente la dimensione dei pori (PSD - *Pore Size Distribution*) pari a

$$PSD = [Vol. - \%]$$

e la densità apparente (BD – *Bulk Density*) valutata in g/cm^3.

3.4.2 La mappa EOM

I risultati dell'analisi sul vSGP vengono raccolti in una mappa accessibile pubblicamente e può essere visualizzata in *ThermoMap MapViewer (http://thermomap.mapviewer.sbg.ac.at/)* ed è mostrata in *figura 34*:

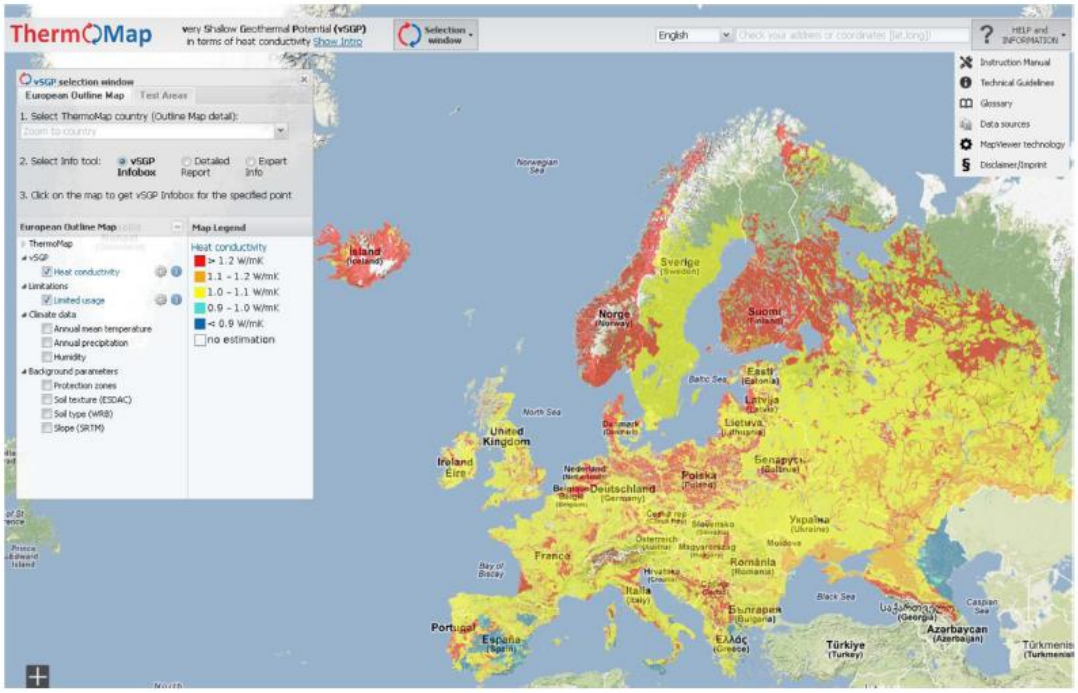

Figura 34 - Mappa EOM per il vSGP
(D.Bertermann et al., 2014)

In funzione dei valori di conduttività termica, che variano tra 0,8 W / m * K e 1,2 W / m * K, calcolati precedentemente, è possibile distinguere 5 classi rappresentate nella mappa graduata in cui si passa dal valore più basso di vSGP indicato in blu al valore più alto indicato in rosso; mentre per le zone escluse dall'analisi per le limitazioni già citate viene utilizzato il colore bianco.

3.5 Analisi del potenziale geotermico secondo Alcaraz et al. (2016)

La metodologia proposta da Mar Alcaraz et al. (2016) nasce dall'idea di mercato dei diritti di utilizzo del potenziale geotermico superficiale, come già stato fatto in precedenza da Danilov-Danilyan VI et al. per la risorsa idrica *("Markets of water and water management services in the world and the Russian Federation", 2015*) e prevede lo sfruttamento della risorsa geotermica in maniera efficiente, ovvero allocando e condividendo il potenziale geotermico tra appezzamenti adiacenti e definisce la posizione ottimale per l'installazione di nuovi scambiatori di calore evitando o almeno minimizzando l'interazione termica tra i diversi BHE.

Nel metodo la novità consiste nel considerare come unità base di gestione il *thermal plot*, ovvero la porzione di terreno da cui le parti interessate possono estrarre o dissipare la SGE.

Un concetto simile è stato applicato da Schiel et al. (2015) su scala regionale, metodologia di cui si parlerà in seguito.

Il *thermal plot* non è caratterizzato da una unità misurabile che è l'area in superficie, bensì dal potenziale termico che viene associato a ciascun appezzamento all'interno del territorio considerato; questo è dovuto al fatto che a *thermal plots* con la stessa area in superficie possono corrispondere potenziali geotermici diversi in funzione delle caratteristiche geologiche e idrogeologiche del territorio, oltre che della forma e orientazione del *plot*.

L'obiettivo del mercato dell'energia geotermica superficiale è quello di assegnare la risorsa in modo equo e sostenibile tra le entità coinvolte, tenendo in considerazione le questioni di protezione ambientale.

Vengono quindi distinti i *thermal plots* in attivi e passivi: nei primi il potenziale geotermico estratto soddisfa la domanda energetica dell'appezzamento, quando invece la richiesta energetica supera la disponibilità dell'appezzamento, il proprietario può ricorrere al mercato di utilizzo della risorsa e richiedere l'utilizzo della risorsa di un *plot* adiacente ed è in questo caso che si parla di *plots* passivi.

I risultati ottenuti vengono memorizzati all'interno del geodatabase e la piattaforma supporta anche l'aggiornamento di queste entità perché l'influenza dei

thermal plumes può cambiare in seguito all'alterazione diversi fattori come ad esempio la superficie piezometrica, la quale potrebbe subire modifiche a causa di cambiamenti del regime di pompaggio o di riaggiustamenti dei modelli concettuali geologici e idrogeologici, o, in alternativa, la velocità di riscaldamento inizialmente prevista per uno sfruttamento può essere adattata al tasso reale scambiato, se esiste un feedback adeguato tra il proprietario o l'installatore e l'amministratore.

3.5.1 MetroGeoTher

Anche in questo caso, la metodologia prevede l'utilizzo una piattaforma basata sul sistema GIS, chiamata MetroGeoTher, in grado di integrare all'interno del processo decisionale le proprietà geologiche e idrogeologiche del territorio, oltre che alla caratteristiche locali.

I parametri da inserire sono :

- la superficie piezometrica, la quale indica la quota di falda nella zona;
- il campo dei gradienti idraulici, il quale viene ricavato insieme alla direzione del flusso delle acque sotterranee dalle linee equipotenziali con cui viene rappresentata la falda;
- il campo di conducibilità idraulica
- la conduttività termica
- la dispersività termica nella direzione longitudinale e trasversale e
- i campi di capacità termica.

Si ricava inoltre il campo di velocità delle acque sotterranee, ottenuto secondo la legge di Darcy andando a moltiplicare il campo di conducibilità idraulica per il campo dei gradienti idraulici.

Quest'ultimo parametro di input è correlato al catasto, poiché i diagrammi catastali sono necessari per definire i grafici termici, pertanto è richiesto uno schizzo iniziale dei grafici registrati in un'indagine catastale.

Per ottenere il risultato finale vengono utilizzati criteri tecnici basati sulle soluzioni analitiche ottenute considerando le equazioni di trasporto di energia in un mezzo poroso.

Viene applicato il modello a sorgente lineare infinita in movimento il quale descrive il campo termico di un mezzo uniforme che si muove attraverso una sorgente lineare di calore fissa, già ampiamente utilizzato per risolvere le variazioni di temperatura causate dai *Boreholes Heat Exchangers* (BHE).

Nella piattaforma vengono implementate due equazioni sviluppate da Metzger et al. (*"Optimal experimental estimation of thermal dispersion coefficients in porous media", 2004)* e applicate agli scambiatori di calore da Molina-Giraldo et al. (*"Evaluating the influence of thermal dispersion on temperature plumes for geothermal systems using analytical solutions",2011)* rispettivamente per stato a regime costante e regime transitorio e sono riportate di seguito (le parentesi quadre indicano la natura spaziale della variabile, ovvero dati raster) :

$$[SGP] = \frac{\Delta T \cdot 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{[\lambda_x] \cdot [\lambda_y]}}{Exp\left(\frac{[v_D] \cdot \rho_w c_w \cdot x}{2 \cdot [\lambda_x]}\right) \cdot K_0\left(\frac{[v_D] \cdot \rho_w c_w}{2} \cdot \sqrt{\frac{[\lambda_x] \cdot x^2 + [\lambda_y] \cdot y^2}{[\lambda_x]^2 \cdot [\lambda_y]}}\right)}$$

$$[SGP] = \frac{\Delta T \cdot 4 \cdot \pi \cdot \sqrt{[\lambda_x] \cdot [\lambda_y]}}{exp\left(\frac{[v_D] \cdot \rho_w c_w \cdot x}{2 \cdot [\lambda_x]}\right) \int_0^{Limit} \frac{1}{\varphi} Exp\left(-\varphi - \frac{1}{\varphi}\left(\frac{x^2}{[\lambda_x]} + \frac{y^2}{[\lambda_y]}\right) \cdot \frac{([v_D] \cdot \rho_w c_w)^2}{16 \cdot [\lambda_x]}\right) d\varphi}$$

$$Limit = \frac{([v_D] \cdot \rho_w c_w)^2 t}{4 \cdot [\rho c][\lambda_x]}$$

Dove:

- $[SGP]$ è il potenziale geotermico superficiale per lunghezza della fonte di calore (W m^{-1})
- $[v_D]$ è la velocità della falda freatica (m s^{-1}), nota come velocità di Darcy
- x e y sono coordinate cartesiane (m)
- $\rho_w c_w$ è la capacità volumetrica di calore dell'acqua (J m^{-3} K^{-1}), la quale viene posta pari a 4,18*10^6 J m^{-3} K^{-1}

- $[\rho c]$ è la capacità termica volumetrica del mezzo poroso (J m^{-3} K^{-1})
- $[\lambda_{x,y}]$ è la conducibilità termica effettiva in direzione longitudinale / trasversale (W m^{-1} K^{-1}), la quale può essere ottenuta come:

$$[\lambda_{x,y}] = [\lambda_0] + [\alpha_{x,y}] \cdot \rho_w c_w \cdot [\nu_D]$$

Queste equazioni presentano 4 incognite legate tra loro, ovvero l'incremento di temperatura (ΔT) che ad una specifica distanza $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ prodotto dal potenziale SGP estratto in un intervallo di tempo t dall'inizio delle operazioni, pari alla durata massima delle operazioni di riscaldamento o raffreddamento annuali.

Quindi il progettista deve definire tre delle quattro variabili per ottenere la quarta.

Viene posta una soglia alla temperatura per tener conto delle incertezze riguardo la geologia e l'idrogeologia del territorio, ad esempio per modelli mal definiti (come territori per i quali le eterogeneità non sono caratterizzati idoneamente) il valore di questo coefficiente di sicurezza è inferiore a 0,5 K.

Per garantire un'integrazione ottimale delle informazioni relative al mezzo sotterraneo, viene inserito anche un database geospaziale completo, denominato HYDOR, il quale memorizza i dati geologici, idrogeologici, idrochimici e idrofisici, nonché le loro interpretazioni.

In *figura 35* sono riportati alcuni dettagli dei componenti del database direttamente correlati alla gestione geotermica superficiale e le principali caratteristiche della sua struttura:

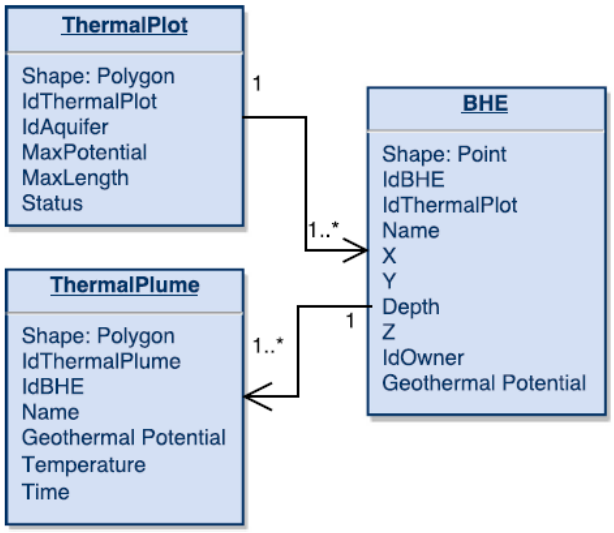

Figura 35 - Componenti del geodatabase HYDOR (M. Alcaraz et al., 2016)

Nel database geospaziale, ogni sfruttamento è rappresentato correttamente da un'entità di tipo punto denominata BHE delineato dai suoi attributi principali che sono le coordinate geografiche, il potenziale geotermico superficiale estratto (SGP) e altre informazioni amministrative.

Per quanto riguarda l'area interessata di ogni sfruttamento, vengono prese in considerazione due entità di tipo poligonale, ovvero i *Thermal Plots* e i *Thermal Plumes*.

I primi indicano il limite dei lotti termici dei proprietari al di fuori dei quali lo sfruttamento non deve produrre affezioni termiche, mentre i secondi rappresentano il plume termico stimato dello sfruttamento che dovrebbe essere immagazzinato per riflettere una prima valutazione delle affezioni termiche.

I suddetti set di dati (BHE, *ThermalPlots* e *ThermalPlumes*) sono dati vettoriali e il database geospaziale memorizza come dati raster anche i dati di input richiesti da *MetroGeoTher Tools*.

Nella piattaforma sono inclusi strumenti che consentono di effettuare un'analisi spaziale tenendo in considerazione gli effetti degli sfruttamenti geotermici.

3.5.1.1 Strumento curva caratteristica termica (TCC)

Questo strumento permette di generare la curva caratteristica termica (TCC) per il *thermal plot* di interesse. Questo grafico rappresenta la relazione tra l'SGP estratto da un BHE e la lunghezza e la larghezza dell'influenza termica, ovvero SGP in funzione di r, già definiti precedentemente.

La TCC rappresenta il massimo potenziale geotermico superficiale che induce uno specifico incremento termico sulla parete del BHE.

Prima di utilizzare la TCC, è necessario definire il *thermal plot*, nonché la distanza massima disponibile al suo interno (*figura 36a*).

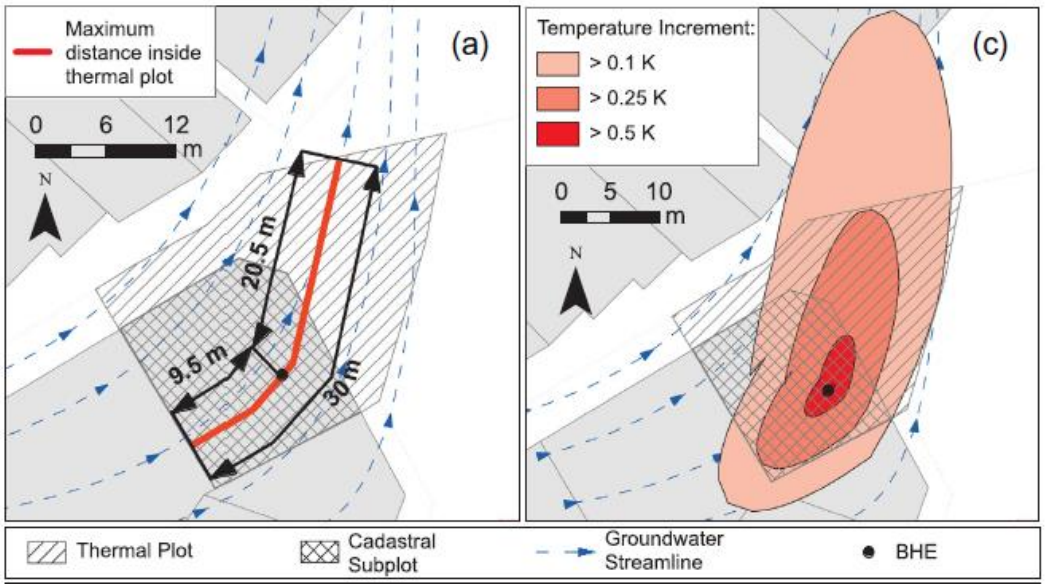

Figura 36 - a) Rappresentazione del Thermal Plot con la massima distaza misurabile con il relativo strumento GIS. c)Rappresentazione del thermal plumes per diversi valori di temperatura. (M. Alcaraz et al., 2016)

In *figura 35(a)* viene mostrata la direzione delle acque sotterranee (linee blu tratteggiate); la sottotrama catastale (area tratteggiata) è stata ridefinita per creare il *thermal plot* (semplice area tratteggiata) estendendo il suo limite nella direzione del flusso di acque sotterranee su un'area pubblica. La distanza massima disponibile all'interno di questo diagramma termico è di 30 m.

A questo punto, selezionando il grafico termico sulla mappa, ulteriori parametri idraulici e termici vengono estratti dai dati raster per generare la TCC, come quella mostrata in *figura 36(b)*.

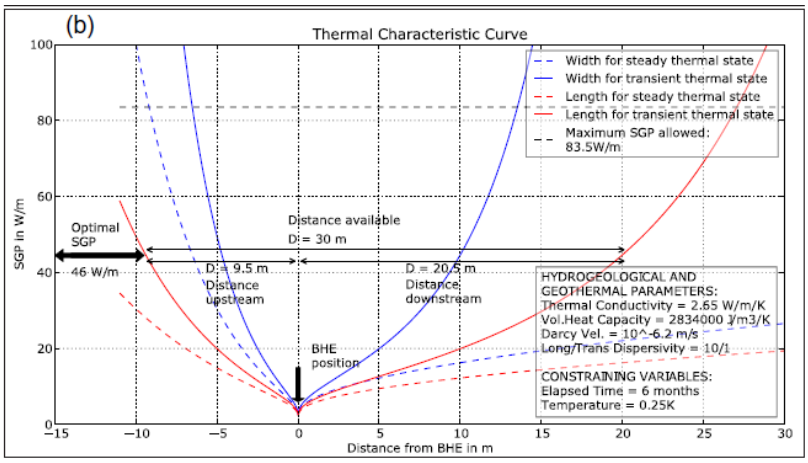

Figura 36 – b) Rappresentazione della curva termica caratteristica (TCC) valutata per il thermal plot di figura 35(a) (M. Alcaraz et al., 2016)

Il massimo SGP per un BHE all'interno di questo grafico può essere ottenuto da questa TCC : la linea orizzontale che rappresenta una distanza di 30 m fissa un SGP di 46 W / m. Anche le distanze a monte e a valle del BHE sono definite graficamente (9,5 e 20,5 m).

La TCC può essere utilizzato in entrambe le direzioni. Da un lato, il massimo SGP che non influenza i grafici adiacenti può essere ottenuto se le dimensioni massime di lunghezza e larghezza disponibili sono note all'interno del diagramma termico. Queste distanze possono essere ottenute con strumenti GIS nativi sulla mappa, secondo la direzione della falda freatica e l'orientamento della trama. Ulteriori restrizioni devono essere prese in considerazione per quanto riguarda la fattibilità del luogo di installazione dei BHE. D'altra parte, il TCC mostra la lunghezza e la larghezza del disturbo termico causato da un SGP specifico.

3.5.1.2 Strumento Plume termico

Questo strumento disegna sulla mappa il *plume termico* originato da un BHE.

Devono essere stabilite tre variabili vincolanti per calcolare la forma del *thermal plume*: l'incremento di temperatura (ΔT) a un tempo trascorso (t) causato da un potenziale estratto (SGP).

Per le prime due variabili vincolanti posso essere utilizzati gli stessi valori considerati per la creazione del TCC, mentre il valore del potenziale è stato ottenuto in precedenza proprio con lo strumento TCC.

Una volta stabilite queste tre variabili vincolanti, è possibile selezionare un possibile punto per la foratura del BHE all'interno del diagramma termico in base alle distanze a monte e a valle. Cliccando su questo punto, apparirà il *thermal plume* con l'asse centrale adattato alla linea di flusso del flusso di acque sotterranee a partire dal BHE.

In *figura 36(c)* vengono rappresentate le affezioni termiche tracciate per diverse soglie di incremento della temperatura. Ad esempio, il *thermal plume* che rappresenta un disturbo di temperatura superiore a 0,25 K verrebbe assegnato all'interno del *thermal plot*, consentendo la valutazione del disturbo termico nei grafici adiacenti.

3.6 Analisi del potenziale geotermico secondo Miglani et al. (2017)

Una metodologia viene proposta anche da Miglani et al. (2017) per il calcolo a lungo termine del potenziale geotermico superficiale di un quartiere urbano.

L'obiettivo principale del lavoro è quello di sviluppare un metodo per il posizionamento e il dimensionamento ottimale dei BHE in un'area urbana in grado di soddisfare il fabbisogno energetico degli edifici, facendo particolare attenzione alle limitazioni di profondità di perforazione e i limiti di spazio degli appezzamenti considerati

Per simulare il funzionamento a lungo termine dei BHE viene utilizzato un modello analitico ma il contributo fondamentale fornito da tale metodo consiste nel tener conto anche dell'interferenza termica tra BHEs vicini nel processo di modellazione così da avere una valutazione più accurata del potenziale geotermico superficiale.

Il metodo consiste in un *workflow* di tre steps rappresentati in *figura 37*:

- Calcolo del fabbisogno termico
- Dimensionamento dei BHEs
- Funzionamento dei BHEs

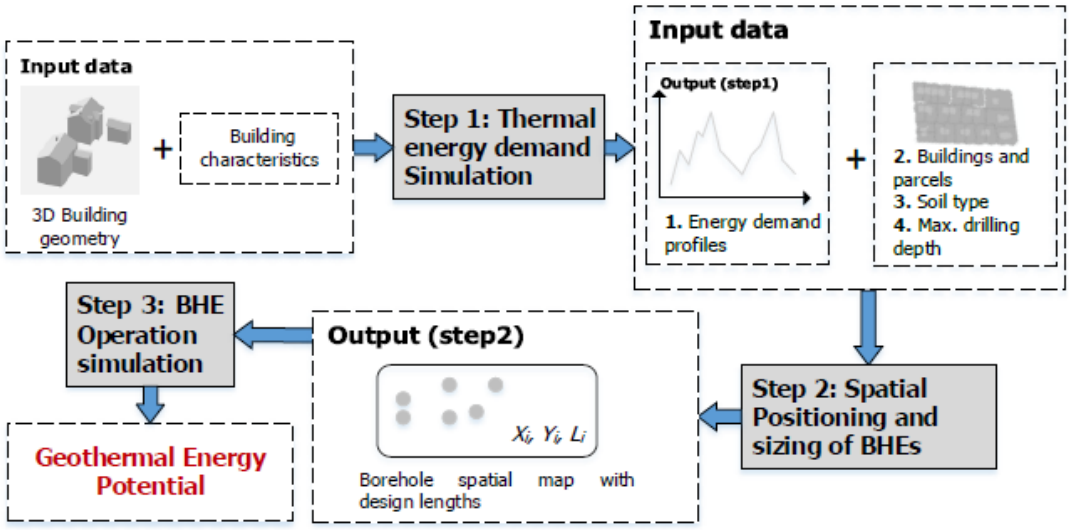

Figura 37 - Schema rappresentativo della metodologia e valori di input e output dell'analisi (S.Miglani et al., , 2017)

Nel primo step si procede al calcolo dell'energia termica totale richiesta da ciascun edificio considerato.

Per far ciò la struttura viene modellata tridimensionalmente tenendo conto delle caratteristiche specifiche così da calcolare le zone termiche nell'edificio così come gli effetti di ombreggiatura degli edifici circostanti e vengono considerati anche dati in merito al clima, all'estensione degli appezzamenti considerati, alle tipologie di suolo e alle limitazioni di profondità di scavo.

Il calcolo della domanda termica si ottiene andando a considerare una simulazione energetica dinamica dell'edificio, in altre parole la domanda viene calcolata su base oraria per l'intero anno utilizzando un approccio sviluppato da Wang e al. (*D. Wang, K. Orehounig, J. Carmeliet, "Dynamic building energy demand modelling at urban scale for the case of Switzerland", 2016*); questo approccio si serve di *EnergyPlus*, un programma di simulazione che rappresenta per ciascun edificio gli orari di occupazione, le impostazioni del termostato, i tassi di infiltrazione, etc…

Il seconde step prevede, come già detto, la progettazione dei BHEs; questa operazione viene suddivisa in un primo posizionamento all'interno del sito considerato dello scambiatore di calore seguito dal dimensionamento necessario a soddisfare le domanda di calore dell'edificio stesso.

Nel posizionamento vengono rispettati limiti spaziali, come ad esempio una distanza minima di 5 metri tra ciascuna perforazione, come prescritto dagli standard svizzeri così da minimizzare gli effetti di interferenza termica. Si ottiene, quindi, una matrice regolare di punti posizionata all'interno dell'area ammissibile dell'appezzamento valutata nello step precedente e a ciascun punto vengono assegnati la tipologia di suolo e la massima profondità di scavo.

Si passa quindi al dimensionamento vero e proprio dei BHEs e in particolare della loro lunghezza valutata con metodo ASHRAE (*S. Kavanaugh, K. Rafferty, "Geothermal heating and cooling : design of ground-source heat pump systems", 2015*) e semplificato da Bernier con l'espressione seguente:

$$L_h = \frac{q_h R_b + q_y R_{10y} + q_m R_{1m} + q_h R_{6h}}{T_{mf} - (T_{gr,\infty} + T_p)}$$

dove L_h è la lunghezza di progetto del BHE per il ciclo di riscaldamento; q_h, q_y, q_m sono rispettivamente il picco orario, la media annuale e il picco mensile dei carichi di terra in W. $R_b, R_{10y}, R_{1m}, R_{6h}$ sono rispettivamente la resistenza termica del foro e le resistenze termiche a terra effettive per un impulso di 10 anni, un mese e 6 ore in mK/W. $T_{mf}, T_{gr,\infty}, T_p$ sono rispettivamente la MFT (*Mean Fluid Temperature*) nel tubo a U del BHE, la temperatura del terreno indisturbato e la temperatura di penalizzazione in K la quale rappresenta il raffreddamento medio al suolo al termine della vita del BHE e consente di includere gli effetti del raffreddamento a terra nel processo di progettazione.

Si giunge quindi all'ultimo step: dopo aver dimensionato i BHEs e determinato la loro distribuzione spaziale si passa alla determinazione del funzionamento degli scambiatori ottenuta grazie alla simulazione con un modello matematico.

La simulazione viene fatta per ciascun BHE considerando una base oraria per 10 anni, questo arco di tempo viene scelto perché alla fine della decade la MFT arriva ad un valore costante, come mostrato in *figura 38*:

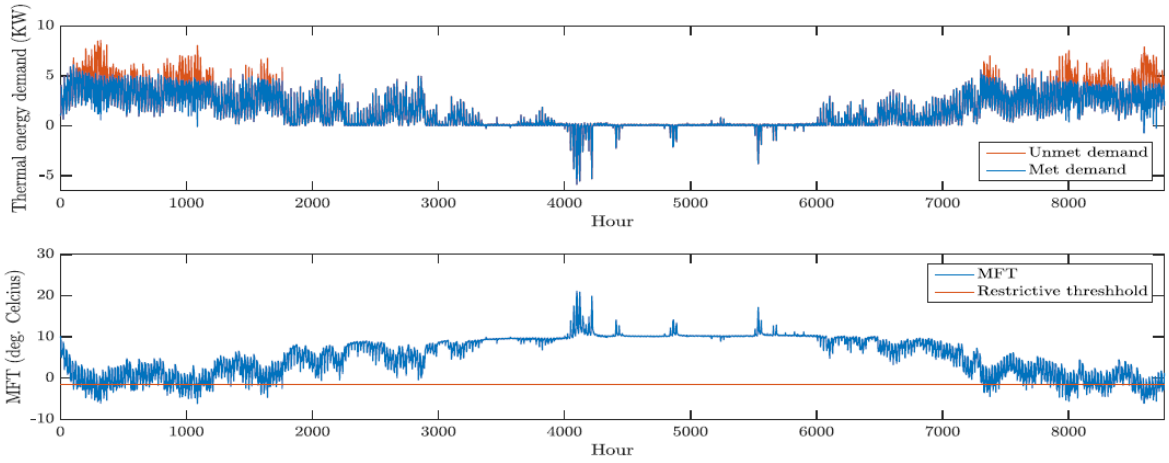

Figura 38 - Domanda di riscaldamento/condizionamento oraria e variazione del MFT per il singolo BHE nel primo anno di operatività
(S.Miglani et al., , 2017)

L'obiettivo è il calcolo della *g-function*, ovvero il fattore di risposta termica adimensionale tramite l'espressione seguente sviluppata da Lamarche e Beauchamp su un modello FLS, ovvero a sorgente lineare finita:

$$g(t^*, \beta) = \int_{\beta}^{\sqrt{\beta^2-1}} \frac{erfc(yz)}{\sqrt{z^2-\beta^2}} dz - D_A - \int_{\sqrt{\beta^2+1}}^{\sqrt{\beta^2+4}} \frac{erfc(yz)}{\sqrt{z^2-\beta^2}} dz - D_B$$

$$\beta = \frac{r}{L}; \qquad t^* = \frac{t}{t_s}; \; t_s = \frac{L^2}{9\alpha}$$

Dove r è la distanza radiale dal centro del BHE, L è la lunghezza del BHE, t è il tempo e α è la diffusività termica del terreno che circonda il BHE. DA e DB sono funzioni dipendenti dal tempo e dalla lunghezza del BHE.

Per definizione, le funzioni g consentono il calcolo della risposta di temperatura di un BHE solo a un impulso di calore a gradini ma la richiesta di riscaldamento varia nel tempo, il che rende necessario convertire il profilo che varia nel tempo nella sovrapposizione temporale di vari impulsi di calore a gradini.

Questo viene fatto usando l'espressione seguente:

$$T_b(t_n) - T_{gr,\infty} = \sum_{i=1}^{n} \frac{(Q_i - Q_{i-1})}{2\pi k L} g\left(\frac{t_n - t_{i-1}}{t_s}, \frac{r_b}{L}\right)$$

Dove Q_i è l'impulso di calore per la fase temporale ti ∀ i ∈ (1, n), n è il numero totale di impulsi di calore, r_b è il raggio della parete di confine BHE, e T_b è la temperatura alla parete di confine BHE.

Questo calcolo viene eseguito per ogni istante di tempo (t_n) per creare una curva di evoluzione oraria uniforme di T_b.

La sovrapposizione spaziale viene applicata per calcolare la temperatura della parete del BHE tenendo conto dell'interferenza termica dei BHE vicini la quale afferma che la risposta termica di un dato BHE è uguale alla sovrapposizione delle rispettive risposte termiche dei BHE vicini, ciascuna calcolata al centro del dato BHE.

Il principio di sovrapposizione può essere scritto in termini di *temperature response* come descritto dall'espressione seguente:

$$T_{ave,r_b,i} = T_{ave,r_b,i|g_i(r=r_b,t),Q_i} + \sum_{\forall j \neq i} T_{ave,r_{ji},j|g_j(r=r_{ji},t),Q_j}$$

Dove T_i è la risposta alla temperatura netta del BHE i-esimo e dei BHE vicini. $T_i|_{gi\,(r=rb,t),Qj}$ è la temperatura di risposta dell'i-esimo BHE calcolata a $r = r_b$ e con l'impulso termico Q_i. r_{ji} rappresenta la distanza tra il j- esimo BHE e l'i-esimo BHE.

Successivamente, viene utilizzata l'equazione riportata di seguito per il trasferimento di calore a regime stazionario tra il fluido termovettore nel tubo a U e la superficie di confine dello scambiatore per calcolare l'MFT che varia nel tempo:

$$T_{mf}(t) = T_b(t) - \frac{Q(t)R_b}{L}$$

Dove $T_{mf}(t)$, è la MFT nel tubo a U, $Q(t)$ è l'energia termica netta scambiata dal dato BHE sia come funzioni del tempo che di L, la lunghezza del dato BHE.

R_b rappresenta la resistenza termica della boiacca ovvero il materiale di riempimento del pozzo di scavo che separa il tubo a U contenente il fluido termovettore e il terreno circostante e per motivi di semplicità il valore viene posto pari a 0,17.

Questa temperatura non può scendere al di sotto di -1,5 ° C e quindi questa restrizione può comportare una parte della richiesta di calore non soddisfatta; invece non essendoci limiti superiori al valore di MFT, la domanda di raffreddamento è sempre soddisfatta.

Ottenuta quindi la MFT variabile nel tempo, quest'ultima viene utilizzata per calcolare la richiesta di calore non soddisfatta.

Infine, il potenziale annuale a lungo termine dell'energia geotermica viene calcolato aggregando per l'intero anno la domanda di riscaldamento soddisfatta.

3.7 Analisi del potenziale geotermico secondo Schiel et al. (2016)

Questo metodo, sviluppato da Schiel et al. (2016) risulta essere semplice in esecuzione a scala locale e si basa sulla richiesta di energia termica per il riscaldamento degli ambienti e per l'acqua calda di un edificio e sul potenziale specifico di ciascun appezzamento che può essere estratto dal sottosuolo.

Il potenziale viene valutato su ciascun lotto attraverso un approccio geografico che prevede l'utilizzo dello strumento GIS; dopodiché viene applicato un metodo di campionamento per determinare quanti pozzi di trivellazione potrebbero adattarsi a ciascun appezzamento e determinare quale percentuale della domanda di energia può essere fornita dall'energia geotermica.

Il potenziale globale di calore estraibile in roccia è espresso come calore specifico estratto (sHE) misurato in Watt per metro di lunghezza del pozzo che contiene lo scambiatore di calore. Questo valore dipende da fattori come la mineralogia, ovvero il tipo di roccia, la porosità, in quanto maggiore porosità abbassa i valori di potenziale, e la presenza di acque sotterranee poiché l'acqua freatica facilita il trasferimento di calore.

I valori SHE vengono poi combinati per ciascuno degli strati di roccia in qualsiasi posizione così da determinare la quantità di potenziale energetico disponibile in quel punto fino alla massima profondità di perforazione consentita.

Questo metodo si avvale di dati facili da acquisire e di risoluzione superiore rispetto agli studi precedenti e la sua semplicità matematica nonché la facile integrazione con il sistema GIS lo rendono idoneo alla mappatura del potenziale geotermico su larga scala.

I risultati ottenuti mostrano che c'è una minore domanda di energia per il riscaldamento nei tipi di insediamenti residenziali e questi sono più propensi a soddisfare il fabbisogno energetico attraverso l'energia geotermica usando un solo foro, mentre gli edifici a maggiore richiesta di energia corrispondenti a tipi di insediamenti come il centro città hanno meno probabilità di soddisfare la richiesta di energia senza richiedere un numero irrealistico di perforazioni per farlo.

Di conseguenza lo schema urbano dovrebbe anche essere preso in considerazione per la pianificazione futura in quanto l'organizzazione dei lotti e degli edifici influisce sulla possibilità o meno di installare il numero richiesto (o un numero realistico) di pozzi per soddisfare la domanda di energia.

3.7.1 Metodologia

Il metodo prevede diverse fasi di calcolo suddivise nei 4 steps riportati di seguito in *figura 39*:

- calcolo del calore richiesto;
- calcolo del calore specifico estratto;
- calcolo della percentuale di calore richiesto soddisfatta dall'energia geotermica in ciascun lotto;
- riduzione potenziale di CO_2 dovuta all'utilizzo di risorsa geotermica per acqua calda e riscaldamento.

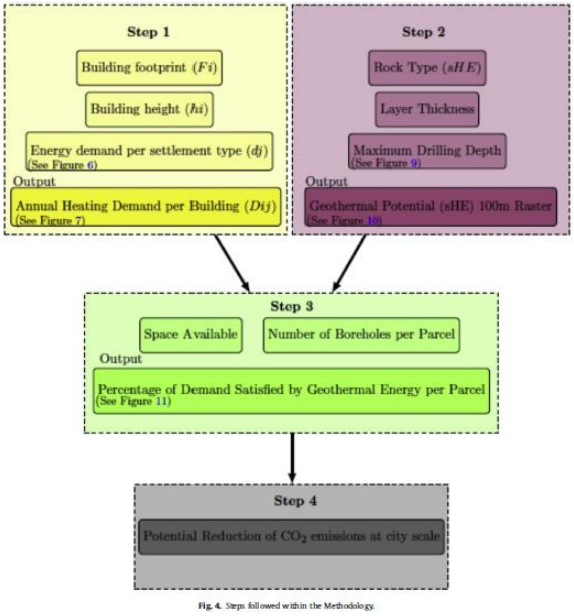

Figura 39 - Step seguiti nella metodologia per il calcolo del potenziale geotermico a scala locale (K.Schiel et al., 2015)

3.7.1.1 STEP 1:
Calcolo della domanda di energia termica

Per prima cosa è necessario calcolare il fabbisogno energetico per riscaldamento degli ambienti e acqua calda per ciascun appezzamento in base al volume dell'edificio e ai valori energia richiesta associata a ciascun tipo di insediamento in cui l'edificio cade.

Per tipo di insediamento si intende una combinazione di diversi tipi di edifici all'interno di una determinata area, e le principali tipologie sono riportate nella *tabella* seguente:

Tabella 4 - Domanda termica delle diverse tipologie di insediamento (K.Schiel et al., 2015)

Settlement types	Description	GWh/km^2a	kWh/m^2a
ST 1	Loose open development	25.5	57.7
ST 2	1 and 2 family house settlement	45.6	111.6
ST 3	Village core	52.5	85.0
ST 4	Terraced houses	42.5	62.6
ST 5a	Small apartment buildings	64.5	130.9
ST 5b	Small and medium apartment buildings	78.5	181.1
ST 6	Skyscrapers	101.3	145.7
ST 7a	Loose block developments	104.3	158.9
ST 7b	Dense block developments	106.5	157.2
ST 8	City buildings	117.8	102.3
ST 9	Historical old town	101.2	170.0
ST 10a	Large special public buildings	101.7	207.1
ST 11b	Commercial and service buildings	125.3	913.7

I dati necessari per il calcolo sono l'impronta del palazzo, indicata con F_i, l'altezza del palazzo considerato, hi, e il fabbisogno energetico di ciascun palazzo, ovvero dj.

Come si può vedere dalla tabella, ciascuna tipologia di insediamento ha un valore di densità del consumo di calore annuale misurata in GWh/a e in base all'area totale di ciascun tipo di insediamento viene calcolato un valore per chilometro quadrato (GWh / km2). Questo valore viene quindi convertito in un valore relativo al singolo edificio in base alle dimensioni di quest'utlimo e al tipo di insediamento in cui cade, trovando quindi il valore in kWh/m2a.

Il fabbisogno energetico per riscaldamento e acqua calda dell'edificio (D_{ij}) è stato calcolato come segue:

$$D_{ij} = 1{,}2 d_j A_i$$

dove d_j è la richiesta di riscaldamento associata a un particolare tipo di edificio in kWh / m2a, e A_i è l'area totale di un edificio. A questo valore viene poi aggiunto il 20% di questa domanda così da tenere conto dell'energia supplementare necessaria per l'acqua calda, assunzione fatta in seguito a misure locali.

L'area dell'edificio viene valutata con la seguente equazione:

$$A_i = F_i n_i$$

dove F_i rappresenta l'area del palazzo mentre n_i rappresenta il numero di piani nell'edificio.

Quest'ultimo valore viene calcolato usando l'espressione seguente:

$$n_i = 0{,}32(h_i - 2{,}5\ m)$$

dove h_i rappresenta l'altezza del palazzo in metro la quale viene moltiplicata per il coefficiente 0,32 che equivale a un'altezza media del piano di 3.125 m e a cui vengono sottratti 2,5 m, valore che tiene conto dello spazio sul tetto che non necessita di riscaldamento.

3.7.1.2 STEP 2: Calcolo del potenziale di energia geotermica

In secondo luogo, il potenziale specifico di estrazione del calore del sottosuolo è stato calcolato utilizzando dati di sondaggio interpolati (valutati per diversi tipi di roccia e spessori di strato), insieme alla massima profondità di perforazione consentita, al fine di determinare la quantità di energia che potrebbe essere estratta fino alla profondità massima di perforazione.

Per questa operazione si parte da un insieme di punti aventi coordinate x, y e a ciascun punto vengono associati dati di input tra cui l'elevazione, la profondità della base di ogni formazione geologica, la petrografia, la stratigrafia e la profondità di perforazione massima ammissibile in ciascun punto così da sviluppare un modello tridimensionale.

L'estrazione termica specifica (sHE) di ogni strato può essere valutata moltiplicando lo spessore dello strato considerato per il valore sHE indicato nelle linee guida VDI (*Verein Deutsche Ingenieure*) relativo al tipo di roccia che meglio si adatta alla formazione considerata e sommando i valori per ogni livello fino alla profondità massima consentita. I valori tipici sono compresi tra i 40 e i 70 W/m.

I valori specifici di estrazione del calore per i tipi di roccia generali, come determinato dalla VDI, vengono riportati in *tabella 5* e sono relativi a 2400 h di funzionamento delle pompe di calore:

Tabella 5 - Calore specifico estraibile da uno scambiatore di calore (4640 Richtline VDI)

General guideline values	Specific heat extraction (W/m) for 2400 h
Underground(λ = thermal capacity)	
Poor underground (dry sediment) ($\lambda < 1.5$ W/(m.K))	20
Normal rocky underground and water saturated sediment ($\lambda < 1.5–3.0$ W/(m.K))	50
Consolidated rock with high thermal conductivity ($\lambda > 3.0$ W/(m.K))	70
Individual Rocks:	
Gravel, sand, dry	<20
Gravel, sand, saturated water	55–65
For strong groundwater flow in gravel and sand, for individual systems	80–100
Clay, loam, damp	30–40
Limestone (massif)	45–60
Sandstone	55–65
Siliceous migmatite (e.g. granite)	55–70
Basic migmatite (e.g. basalt)	35–55
Gneiss	60–70

*The values can vary significantly due to rock fabric such as crevices, foliation, weathering, etc.

Questi valori possono variare anche in maniera significativa per la struttura della roccia influenzata da fessure, foliazioni, agenti atmosferici, etc…

Il potenziale totale sHE, derivato da questi parametri, viene poi moltiplicato per 2400 ore di lavoro del sondaggio all'anno, così da ottenere un potenziale annuale sHE in ciascun punto (valori in MWh / a).

3.7.1.3 STEP 3: Domanda soddisfatta dall'energia geotermica per lotto

Passando allo step 3, i valori di fabbisogno energetico di ciascun edificio (Dij) e il potenziale estraibile di calore dell'appezzamento corrispondente sono stati utilizzati, insieme ai risultati di un processo di campionamento, per determinare il numero di pozzi che possono essere installati in ciascun appezzamento, il numero e la lunghezza dei pozzi necessari per soddisfare il fabbisogno energetico dell'appezzamento, nonché la percentuale del fabbisogno energetico che potrebbe essere soddisfatta dall'energia geotermica superficiale nel lotto considerato.

Lo spazio disponibile per l'installazione di pozzi corrisponde allo spazio lasciato su un lotto una volta che l'edificio e una zona cuscinetto di 3 m attorno all'appezzamento vengono rimossi.

Quindi, con la procedura di campionamento, viene posizionata casualmente una griglia regolare di punti distanziati di 6 m oltre lo spazio disponibile Questa procedura viene ripetuta diverse volte e per ciascuna iterazione viene valutato il numero di pozzi ricadenti all'interno del poligono di terreno considerato.

Viene scelto quindi il numero minimo di sondaggi contati all'interno di ciascun pacco, così da eliminare i poligoni con forme strane e le aree molto piccole che non sono realisticamente utilizzati per l'installazione di pozzi.

Trovato il numero di pozzi che possono adattarsi all'appezzamento, supponendo che tutti i pozzi sarebbero stati perforati alla profondità massima consentita per la perforazione, è possibile calcolare il valore percentuale della domanda di energia cercato.

3.7.1.4 STEP 4: Riduzione potenziale delle emissioni di CO_2

Per valutare la riduzione delle emissioni di CO2 innanzitutto è necessario moltiplicare il consumo di energia per riscaldamento e acqua calda per le relative emissioni di CO2 (misurate in grammi di CO2 all'anno).

A questo valore viene sottratta la CO2 derivante dall'uso della pompa di calore, così da ricavare la percentuale di riduzione potenziale delle emissioni inquinanti nel caso si utilizzasse tutta l'energia geotermica possibile.

3.8 Metodo G.POT

Il metodo proposto da Schiel et al. (2016) non tiene, però, in considerazione gli aspetti spaziali del problema come ad esempio l'interferenza termica tra pozzi vicini e gli aspetti temporali del funzionamento a lungo termine del sistema: entrambi fattori che influenzano il valore del potenziale geotermico, così come non viene tenuta in conto la temperatura del terreno ma solo la litologia.

E' stata quindi sviluppata una nuova metodologia da Casasso & Sethi (2016), chiamata G.POT, che tiene conto di questi ulteriori fattori.

Il G.POT rappresenta uno strumento generale per la definizione su larga scala del potenziale geotermico superficiale, indicato con Q_{BHE} e permette di definire l'idoneità del terreno all'installazione di pompe di calore geotermiche.

Il metodo permette di valutare il potenziale in modalità operativa o di raffreddamento o di riscaldamento e nel caso in cui l'impianto avesse una modalità operativa duale, si considera quella prevalente.

Gli studi già citati rappresentano la base per lo sviluppo di questo approccio quantitativo grazie al quale è possibile determinare in maniera semplice ed efficace il carico termico medio annuo che può essere scambiato in maniera sostenibile da un *Borehole Heat Exchanger* (BHE) di lunghezza L durante la fase di raffreddamento o riscaldamento, ovvero il massimo valore del carico termico medio che può essere iniettato nel terreno o estratto da esso senza congelamento o eccessivo riscaldamento del fluido termovettore per l'intera vita utile del sistema.

Il potenziale geotermico superficiale rappresenta un indicatore di convenienza economica per l'installazione dei BHE necessari a fornire il carico termico richiesto, infatti a potenziale geotermico maggiore corrispondono profondità di scavo dei BHE minori e quindi minor tempo di recupero dell'investimento per la pompa di calore rispetto alle altre tecnologie.

Il metodo sostanzialmente fornisce una relazione empirica per il calcolo del Q_{BHE} in modalità di raffreddamento o riscaldamento in funzione di parametri fondamentali quali le proprietà termiche del terreno, le proprietà termiche e geometriche dei BHE e la minima (massima) temperatura del fluido termovettore durante il riscaldamento (raffreddamento), indicata con T_{lim}.

E' necessario definire quindi per il terreno i valori di conduttività termica (λ), capacità termica (ρc) e temperatura del terreno indisturbato (T_o), parametri per i quali deve essere determinata una variabilità spaziale. Per il BHE, invece, vengono stabiliti i valori di lunghezza (L), raggio dello scambiatore (r_b) e resistenza termica (R_b).

Inoltre devono essere fissate tempistiche quali la lunghezza della stagione di riscaldamento (o raffreddamento) indicata con t_c e il tempo di simulazione (t_s), ovvero il tempo in cui verrà valutata la sostenibilità del geo-scambio.

Alla relazione finale si giunge utilizzando una serie completa di simulazioni analitiche per il trasferimento del calore facendo variare i parametri sopracitati e fissando delle assunzioni per il calcolo del potenziale geotermico, ovvero:

- Il terreno è assunto come omogeneo
- Il carico termico del BHE è assunto annualmente ciclico ed è rappresentato da un profilo emisinusoidale
- Il BHE viene modellato come una sorgente di calore lineare di lunghezza infinita, in altre parole il flusso di calore è puramente radiale, come espresso da Carslaw e Jaeger ("*Conduction of heat in solids*", 1959)
- Per il trasferimento di calore tra fluido e BHE viene assunto il modello di Claesson e Eskilon basato sulla resistenza dello scambiatore ("*Conductive heat extraction to a deep borehole:thermal analyses and dimensioning rules*",1988)
- La temperatura minima (o la massima per la modalità di raffreddamento) raggiunta dal fluido termovettore è assunta pari a T_{lim}.

3.8.1 Funzione di carico termico di riferimento

La funzione di carico termico per unità di lunghezza, indicata con *q(t)* (Wm-1), come già detto, è assunta con una forma emisinusoidale e con un ciclo annuo che si ripete per tutta la vita utile del BHE, ovvero t_s, come mostrato in *figura 40*:

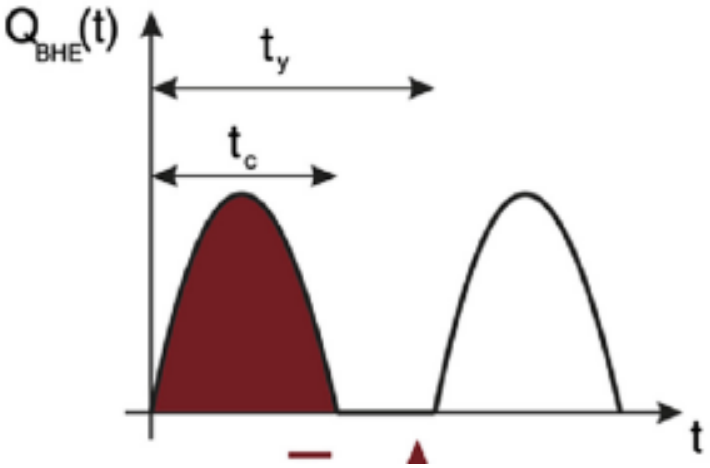

Figura 40 - Funzione di carico termico assunta con forma emisinusoidale per un ciclo termico annuale (Casasso & Sethi, 2016)

La scelta della forma emisinusoidale non è casuale poiché grazie ad essa è possibile rappresentare nel miglior modo possibile il carico termico dell'impianto di raffreddamento o riscaldamento dell'edificio, il quale viene influenzato dalla temperatura esterna.

Nel ciclo annuale ad una prima fase di carico avente una durata indicata con t_c, ovvero la durata della stagione di raffreddamento o riscaldamento, durante la quale il calore viene scambiato con il terreno, segue una fase di recupero, durante il quale il carico termico è pari a zero.

La funzione viene espresse dalla seguente espressione:

$$q(t) = \begin{cases} q_{max} \cdot \sin\left(\pi \dfrac{t}{t_c}\right) & \text{per } \ 0 \le t \le t_c \\ 0 & \text{per } \ t_c \le t \le t_y \end{cases}$$

dove t_y è posto uguale a 1 anno.

Questa funzione rappresenta il punto di partenza per le simulazioni del trasferimento di calore del BHE, le quali vengono eseguite facendo variare la lunghezza del ciclo di carico t_c, la vita utile dello scambiatore t_s e le proprietà termiche del terreno (λ,ρc).

Nelle diverse simulazioni il valore di t_c è stato fatto variare in un range compreso tra i 30 e i 240 giorni e questo permette di coprire una vasta gamma di profili di utilizzo mentre il valore medio di carico termico $\bar{q}$ è posto uguale a 1KWhy^{-1}m^{-1} per tutti i valori di t_c, come mostrato in *figura 41*:

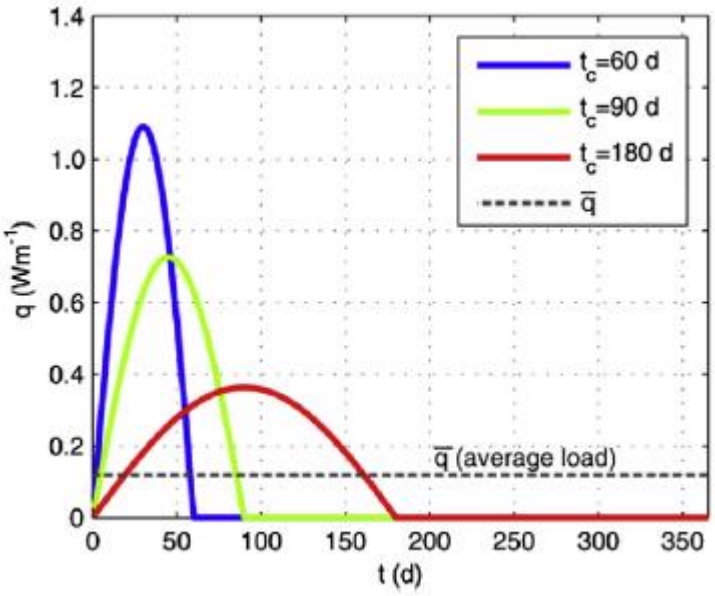

Figura 41 - Valori della funzione di carico termico valutato per differenti lunghezze di ciclo di carico e lo stesso valore medio termico annuale
(Casasso & Sethi, 2016)

Queste assunzioni rendono i risultati delle diverse simulazioni comparabili in quanto il calore scambiato durante ciascun anno risulta uguale.

Sulla base della lunghezza del carico ciclico è possibile determinare anche la massima ampiezza q_{max} attraverso la formula seguente:

$$q_{max} = \frac{\pi}{2t_c}\int_o^{t_y} q(t)\,dt = \frac{\pi}{2t_c}\cdot \bar{q}t_y = \frac{\pi\bar{q}}{2t'_c}$$

Dove $t'_c = t_c/t_y$ rappresenta il rapporto di tempo operativo, ovvero la lunghezza del ciclo di carico su una durata annuale.

3.8.2 Trasferimento di calore nel terreno

Per calcolare l'alterazione termica nel terreno, indicata con ΔT(r,t), viene utilizzato il modello proposto da Carslaw e Jaeger, ovvero il modello a sorgente lineare infinita (ILS) che fornisce la seguente espressione:

$$\Delta T(r,t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \int_{r_b^2/(4\alpha t)}^{\infty} \frac{1}{\psi} \exp(-\psi)\, d\psi = \frac{q}{4\pi\lambda} Ei\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right)$$

Quest'ultima è valida per un carico termico costante q (Wm^{-1}), dove Ei è l'integrale esponenziale e $\alpha=\lambda/(\rho c)$ (m^2s^{-1}) è la diffusività termica nel terreno espressa dal rapporto tra la conduttività termica e la capacità termica, ma con l'applicazione del modello ILS e del principio di sovrapposizione degli effetti è possibile modellare un BHE con un carico termico variabile nel tempo.

Si passa quindi alla valutazione della variazione di temperatura del terreno in corrispondenza della superficie del pozzo poiché $\Delta T_g(t) = \Delta T(r_b,t)$, da cui si ottiene:

$$\Delta T_g(t) = \frac{1}{4\pi\lambda} \int_0^t \dot{q}(\psi) \cdot Ei\left(\frac{r_b^2}{4\alpha(t-\psi)}\right) d\psi$$

Dove $\dot{q}(\psi)$ rappresenta la derivata temporale del carico termico per unità di lunghezza q, carico termico valutato precedentemente. Per risolvere questa equazione numericamente si ricorre al metodo delle differenze finite andando ad approssimare il carico termico variabile nel tempo come una successione di N funzioni aventi carico termico costante per la lunghezza di un giorno ed indicate con q_j.

A questo punto andando ad applicare il principio di sovrapposizione degli effetti per ciascun intervallo q_j, si ottiene la seguente espressione:

$$\Delta T_g(t = N \cdot \Delta t) = \frac{1}{4\pi\lambda} \sum_{j=1}^{N-1} \left[\left(q_{j+1} - q_j\right) \cdot Ei\left(\frac{r_b^2}{4\alpha \cdot \Delta t \cdot (N-j)}\right) \right]$$

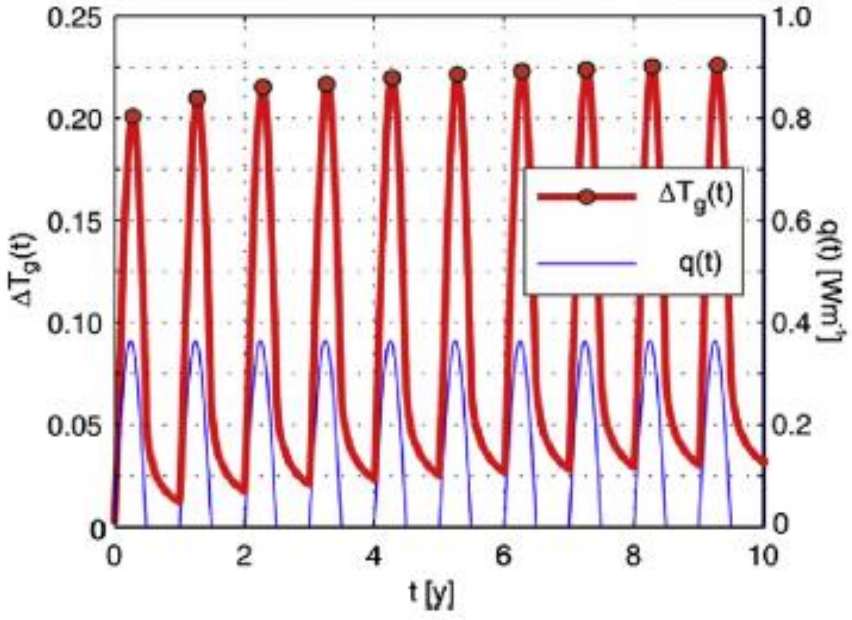

Figura 42 - Simulazione di trasferimento del calore termico annuale (Casasso & Sethi, 2016)

Come è possibile vedere in *figura 42*, la quale riporta una simulazione di trasferimento del calore utilizzando il modello ILS discretizzato, la variazione termica del terreno in corrispondenza della superficie del pozzo decresce durante il periodo di recupero, ovvero quando il carico termico è nullo (q(t)=0) ma non viene più raggiunta la temperatura iniziale, in altre parole la massima variazione termica annuale presenta un trend, che seppur lento, risulta crescente in maniera costante.

3.8.3 Trasferimento di calore nello scambiatore

Lo scambiatore BHE viene modellato come una resistenza termica R_b tra due "nodi", ovvero la superficie dello scambiatore e un tubo equivalente, avente la stessa sezione di tutti i tubi presenti all'interno dello scambiatore. Questo tubo equivalente presenta infatti un raggio pari a $r_{p,eq} = \sqrt{n} \cdot r_p$, dove n e r_p sono rispettivamente il numero e il raggio dei pozzi; quindi per un pozzo a U singola, n sarà pari a 2 mentre per un pozzo a U doppia, n sarà pari a 4.

Nel modello viene considerato un valore medio di temperatura, indicato con $T_f(t)$, tra la temperatura del fluido in entrata e quello in uscita e permette di valutare la differenza di temperatura nel pozzo, valutata tra la parete del pozzo e il fluido.

La caduta di temperatura del pozzo è indotta dal flusso di calore q(t) e viene valutata con l'espressione seguente:

$$\Delta T_b(t) = T_f(t) - T_g(t) = q(t) \cdot R_b$$

Dove R_b rappresenta la resistenza termica dello scambiatore, valutata in funzione della geometria del BHE, delle caratteristiche fisiche del fluido e del materiale di riempimento del pozzo; questa grandezza assume valori compresi tra 0,06 e 0,12 mKW^{-1} e può essere calcolato tramite il metodo proposto da Shonder e Beck, i quali suggeriscono la seguente espressione:

$$R_b = \frac{1}{2\pi\lambda_{bf}} \cdot log\left(\frac{r_b}{r_{p,eq}}\right)$$

Dove λ_{bf} rappresenta la conduttività termica del materiale di riempimento del pozzo.

Inoltre, in accordo alle teoria sopracitata, l'effetto di inerzia termica del BHE può essere trascurato se il carico termico varia su una scala temporale più lunga di alcune ore, ipotesi già verificata avendo ipotizzato intervalli giornalieri per la variazione termica.

Dalla somma tra la variazione di temperatura del terreno in corrispondenza della superficie del pozzo e la caduta di temperatura nel pozzo stesso, è possibile ricavare la variazione termica del fluido termovettore, indicata con $\Delta T_f(t)$, il cui valore massimo sarà quindi pari a:

$$\Delta T_{f,max} = \Delta T_{g,max} + \Delta T_{b,max}$$

Ricordando che il valore di $\Delta T_b(t)$ è direttamente proporzionale al carico termico q(t), è possibile calcolarne il valore massimo grazie all'equazione:

$$\Delta T_{f,max} = q_{max} \cdot R_b$$

mentre il valore massimo di variazione termica in corrispondenza del pozzo non può essere ricavato in maniera esplicita, perciò viene introdotta un'ulteriore equazione che permette di correlare il valore di $\Delta T_{g,max}$ al valore massimo di carico termico q_{max}:

$$\Delta T_{g,max} = \frac{q_{max}}{4\pi\lambda} \cdot P_{max}$$

Dove P-max rappresenta una funzione adimensionale espressa dall'equazione:

$$P_{max}(u'_s, u'_c, t'_c) = p_1 \cdot t'_c \cdot \log(u'_s) + (p_2 \cdot t'_c + p_3) \cdot \log(u'_c) + p_4 \cdot t'_c + p_5$$

Nell'espressione $u'_s = r_b^2/(4\alpha t_s)$ viene valutato in funzione del tempo di simulazione t_s, $u'_c = r_b^2/(4\alpha t_c)$ è funzione della durata del ciclo di carico t_c e infine $t'_c = t_c/t_y$ è il rapporto di tempo operativo.

La relazione empirica è stata ottenuta facendo variare le grandezze riportate in *tabella 6* su un gran numero di casi:

Tabella 6 - Valori dei parametri adottati nel processo di calibrazione nell'equazione per il calcolo di P_{max} termico annuale (Casasso & Sethi, 2016)

Parameter	Symbol	Unit	Range of variation	Step
Thermal conductivity of the ground	λ	$Wm^{-1}K^{-1}$	0.2 ÷ 1	0.1
			1.2 ÷ 10	0.2
Thermal capacity of the ground	ρc	$10^6 Jm^{-3}K^{-1}$	1 ÷ 4	0.2
Length of the heating/cooling season	t_c	d	30 ÷ 240	30
Simulation time	t_s	years	10 ÷ 100	10
Borehole radius	r_b	m	0.075	–

e permette di calibrare i parametri dell'espressione ottenendo valori di $p_1 = -0{,}619$, $p_2 = 0{,}532$,V $p_3 = -0{,}962$, $p_4 = -0{,}455$ mentre $p_5 = -1{,}619$.

La relazione finale per il calcolo della massima variazione di temperatura del fluido indotta dal carico termico di riferimento per unità di lunghezza q(t), con un valore medio pari a $\bar{q} = 1kWh \cdot m^{-1}y^{-1}$ risulta quindi:

$$\Delta T_{f,max} = \frac{q_{max}}{4\pi\lambda} \cdot [-0{,}619 \cdot t'_c \cdot \log(u'_s) + (+0{,}532 \cdot t'_c - 0{,}962) \cdot \log(u'_c) - 0{,}455 \cdot t'_c - 1{,}619 + 4\pi\lambda \cdot R_b]$$

A questo punto viene definita una proporzione tra il valore medio del carico termico di riferimento e il potenziale geotermico, ovvero:

$$\frac{\bar{q} \cdot L}{\Delta T_{f,max}} = \frac{\bar{Q}_{BHE}}{T_0 - T_{lim}}$$

Andando a sostituire l'espressione ricavata precedentemente per $\Delta T_{f,max}$ nella proporzione appena definita, è possibile ricavare il valore del potenziale geotermico superficiale, come mostrato nell'equazione:

$$\bar{Q}_{BHE} = \frac{a \cdot (T_0 - T_{lim}) \cdot \lambda \cdot L \cdot t'_c}{-0{,}619 \cdot t'_c \cdot \log(u'_s) + (+0{,}532 \cdot t'_c - 0{,}962) \cdot \log(u'_c) - 0{,}455 \cdot t'_c - 1{,}619 + 4\pi\lambda \cdot R_b]}$$

Nell'espressione compare il parametro a=8 se il valore di Q_{BHE} viene espresso in W, o viene posto pari a $7.01*10^{-2}$ se il valore del potenziale è espresso in MWh/y.

Il potenziale geotermico viene definito come il carico termico medio che può essere scambiato da un BHE di lunghezza L, inducendo una variazione di temperatura uguale alla differenza tra la temperatura iniziale T_0 e il valore di soglia T_{lim}, ma questo valore risulta funzione, oltre che della differenza di temperatura, anche della conduttività termica del terreno, della lunghezza e della resistenza termica del pozzo e dei tre parametri dimensionali definiti nell'espressione di P_{max}.

3.9 Conclusioni

Le analisi presentate nel capitolo permettono di valutare il potenziale geotermico che può essere sfruttato grazie all'installazione di scambiatori di calore nell'area considerata.

Base comune a tutte le analisi considerate è la raccolta di dati sul territorio, ottenuti da indagini geofisiche, geologiche e geochimiche, grazie all'utilizzo del sistema GIS.

I dati raccolti vengono quindi interpolati con modelli di integrazione che permettono di identificare le aree favorevoli all'installazione delle sonde geotermiche o in alternativa diversi autori hanno proposto metodologie che permettono di calcolare in maniera analitica il carico termico medio annuo che può essere scambiato da un BHE.

Nelle metodologie proposte da Garcia-Gil et al. (2016), Bertermann et al. (2014) e Alcaraz et al. (2016) il calcolo del potenziale deriva dalle proprietà indice del terreno nell'area considerata: Garcia-Gil et al. basano le loro analisi sull'equazione di trasporto del calore nei mezzi porosi, Bertermann et al. associano il potenziale geotermico ai valori di conduttività termica mentre l'analisi di Alcaraz et al. permette la valutazione del potenziale grazie all'utilizzo di una piattaforma che raccoglie le proprietà geologiche e idrogeologiche del territorio.

Nelle metodologie proposte invece da Miglani et al. (2017) e Schiel et al. (2016), oltre alle proprietà dell'area considerata, vengono considerate anche le caratteristiche dei BHE che verranno installati: la metodologia di Miglani et al. permette di valutare il posizionamento e il dimensionamento ottimale degli scambiatori per soddisfare la domanda energetica degli edifici potenziale geotermico a lungo termine; stesso ragionamento, ma a scala locale, viene seguito da Schiel et al. che presentano una metodologia che permette di determinare l'energia geotermica di un singolo appezzamento e il numero e le caratteristiche dei BHE da installare per soddisfare il fabbisogno energetico richiesto.

Infine la metodologia proposta da Casasso & Sethi (2016 fornisce un'espressione analitica per il calcolo del potenziale geotermico superficiale in funzione delle caratteristiche del terreno e della variazione di temperatura indotta dal

carico termico medio scambiato da un BHE a cui vengono assegnate le caratteristiche geometriche.

Capitolo 4

Il caso di studio dell'Area Metropolitana di Torino

4.1 Premessa

Oggetto di questo caso di studio è l'Area Metropolitana di Torino e in particolare un'area comprendente il Grattacielo San Paolo e il Palazzo della Città Metropolitana di Torino.

Dal 2015 la provincia di Torino è stata sostituita dalla Città Metropolitana di Torino, la quale con un'estensione di 6.827 km² comprende 316 comuni e quasi 2 milioni e mezzo di abitanti.

L'Area Metropolitana è composta da una parte montagnosa ad ovest ed a nord lungo il confine con la Francia e con la Valle d'Aosta, ed una parte pianeggiante o collinare nella zona sud ed est. La parte montuosa ospita parte delle Alpi Cozie, delle Alpi Graie e, in misura molto minore, delle Alpi Pennine.

Il suo territorio è caratterizzato da un mosaico di ambienti e paesaggi estremamente diversi tra loro: i rilievi e le valli alpine, i grandi conoidi alluvionali in corrispondenza dello sbocco dei principali corsi d'acqua alpini nella pianura del Po, gli anfiteatri morenici della Dora Baltea e della Dora Riparia, la pianura solcata dal Po (in cui confluiscono, nelle aree più intensamente antropizzate, i corsi d'acqua alpini) e i rilievi collinari di Torino e del Basso Monferrato, delimitati dall'attuale corso del Fiume Po.

Dal punto di vista geomorfologico, il territorio dell' Area Metropolitana può essere distinto in un settore più esterno di montagna, uno di pianura e uno più interno di collina, suddivisi secondo le seguenti percentuali rappresentati in *figura 43*:

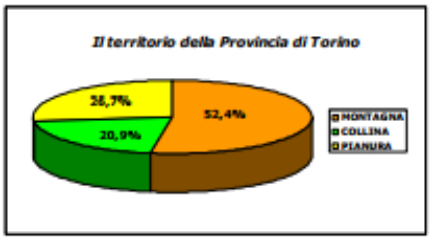

Figura 43 - La suddivisione territoriale dell' Area Metropolitana di Torino ("Piano territoriale di coordinamento provinciale", Agosto 2011)

A scala regionale, il sottosuolo dell'area torinese risulta caratterizzato dalla presenza di una successione di depositi di età quaternaria (Pleistocene medio - Olocene), poggianti sui depositi di età pliocenico-pleistocenica, noti con il termine di Villafranchiano. I depositi di età quaternaria costituiscono un conoide geneticamente legato all'evoluzione dei corsi d'acqua afferenti prevalentemente al bacino della Dora Riparia durante le fasi glaciali e interglaciali del ghiacciaio della Valle di Susa, e subordinatamente ai bacini del Fiume Po, della Stura di Lanzo e del torrente Sangone. Sulla base delle conoscenze ad oggi disponibili, il conoide ha spessore variabile da 10 m a 70 m circa e progressivamente minore da ovest verso est.

La città di Torino si sviluppa prevalentemente nel settore distale di tale conoide. Il conoide, delimitato a ovest dall'apparato morenico di Rivoli – Avigliana e a est dai rilievi della Collina di Torino, è costituito da una successione di depositi fluvioglaciali formati da prevalente ghiaia e sabbia con ciottoli in presenza di una matrice fine limosa in tenore variabile. All'interno della successione sono localmente presenti subordinati livelli di limo-sabbioso e di limo-argilloso; inoltre nell'area torinese è nota la presenza di orizzonti di conglomerato aventi spessore metrico.

Recenti studi hanno distinto i depositi di conoide riferibili al bacino della Dora Riparia in una serie di unità informali, localmente riconoscibili in affioramento nel territorio comunale. Tali unità sono distinte in base al bacino idrografico di pertinenza dei depositi e in base al grado di evoluzione dei suoli che si sviluppano sopra di queste. La successione dei depositi quaternari sopra richiamata poggia sulla successione dei depositi del Villafranchiano (Pliocene medio - Pleistocene inferiore)

da cui è separata da una superficie d'erosione. La successione del Villafranchiano è costituita da depositi di ambiente continentale e di transizione formati da argille lacustri in alternanza a depositi costituiti da sabbia e ghiaia di origine fluviale.

Limitatamente ai margini orientale e meridionale del conoide, i depositi quaternari poggiano in parte su depositi di origine marina di età pliocenica ("Sabbie di Asti" e "Argille del Piacenziano") e in parte sul substrato roccioso di età pre-pliocenica costituito da prevalenti marne, siltiti e arenarie.

4.2 L'Area Metropolitana di Torino

L'Area Metropolitana di Torino conta 883.702 abitanti ed è il capoluogo della regione Piemonte.

Torino sorge nella pianura delimitata dai fiumi Stura di Lanzo, Sangone e Po (quest'ultimo attraversa la città da sud verso nord), di fronte allo sbocco di alcune vallate alpine: Val di Susa, che collega la città con la vicina Francia, Valli di Lanzo, Val Sangone.

Il fiume Po accentua la divisione tra la parte collinare e quella, quasi piana, della città, collocata tra i 220 e i 280 metri s.l.m., che scende da ovest verso est. Il punto più elevato del territorio comunale si trova sul Colle della Maddalena, a 715 m s.l.m., nei pressi del Faro della Vittoria.

Ad Ovest della conurbazione, invece, si innalza la catena alpina occidentale arrivando a culminare oltre i 4000 metri nel Massiccio del Gran Paradiso.

4.2.1 Clima

Il clima torinese viene classificato come clima temperato umido delle medie latitudini con estate calda (mediamente i 30 °C sono raggiunti e superati 15 giorni all'anno a Torino e la media di luglio si attesta intorno ai 23 °C anche se negli ultimi anni si sono registrate estati marcatamente più calde). Gli inverni risultano moderatamente freddi, asciutti e spesso soleggiati con una temperatura media annua di 12,3°C con la minima registrata a gennaio di -1,9°C e con una media nivometrica nell'anno idrologico di 24,5 cm annui.

Durante la stagione invernale nella zona di Torino si assiste alla formazione del cosiddetto "cuscinetto freddo", provocato dall'afflusso di masse d'aria continentali che, grazie alla particolare conformazione orografica del territorio, può resistere tenacemente ai venti miti che scorrono a quote medio-alte come lo scirocco favorendo così occasionali nevicate denominate "da addolcimento" date dalla progressiva risalita termica. Molto diversa, invece, la situazione nelle numerose zone collinari e prealpine, spesso più calde delle pianure di parecchi gradi e quasi sempre prive di ristagni freddi.

Le precipitazioni normali annue ammontano a 804 mm, mediamente distribuite in 79 giorni, e presentano un minimo in inverno, un picco in primavera e minimo e massimo secondari rispettivamente in piena estate e in autunno. Nel trimestre da aprile a giugno e nel mese di ottobre si registra la piovosità più alta con temporali, in media circa 20 per anno di cui 2 con grandine, che causano piogge meno durevoli ma più intense, basti pensare che il 13 settembre 2008 l'osservatorio meteorologico di Caselle, situato 14 km a nord di Torino, ha registrato una pioggia temporalesca di 220 mm in sei ore, intensità senza precedenti noti nella pianura torinese.

I valori registrati in un periodo trentennale di riferimento compreso tra il 1961 e il 1990 vengono riportati nella *tabella 7* e nella *tabella 8* sottostanti:

Tabella 7 - Valori di temperatura massima e minima media mensile registrate a Torino (it.climate-data.org/location/1108/)

TORINO CENTRO	Mesi											
	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
T. max. media (°C)	3.7	6.9	11.8	16.4	21	25.3	28	26.6	23	16.1	9.3	4.9
T. min. media (°C)	-1.9	0.1	4.1	8.1	12	16.1	18	17.7	15	9.2	3.8	-0.2

Tabella 8 - Valori di temperatura massima e minima media stagionale a Torino (it.climate-data.org/location/1108/)

TORINO CENTRO	Stagioni			
	Inv	Pri	Est	Aut
T. max. media (°C)	**5.2**	**16.4**	**26.6**	**16.1**
T. min. media (°C)	**-0.7**	**8.1**	**17.4**	**9.2**

Mentre nelle *tabelle 9* e *10* sottostanti sono riportate le temperature massime e minime assolute mensili, stagionali ed annuali dal 1753 ad oggi:

Tabella 9 - Valori di temperatura massima e minima assoluta mensile a Torino (it.climate-data.org/location/1108/)

TORINO CENTRO	Mesi											
	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
T. max. assoluta (°C)	26.4	24.5	29.8	31.6	36	38.1	37	39.7	34	30.6	25.1	21.9
T. min. assoluta (°C)	-18	-19.1	-11	-3.3	2.5	4.3	9	8.1	2.4	2.4	-8.5	-18

Tabella 10 - Valori di temperatura massima e minima assoluta stagionale a Torino (it.climate-data.org/location/1108/)

TORINO CENTRO	Stagioni				Anno
	Inv	Pri	Est	Aut	
T. max. assoluta (°C)	**26.4**	**35.8**	**40**	**34.3**	40
T. min. assoluta (°C)	**-19**	**-11**	**4.3**	**-8.5**	-19

4.2.2 Geologia

A scala regionale, l'area ricade in un tratto di pianura che ricopre una superficie di circa 130 km² costituito da una serie di depositi alluvionali prevalentemente grossolani con spessore compreso tra una decina ed un centinaio di metri, che ricoprono in discordanza una potente successione di sedimenti fluvio-lacustri a granulometria fine.

Vista l'estesa urbanizzazione del territorio comunale di Torino, l'assetto geologico del sottosuolo è stato ricostruito soprattutto in base alle numerose perforazioni e l'insieme dei dati raccolti consente di formulare una ricostruzione attendibile dell'assetto del sottosuolo.

Il sottosuolo della città comprende un orizzonte superficiale prevalentemente fluviale-glaciale che presenta depositi fluviali con ghiaia, ciottoli e sabbia dentro una matrice sabbioso-limosa, con uno spessore variabile tra i 25 e i 50 m risalenti al periodo del Medio Pleistocene-Olocene. Questa conformazione, tipica del sottosuolo torinese, viene chiamata "puddinga", ovvero conglomerato a causa della cementazione distribuita casualmente.

Segue una sequenza lacustre e fluviale-lacustre con presenza di argilla e limo e lenti di ghiaia alternate nota anche come formazione Villafranchiana risalente al

periodo di Alto Pliocene – Basso Pleistocene. Infine si identifica una sequenza terrigena di terreno marino profondo sopra a depositi di sabbia argillosa e fossilifera risalenti al Pliocene medio eocenico.

L'area di indagine è collocata mediamente a 247 m di quota s.l.m. ed è compresa all'interno dell'estesa superficie sub-pianeggiante che ospita parte della città di Torino.

Tale superficie, debolmente inclinata verso est-sudest, si sviluppa tra circa 270 m s.l.m., al confine occidentale del territorio comunale, e circa 220 m s.l.m. in prossimità del corso del fiume Po.

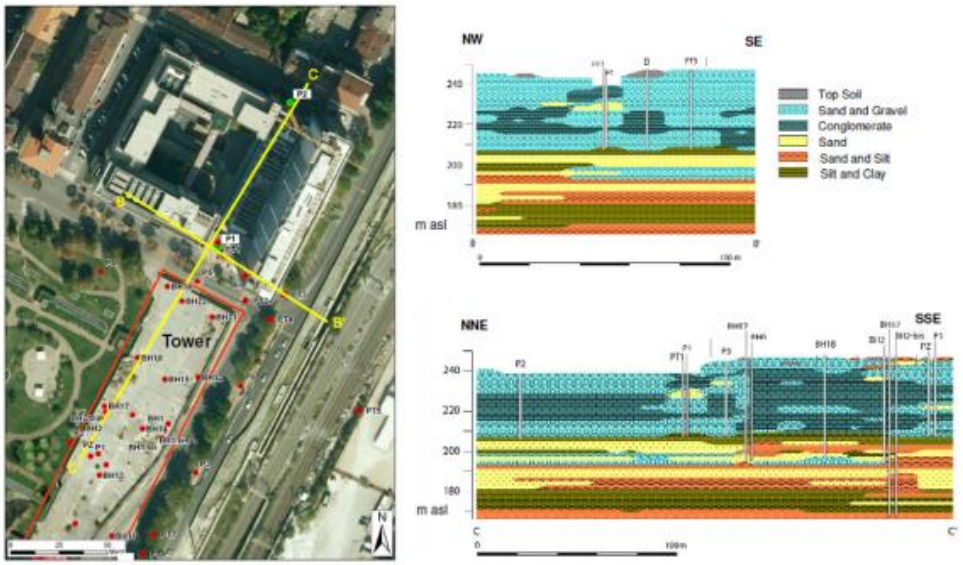

Figura 44 - Area di interesse e sezioni geologiche rappresentative (G.Barla, 2017)

In corrispondenza del Sito (*figura 44*) l'assetto litostratigrafico è caratterizzato dalla seguente successione di depositi (le profondità sono espresse in metri, sono riferite al p.c.)

- p.c. - 1,6 terreno di riporto (sabbia medio - fine con ghiaia, inglobante resti di laterizi);
- 1,6 - 15,0 alternanze di livelli di sabbia medio-fine limosa con ghiaia e rari ciottoli e livelli di ghiaia con sabbia localmente debolmente limosa (è presente un livello di sabbia medio-fine debolmente limosa tra 10,25 m e 11,30 m);
- 15,0 - 36,4 livelli di conglomerato a elementi eterometrici e poligenici da cementati a poco cementati, in alternanza a ghiaia sabbiosa localmente limosa;
- 36,4 - 40,2 ghiaia e ciottoli con sabbia medio-grossa;

- 40,2 - 43,0 argilla di colore nocciola con screziature ocra, molto consistente (localmente debolmente ghiaiosa);
- 43,0 - 50,3 sabbia medio-fine (livello decimetrico di sabbia con ghiaia a 46 m);
- 50,3 - 58,7 sabbia da fine a grossa da debolmente ghiaiosa a ghiaiosa (locali livelli con rari ciottoli);
- 58,7 - 69,1 sabbia prevalentemente medio-fine limosa (livello di argilla decimetrico a 67,6 m);
- 69,1 - 71,5 limo argilloso molto consistente;
- 71,5 - 75,5 argilla grigio a tratti debolmente limosa;
- 75,5 - 78,95 limo argilloso sabbioso molto consistente;
- 78,95 - 80,0 sabbia medio-fine debolmente limosa;
- 80, - 120,0 sabbia prevalentemente medio-fine limosa.

4.2.3 Idrogeologia

Sulla base dei dati stratigrafici ottenuti a seguito della perforazione dei sondaggi e dal confronto tra questi e le conoscenze note in letteratura, in corrispondenza al Sito, l'acquifero superficiale si estende sino a circa 40 m da p.c.. A tali profondità infatti è presente un orizzonte costituito da alternanze di livelli di argilla, argilla limosa e di limo argilloso sabbioso, avente spessore di circa 3,5 m.

Si ritiene che tale orizzonte costituisca il livello di confinamento basale dell'acquifero superficiale in corrispondenza del sito mentre il livello di falda viene collocato a 15 m al di sotto del piano campagna.

Viene considerato inoltre un acquifero profondo posto ad una profondità di 80 m che si considera esteso fino alla profondità raggiunta dalla stratigrafia precedentemente definita.

La direzione del flusso è orientata da ovest a est, dove il fiume Po rappresenta la linea di base e il punto di raccolta dell'acqua sotterranea.

A partire dagli anni ottanta si è registrato un aumento della quota di falda, dal 1991 al 1994 l'incremento è stato di 2 metri nella parte meridionale della città, ma altri dati recenti mostrano una stabilizzazione del livello della falda acquifera, quasi in linea con i dati storici prima del periodo di industrializzazione.

4.3 Il Palazzo della Città Metropolitana di Torino

Il Palazzo della Città Metropolitana di Torino, di cui una vista è presentata in *figura 45*, è uno dei palazzi più alti del capoluogo piemontese con i suoi 65 metri di altezza.

Figura 45 - Il palazzo della Città Metropolitana di Torino(www.spaziotorino.it)

I lavori per la sua realizzazione ebbero inizio a partire dal 1962 nell'area dell'ex mattatoio sulla base del progetto dell'Arch. Ottorino Aloisio, che con il suo progetto aveva vinto il concorso bandito della STIPEL (poi SIP e quindi Telecom) per la realizzazione del nuovo centro direzionale destinato ad ospitare uffici e impianti.

L'edificio venne concepito dall'architetto come un grattacielo orizzontale grazie alla presenza di paraste altissime, ovvero elementi architettonici strutturali verticali (pilastri) che però vengono inglobati nella parete dalla quale sporgono solo leggermente, tra le quali trovano posto le finestre anch'esse molto sviluppate in altezza.

Nel corso del 2008 il grattacielo è stato oggetto di una radicale ristrutturazione interna ed esterna durata due anni su progetto dell'Architetto Paolo Rosani, divenendo la nuova sede centrale della Provincia di Torino.

L'ammodernamento dell'edificio prevedeva una serie di interventi volti all'adeguamento tecnologico, ad una migliore efficienza energetica e a una nuova organizzazione degli spazi nell'edificio. Inoltre, l'accentuata verticalità della facciata venne profondamente modificata per la rimozione dei rivestimenti policromi in klinker, in favore di un nuovo (ma più anonimo) rivestimento "ecosostenibile" a scapito delle caratteristiche del progetto originario.

Figura 46 - Impianto geotermico del Palazzo della Città Metropolitana di Torino (G.Barla, 2017)

L'edificio, come mostrato in *figura 46,* presenta un impianto geotermico di climatizzazione caratterizzato da un sistema di captazione diretta di acqua, attraverso due pozzi di emungimento, dalla falda sottostante. L'impianto venne avviato nel 2012: durante l'estate l'acqua venne pompata dal pozzo P2 (rappresentato in verde in figura 48) ad una temperatura di circa 14°C e dopo essere stata utilizzata per il condizionamento dell'edificio venne reimmessa dal pozzo P1 (rappresentato in rosso in *figura 48*) nel sottosuolo ad una temperatura più alta.

Il meccanismo di condizionamento continuò fino all'ottobre dello stesso anno, dopo il quale l'impianto venne spento e rappresenta un prototipo a scala più piccola dell'impianto messo in opera per il Grattacielo Intesa San Paolo.

Infatti il monitoraggio continuò fino al Novembre del 2012 al fine di osservare il raggiungimento delle condizioni stazionarie in termini di livello e temperatura della falda freatica.

4.4 Il Grattacielo Intesa San Paolo

ll grattacielo Intesa SanPaolo progettato dall'Arch. Renzo Piano sorge nel quartiere di Cit Turin come sede dell'omonimo gruppo bancario ed è stato definito dal progettista stesso “un frammento di ghiaccio a Torino”.

I lavori, affidati ad imprese private italiane tra le più qualificate del settore a livello mondiale su volontà dell’architetto e della committenza, vennero ultimati nel 2014, rendendolo l'edificio più alto di Torino dopo la Mole Antonelliana e, con la sua altezza di 166,26 m, è il più alto della città di Torino dopo la Mole Antonelliana (*figura 47*).

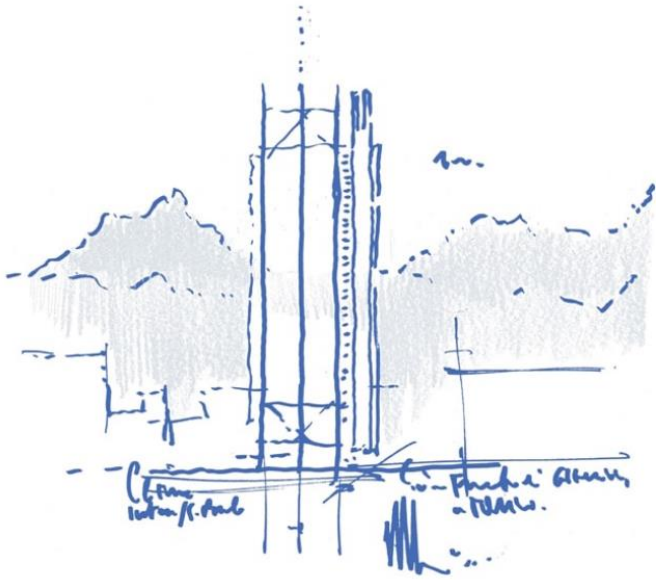

Figura 47 - Schizzo del grattacielo realizzato dall'Arch. Renzo Piano (www.grattacielosanpaolo.com)

La parte di fabbricato che si sviluppa fuori terra (torre) presenta una pianta rettangolare di dimensioni massime 36 x 60m circa, con l’asse principale longitudinale orientato in direzione nord-sud e si sviluppa per 38 piani, ma è presenta anche una parte interrata di 6 piani che invece, occupa l’intero lotto edificabile disponibile con un’impronta di 46 x 161m circa.

Oltre alla parte privata per la Banca destinata agli uffici, l’edificio presenta anche una parte aperta al pubblico: nella parte inferiore è presente un auditorium sospeso con una capacità di 364 posti mentre in alto trova posto una serra vetrata, bioclimatica e ventilata naturalmente.

Fondamentale nella fasi di costruzione dell'opera (*figura 48*) è stata l'attività di monitoraggio del sito sia in termini di strutture realizzate che di controllo delle aree e degli edifici adiacenti. Questa attività presenta un ruolo determinante in quanto nei processi di lavorazione e costruzione è previsto l'impiego di prodotti che, anche quando regolamentati da norme che ne definiscono le dimensioni, possiedono tolleranze dimensionali significative rispetto alle dimensioni di riferimento. Di conseguenza c'è l'esigenza di controllare la variabilità geometrica e dimensionale dovuta ai processi realizzativi così da determinare l'accettabilità delle opere con il confronto diretto tra il valore riportato dal progetto ed il valore misurato in situ al quale deve essere sommato il valore della tolleranza di ciascuna lavorazione.

Figura 48 - Grattacielo in fase di costruzione (www.mole24.it)

Il grattacielo a distanza di pochi mesi dalla sua inaugurazione, grazie allo sfruttamento delle risorse energetiche circostanti ha ricevuto la certificazione energetica per la classe A e la certificazione "LEED Platinum", attribuita dal *Green Building Council* ed è l'unico edificio di grande altezza in Europa ad aver raggiunto tale traguardo, collocandosi addirittura tra i primi dieci al mondo per la categoria New Construction.

Per ottenere questo importante riconoscimento, oltre ai 5 anni di lavoro, sono state compiute alcune scelte tecniche e tecnologiche: il fabbricato presenta una

facciata a doppia pelle che cambia continuamente il proprio aspetto in funzione delle condizioni climatiche e una serie di pannelli fotovoltaici che ricoprono 1500 metri quadri in grado di produrre circa 120.000 kW/ora all'anno.

Inoltre di particolare importanza è l'installazione di unità per la climatizzazione estiva ed invernale ad elevata efficienza, ovvero pompe di calore che sfruttano l'energia geotermica, con prelievo e restituzione di acqua di falda senza emissioni nocive in atmosfera. In condizioni di funzionamento normale, infatti, il grattacielo non ha emissioni inquinanti.

L'impianto è costituito da gruppi frigoriferi/pompe di calore Climaveneta: 4 TECS2W/ HC C 1213 ed 1 FOCSW HS 1902 ubicati nella "*plant room*" al livello sei e alimentati anch'essi da acqua di falda (*www.climaveneta.com*). Le unità TECSW sono state selezionate in versione HC, "*High Condensing"*, specificatamente progettate per quelle applicazioni in cui si richiede la capacità di lavorare a livelli di condensazione elevati o in tutti i casi in cui si richiede la reversibilità delle unità in pompa di calore. Anche l'unità FOCS W è stata selezionata in versione pompa di calore HS, con reversibilità lato idraulico per garantire il massimo comfort interno anche durante l'inverno. La distribuzione interna infine è garantita da pannelli radianti a isola sospesi, in grado di produrre un benessere ambientale superiore alla media, senza correnti d'aria e senza emissioni sonore.

Durante la mezza stagione, infine, un sistema di gestione computerizzato dell'impianto consente alle unità di funzionare in parte come pompe di calore e in parte come gruppi frigoriferi. Tutto ciò è possibile grazie alla presenza nel sistema di tutte pompe a portata variabile gestite da *inverter*, che consentono una distribuzione all'interno dell'impianto della sola acqua calda o fredda realmente necessaria, evitando quindi qualsiasi spreco.

Essi operano mediante la realizzazione di due campi pozzi a circuito chiuso, di cui uno destinato alla captazione dell'acqua di falda a 14°C, ubicato indicativamente lungo via Falcone, e uno destinato alla re-iniezione dell'acqua di falda che presenta una temperatura di 20-21°C approssimativamente, ubicato indicativamente lungo corso Inghilterra per un totale di 18 pozzi.

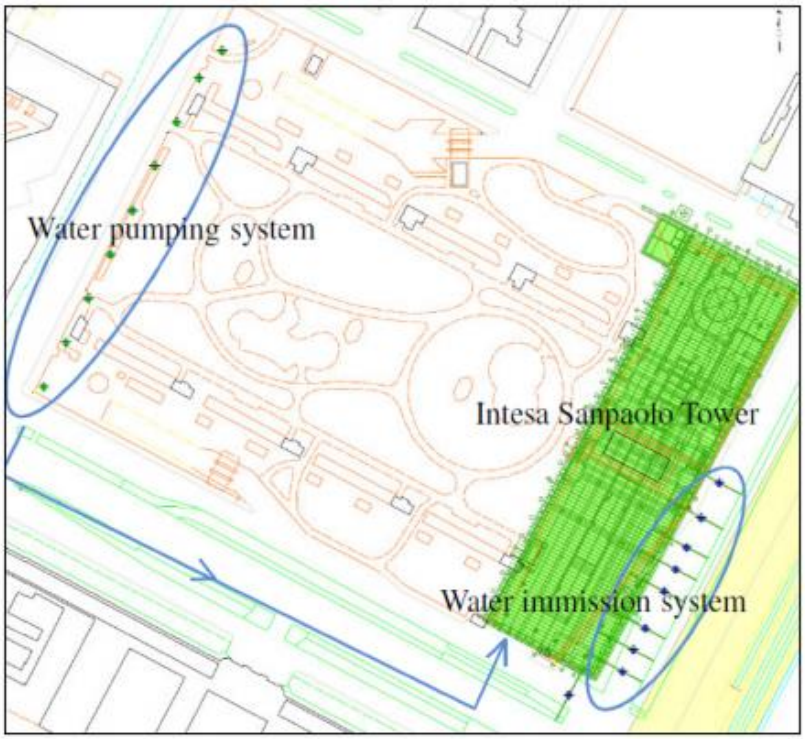

Figura 49 - Vista in pianta del sistema geotermico con pozzi verticali (a monte) e pozzi trivellati inclinati (a valle)
(G.Barla, 2017)

In particolare, come mostrato in *figura 49*, l'acqua viene pompata dai pozzi verticali del sistema di pompaggio e raggiunge un primo serbatoio di stoccaggio a monte dell'edificio; dopo essere stata utilizzata, la stessa acqua viene portata in un secondo serbatoio di stoccaggio, a valle prima di essere restituita alla falda acquifera mediante il sistema di immissione. Questo permette di mantenere un flusso d'acqua quasi costante durante il giorno, indipendentemente dalle condizioni operative variabili degli impianti nell'edificio.

Anche per il grattacielo è stato necessario prevedere un programma di monitoraggio per la valutazione degli effetti dell'impianto sull'acquifero in termini di temperatura e livello di falda in considerazione della significativa portata d'acqua prevista in grado di raggiungere un massimo di 245 l/s.

4.4.1 Indagini in situ

L'area di ubicazione dell'edificio è stata interessata da un accurato studio che ha previsto un test di pompaggio dell'acqua su larga scala e un test su larga scala del

flusso d'acqua e del trasporto di calore con monitoraggio in tempo reale della temperatura e del livello dell'acqua in prossimità di un pozzo geotermico (*G.Barla, "Comprehensive study including testing monitoring and thermo-hydro modelling for design and implementation of a geothermal system in Torino (Italy)"*). Lo scopo di queste indagini è stato quello di ricavare i parametri necessari da inserire nel software per la modellazione tridimensionale del sistema.

4.4.1.1 Prova di pompaggio su larga scala

L'indagine è stata condotta valutando l'abbassamento del livello di falda nei pozzi, rappresentati in *figura 50,* PM1, PF1, PF2, PF3 e PF4 nel tempo e la portata d'acqua in ciascun foro. Le perforazioni presentano un diametro di 131 mm e il foro PM1 raggiunge una profondità di 80 m mentre la perforazione dei restanti arriva a 40-45 m.

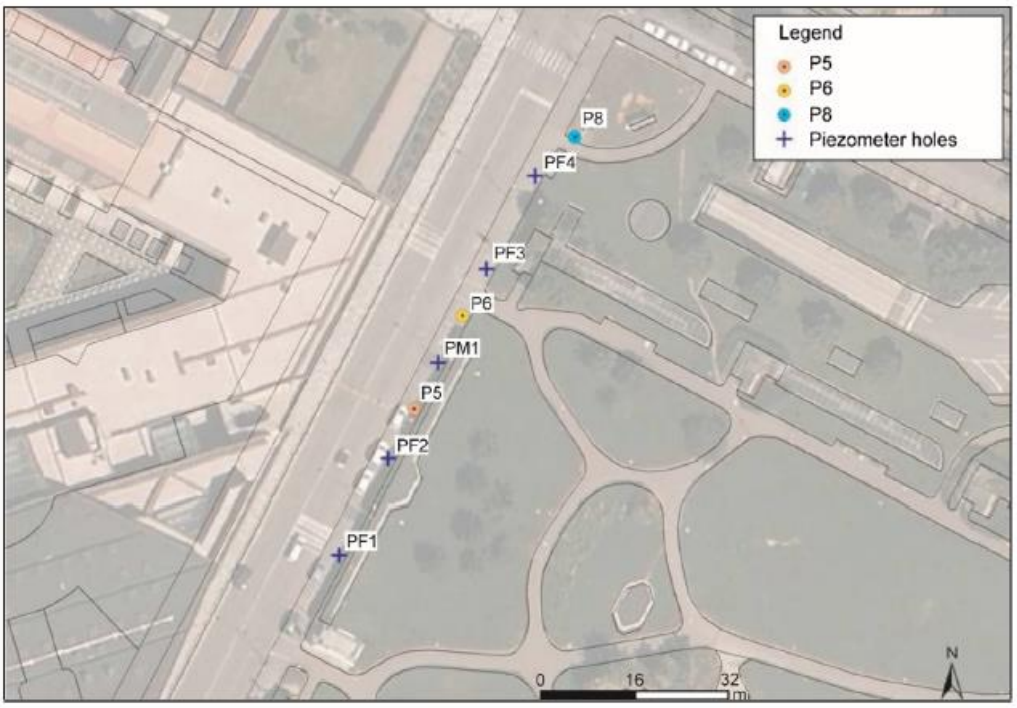

Figura 50 - Schematizzazione pozzi per il test di pompaggio: pozzi P5 e P6 usati per il pompaggio dall'acquifero e pozzi PM1, PF1, PF2, PF3 e PF4 equipaggiati le la misura della quota piezometrica; pozzo P8 già esistente (G.Barla, 2017)

Tutti questi pozzi sono completamente allineati fino a 20 m di profondità e sono stati equipaggiati con tubi in PVC perforato da 20 m fino a 43 m di profondità.

Sono stati diretti tre test, di cui due della durata di 148 ore mentre l'ultimo di 145 ore e consistono nel pompaggio di acqua nell'impianto.

Nelle prime due prove l'acqua è stata pompata indipendentemente da P5 e P6 in quattro fasi, con una portata rispettiva di 30, 45, 60 e 75 l / s; mentre nella prova 3 l'acqua è stata pompata contemporaneamente da entrambi i pozzi con una portata totale in ogni fase di 60, 90, 120 e 150 l / s. Fra ciascun step di pompaggio le operazioni sono stata bloccate da un minimo di 18 h fino ad un massimo di 24 h così da concludere l'intero test nell'arco di circa 20 giorni.

Questa indagine risulta importante per determinare gli effetti dell'impianto geotermico sull'acquifero in termini di cambiamento di temperatura e del livello di falda, vista la significativa portata d'acqua prevista.

I risultati ottenuti dalla prova sono riportati in *figura 51*, in cui viene rappresentato l'abbassamento del livello di falda nei pozzi PM1, PF1, PF2, PF3 e PF4 in funzione del tempo trascorso:

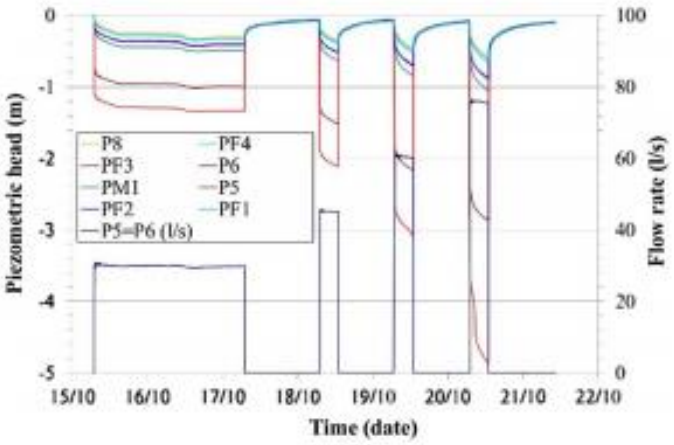

Figura 51 - Risultati test di pompaggio su larga scala (G.Barla, 2017)

E' possibile notare che in generale l'acquifero affronta in modo soddisfacente le diverse portate adottate durante i test e l'abbassamento del livello della falda rimane piuttosto ridotto. Inoltre, la presenza del conglomerato determina un certo grado di eterogeneità nel terreno che provoca una diversa risposta dei pozzetti durante il pompaggio sia esso svolto separatamente in ciascun pozzetto o simultaneamente.

4.4.1.2 Prova su larga scala del flusso d'acqua e del trasporto di calore con monitoraggio in tempo reale della temperatura e del livello dell'acqua in prossimità di un pozzo geotermico

Per la realizzazione di questo test nell'area sono stati utilizzati i pozzi P1 e P2 realizzati in precedenza per il palazzo Città Metropolitana di Torino e i pozzi PT1, PT2, PT3 e PT4 i quali raggiungono una profondità di 40-43 m e sono stati equipaggiati con piezometri e sensori di temperatura (*figura 52*).

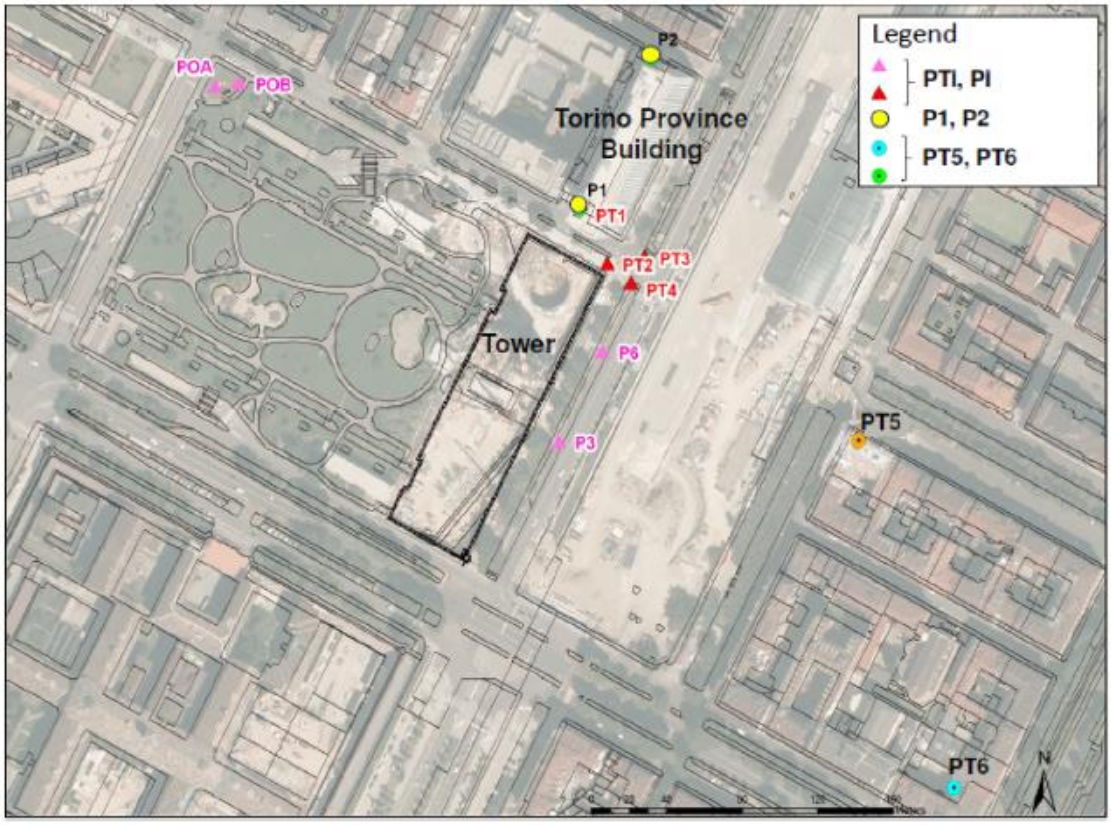

Figura 52 - Schematizzazione pozzi per il test di flusso dell'acqua e trasporto di calore: pozzi P1 e P2 del Palazzo della Città Metropolitana di Torino e pozzi PT1, PT2, PT3, PT4, PT5 e PT6 equipaggiati per il monitoraggio della temperatura e del livello dell'acqua di falda. (G.Barla, 2017)

Come già precedentemente descritto, l'acqua fredda veniva pompata dal pozzo P2 e ritornava all'acquifero grazie a P1, dopo essere stata utilizzata per il condizionamento del Palazzo della Città Metropolitana di Torino.

I risultati raccolti in *figura* 53 mostrano la quota piezometrica durante la prova:

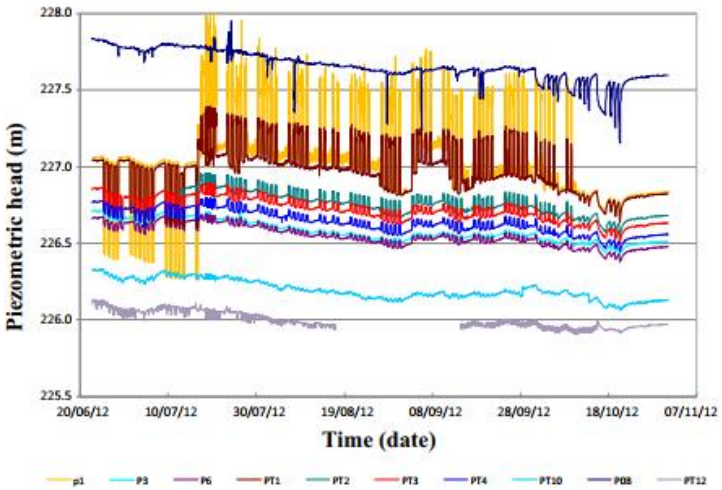

Figura 53 - Andamento della quota piezometrica valutata tra Giugno e Novembre 2012 (G.Barla, 2017)

Considerando P1, si può notare una variazione giornaliera che può arrivare a 1 m, mentre in PT1, a valle di P1, questo cambiamento è solo di 20-35 cm. Per i pozzi PT2, PT3, PT4 e P6, il valore monitorato è di solo 5-10 cm, mentre nessuna influenza è mostrata in P3, PT10 e PT12.

Inoltre è di particolare interesse notare che, tranne che per P1 e PT1, il livello della quota di falda ritorna alle condizioni inalterate quando il sistema di condizionamento viene spento.

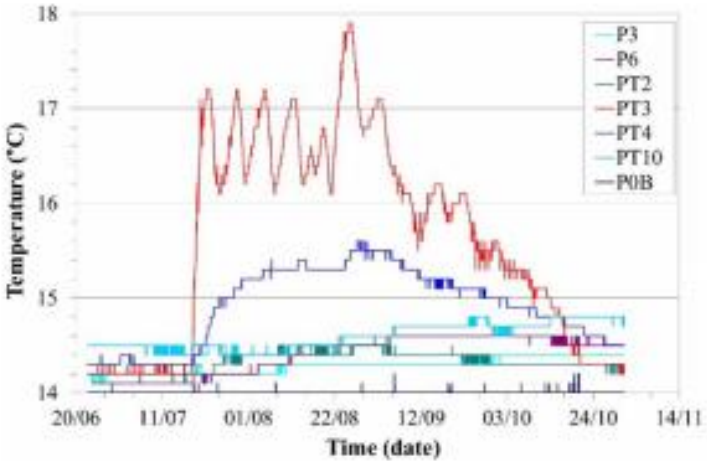

Figura 54 - Incremento di temperatura registrata tra Giugno e Novembre 2012 (G.Barla, 2017)

In *figura 54* viene rappresentato l'incremento di temperatura in funzione del tempo nei fori di monitoraggio situati a distanze diverse da P1.

Si registra in PT3, situato a circa 40 m a valle di P1, un incremento fino a 18°C della temperatura della falda acquifera solo 3 giorni dopo l'inizio del test, risultato in linea con la temperatura misurata in PT1. Mentre in PT4 l'incremento è pari a 1,2°C rispetto alla temperatura misurata nella falda in una zona indisturbata.

Nella perforazione PT10, situata a 185 m di distanza da P1, viene registrato un aumento di temperatura di 0,3°C dall'inizio del test. Infine, è interessante osservare che il monitoraggio nei pozzi PT2, P3, P6, che si trovano lateralmente da P1, mostra un aumento minore della temperatura rispetto a quello mostrato nei punti di monitoraggio direttamente a valle. Ad esempio, 3 giorni dopo l'inizio del test, l'incremento di temperatura della falda misurato in questi pozzi risulta pari a 0,3°C in PT2, 0,5°C in P6 e 0,2°C in P3.

4.4.2 Simulazione numerica del funzionamento dell'impianto geotermico del Grattacielo San Paolo

Con i dati raccolti è stato realizzato dal team di ricerca un modello FEM tridimensionale riportato in *figura 55*, mediante il codice di calcolo FEFLOW, così da interpretare i risultati ottenuti in situ e dare una rappresentazione soddisfacente della situazione reale.

Figura 55 - Modello tridimensionale FEM dell'area di interesse (G.Barla, 2017)

Il modello infatti è in grado di rappresentare il flusso d'acqua osservato prima dei test, ovvero le condizioni indisturbate del sistema (*figura 56*).

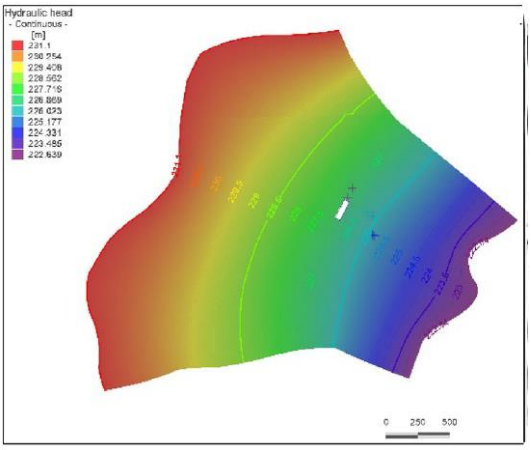

Figura 56 - Rappresentazione del flusso d'acqua in condizioni indisturbate del sistema (G.Barla, 2017)

In *figura 57* e in *figura* 58 sono mostrati rispettivamente la trama dei vettori di portata in presenza delle diverse infrastrutture presenti in zona e la trama dei vettori di portata mentre l'acqua fredda viene pompata da P2 e l'acqua calda viene restituita a P1.

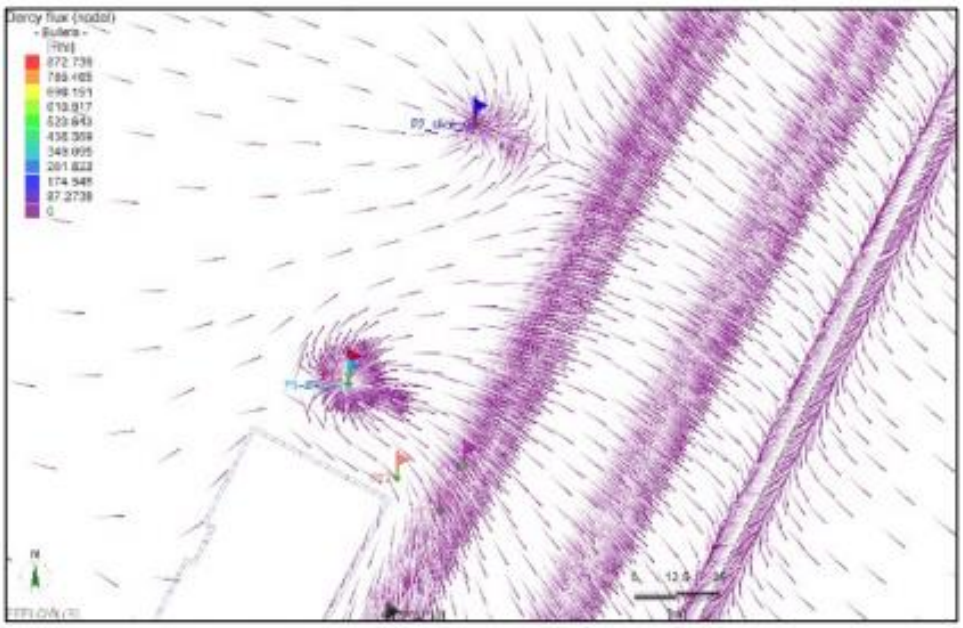

Figura 57 - Andamento della portata d'acqua (G.Barla, 2017)

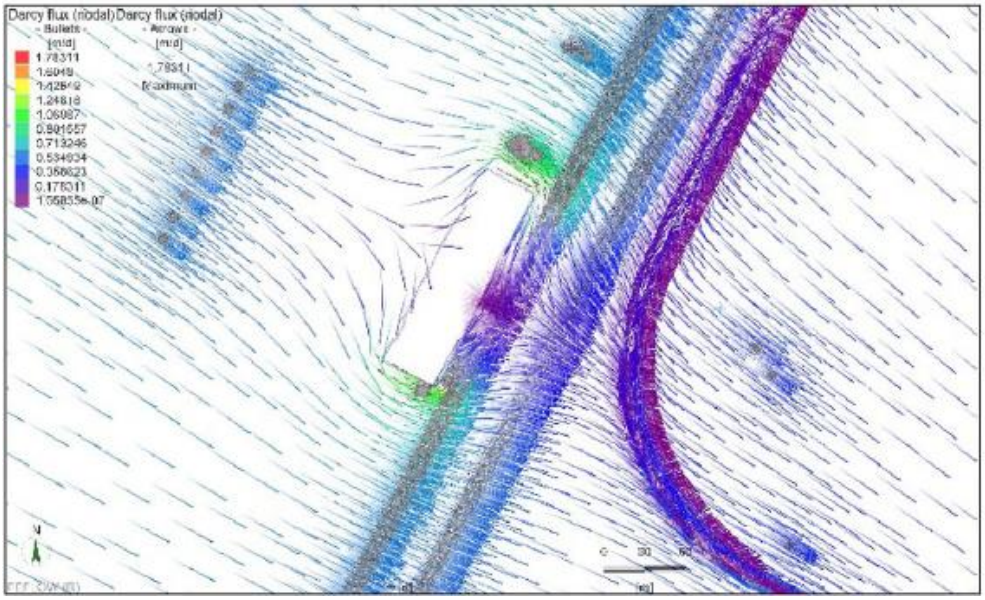

Figura 58 - Andamento della portata d'acqua con acqua fredda pompata da P_2 e acqua calda restituita a P_1 (G.Barla, 2017)

Dal confronto tra le figure si evince che il modello numerico rappresenta in maniera soddisfacente le condizioni di flusso registrate durante le prove, come dimostrato anche dalla *figura 59* in cui vengono confrontati i valori misurati con i valori computati di temperatura nel pozzo PT3.

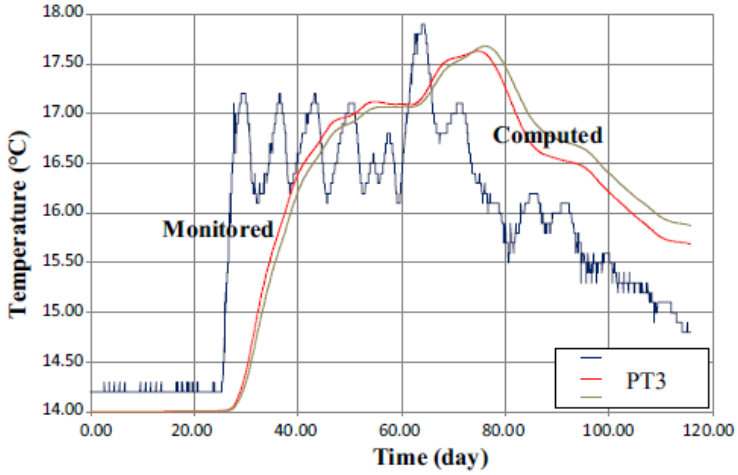

Figura 59 - Confronto dei valori monitorati con i valori computati di temperatura nel pozzo PT3 (G.Barla, 2017)

Infine, la *figura 60* illustra il "*thermal plume*" calcolato nelle immediate vicinanze del pozzo P1, 50 giorni dall'inizio dei test per due diversi valori della conducibilità orizzontale, pari a 3,8 x 10^{-3} m/s e 4,5 x 10^{-3} m/s:

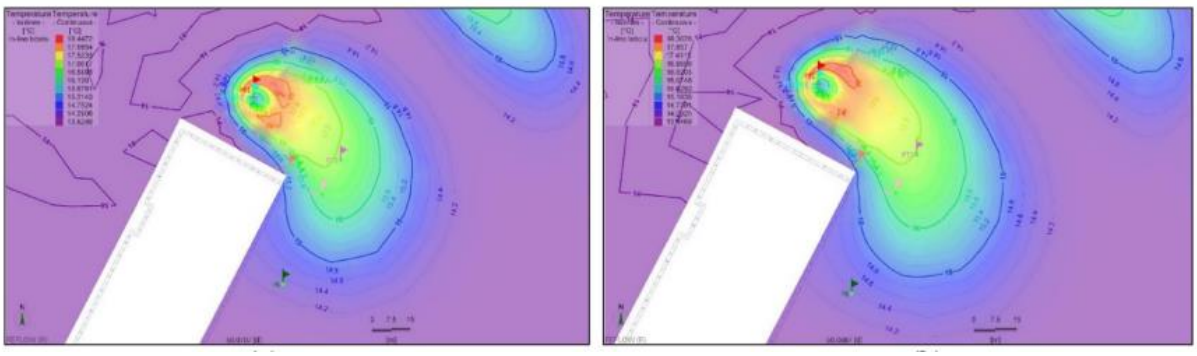

Figura 60 - Quota idraulica che rappresenta le condizioni naturali del flusso d'acqua per due diversi valori della conduttività orizzontale (G.Barla, 2017)

Questi test sono stati condotti al fine di stabilire l'influenza del sistema geotermico sull'acquifero nelle immediate vicinanze del Palazzo della Città Metropolitana di Torino, ponendo particolare attenzione alla manutenzione del sistema già installato in sito.

4.5 Area di studio

Per questo lavoro di tesi è stata considerata l'area rappresentata in *figura 61*, comprendente il grattacielo Intesa San Paolo e il Palazzo della Città Metropolitana di Torino.

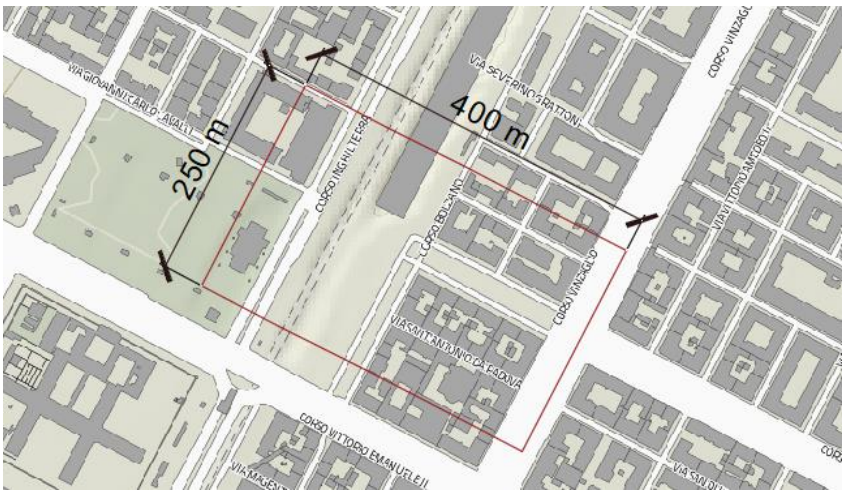

Figura 61 - Schematizzazione area di indagine (www.geoportale.piemonte.it/geocatalogorp/)

L'area si estende per 400 metri in lunghezza e 250 metri in larghezza nella direzione del flusso d'acqua, quindi dal giardino "Nicola Grosa" per Corso Vittorio Emanuele fino a Corso Vinzaglio.

Su quest'area verrà applicato il metodo G.POT al fine di valutare il potenziale geotermico del sito e i valori ottenuti verranno confrontati con quelli ricavati dalla modellazione numerica con il codice di calcolo FEFLOW, così da valutare l'interferenza degli impianti geotermici delle infrastrutture sopracitate con il valore del potenziale geotermico calcolato.

4.5.1 Risultati ottenuti dall'applicazione del metodo G.POT

Sull'area di interesse viene applicato il metodo diCasasso e Sethi (2018), di cui si è parlato nel Capitolo 3 per il calcolo del potenziale geotermico in modalità di raffreddamento o riscaldamento.

La quantità di calore scambiato, indicato con Q_{BHE}, viene valutato grazie alla relazione empirica, riportata di seguito:

$$Q_{BHE} = \frac{a \cdot (T_0 - T_{lim}) \cdot \lambda \cdot L \cdot t'_c}{-0{,}619 \cdot t'_c \cdot \log(u'_s) + (+0{,}532 \cdot t'_c - 0{,}962) \cdot \log(u'_c) - 0{,}455 \cdot t'_c - 1{,}619 + 4\pi\lambda \cdot R_b]}$$

Per il calcolo è necessario definire le proprietà termiche del terreno, ovvero i valori di conduttività termica (λ), di capacità termica (ρc) e di temperatura del terreno indisturbato (T_o) per i quali deve essere determinata una variabilità spaziale, mentre tra le proprietà termiche e geometriche dei BHE da determinare rientrano i valori di lunghezza (L), di raggio dello scambiatore (r_b) e di resistenza termica (R_b). Infine vene definita la minima temperatura del fluido termovettore durante il riscaldamento o la massima temperatura se in fase di raffreddamento, indicata con T_{lim}.

Viene fissata anche la lunghezza della stagione di riscaldamento (o raffreddamento) indicata con t_c e il tempo di simulazione (t_s), ovvero il tempo in cui verrà valutata la sostenibilità del geo-scambio.

Gli stessi autori hanno fornito un foglio di calcolo EXCEL per la computazione che permette di ottenere i valori puntuali del potenziale geotermico una volta inseriti i parametri di input sopracitati oltre che alle coordinate del punto scelto.

Il valore di Q_{BHE} viene definito nel punto individuato dalle coordinate fissate e corrisponde al centro di una cella quadrata con lato pari a 10 m all'interno del quale questo valore di potenziale viene assunto costante.

I valori di input e i rispettivi range di variazione sono raccolti nella *tabella 11* riportata di seguito:

Tabella 11 - Range di variazione dei parametri di input per il calcolo del Q_{BHE}

Parameter	Symbol	Unit	Range of variation
Thermal conductivity of the ground	λ	$Wm^{-1}\,K^{-1}$	0.2 ÷ 1 1.2 ÷ 10
Thermal capacity of the ground	ρc	$10^6\,Jm^{-3}\,K^{-1}$	1 ÷ 4
Length of the heating/cooling season	t_c	d	30 ÷ 240
Simulation time	t_s	years	10 ÷ 100
Borehole radius	r_b	m	0.075

Il valore di resistenza termica dello scambiatore di calore, indicato con R_b, dipende dalle geometria del BHE, dalle caratteristiche fisiche del fluido refrigerante e dalle caratteristiche del materiale di riempimento del pozzo in cui sono inserite le condotte.

Per il calcolo viene assunta l'espressione formulata da Shonder & Beck (2000) riportata di seguito:

$$R_b = \frac{1}{2\pi\lambda_{bf}} \cdot log\left(\frac{r_b}{r_{p,eq}}\right)$$

dove:

- λ_{bf} è la conduttività termica del materiale di riempimento (*geothermal grout*), in questo caso malta;
- r_b è il raggio dela condotta;
- $r_{p,eq} = \sqrt{n} \cdot r_b$ è il raggio della condotta equivalente : n è posto uguale a 4 avendo considerato uno scambiatore con 2 condotte a U.

I valori inseriti nel foglio di calcolo sono riportati in *tabella 12*, qui sotto:

Tabella 12 - Valori di input per il calcolo del potenziale geotermico

Parameter	Symbol	Value	Unit
Threshold fluid temperature	T_{lim}	-2	°C
Borehole depth	L	100	m
Borehole radius	r_b	0.075	m
Simulated lifetime	t_s	20	years
Borehole thermal resistance	R_b	0.032	mK/W

Il valore di conduttività termica, indicata con λ, viene definito in funzione della stratigrafia dell'area considerata.

Dai dati disponibili è stata definita la stratigrafia nelle sezioni B-B' e C-C' (rappresentate in *figura 46*), stratigrafia che viene assunta costante per le intere sezioni.

In funzione del materiale considerato si assegnano i rispettivi valori di conducibilità termica raccolti in *tabella 13* e viene valutato il valore rappresentativo per l'intera area da inserire nel foglio di calcolo come media pesata dei valori riferiti al singolo materiale della sezione.

Tabella 13 - Valori di conduttività termica per i diversi materiali

Lithology	Class	λ_{dry}	λ_{wet}
Peat	1	0.4	0.4
Tuff	2	0.5	0.5
Loam soil	3	0.7	0.9
Clay	4	0.9	1.5
Clay and gravel	5	0.7	1.6
Silty clay	6	0.7	1.6
Gravel with clay	7	0.7	1.6
Basalt	8	1.7	1.7
Silt	9	0.5	1.7
Silty sand	10	0.5	1.7
Silty-clayey sand	11	0.6	1.7
Gravel	12	0.4	1.8
Clay and sand	13	0.8	2.0
Micaschist	14	2.0	2.0
Conglomerate with clay	15	1.6	2.1
Shales	16	2.2	2.2
Breccia	17	2.2	2.2
Phyllite	18	2.2	2.2
Sand and gravel	19	0.5	2.2
Calceschist	20	2.5	2.5
Marl	21	2.5	2.5
Sand	22	0.6	2.6
Calcarenite	23	2.7	2.7
Sandstone	24	2.8	2.8
Limestone	25	2.8	2.8
Conglomerate	26	2.8	2.8
Gneiss	27	2.9	2.9
Dolomite	28	3.0	3.0
Granite	29	3.0	3.0

Stesso procedimento viene applicato anche per il calcolo della capacità termica ricavando un valore che ricade nel range di variazione considerato per la grandezza ($1{,}8 \div 2{,}8 \cdot 10^6\ Jm^{-3}K^{-1}$).

I valori scelti risultano pari a:

- $\lambda = 1{,}785\ Wm^{-1}K^{-1}$
- $\rho c = 2{,}65 \cdot 10^6\ Jm^{-3}K^{-1}$

Infine è necessario definire la temperatura del terreno indisturbato, indicato con T_0: possono essere ricavati valori puntuali di temperatura dai pozzi, ma quest'ultimi non possono essere considerati rappresentativi dell'intero territorio considerato.

Per questo caso di studio, però, è stato assunto un valore di temperatura del terreno indisturbato pari a 14°C, valore ricavato dagli studi precedentemente effettuati sulla stessa area di indagine (Barla & Di Donna, 2015).

Per quanto riguarda il tempo di simulazione, ovvero t_c, viene scelta una durata di 183 giorni, valida per le aree in ZONA E, all'interno della quale rientra Torino, dove per legge la stagione di riscaldamento va dal 15 Ottobre al 15 Aprile.

Avendo considerato la stratigrafia costante su tutta l'area di interesse, i parametri del terreno rimarranno costanti e avendo assegnato la temperatura del terreno indisturbato, il valore di potenziale geotermico estraibile risulta essere costante su tutta l'area e pari a 10,81 MWh/y, ovvero 1234 W.

I risultati vengono elaborati su QGIS, ovvero un Sistema di Informazione Geografica Open Source, rilasciato sotto la GNU *General Public License*, e sono rappresentati in *figura 62*:

Figura 62 - Valori del potenziale geotermico ottenuti dall'applicazione del metodo G.POT

Capitolo 5

Modellazione numerica per la determinazione del potenziale geotermico dell'area di studio

5.1 Il codice di calcolo FEFLOW

Per la modellazione numerica dell'area di studio è stato utilizzato FEFLOW (*Finite Element subsurface FLOW system*), un codice di calcolo agli elementi finiti per la simulazione 2D e 3D dei processi di flusso e trasporto di massa e calore tra acqua di falda e terreno. Il programma è stato sviluppato nel 1979 dall' *Institute for Water Resources Planning and Systems Research Inc.* di Berlino, recentemente diventato parte del *DHI Group*.

Il software permette di simulare un elevato numero di processi che coinvolgono le dinamiche di flusso sotterraneo in situazioni complesse, il trasporto di contaminanti nell'acquifero ed il traporto di calore in mezzi porosi, in condizioni sature ed insature da scala locale a regionale.

L'utilizzo di un approccio agli elementi finiti, a differenza del metodo alle differenze finite usato dai classici modelli numerici di flusso delle acque sotterranee,

garantisce un'estrema flessibilità nella discretizzazione spaziale del dominio, una migliore rappresentazione delle condizioni di anisotropia e degli elementi naturali, tra cui anche elementi discreti come fratture singole o multiple.

L'uso del software di calcolo permette di simulare i sistemi fisici più complessi e multidimensionali che rendono i risultati ottenuti confrontabili con le situazioni reali e allo stesso tempo evitando l'eccessiva semplificazione che si ha nei modelli analitici. L'utilizzo di modelli numerici porta ad un aumento del numero di parametri di input da inserire, in quanto è possibile tenere in conto della loro variabilità spaziale, mentre per quanto riguarda i risultati, l'elaborazione dei dati di output richiede maggiori tempi di calcolo ma al contempo fornisce sia la variabilità spaziale che quella temporale.

L'interfaccia grafica (GUI) permette di definire diversi parametri, in particolare permette la costruzione della mesh, l'applicazione delle condizioni al contorno e la definizione delle proprietà dei materiali. Inoltre è possibile costruire un modello georiferito, simulando il trasporto di calore o di massa da dati spaziali esistenti.

Con riferimento al trasporto di calore, il codice consente un approccio completo allo studio della risorsa geotermica, offrendo in particolar modo una serie di funzionalità specifiche per impianti sia a ciclo aperto che a ciclo chiuso in fase di progettazione, gestione ed ottimizzazione.

5.1.1 Cenni sulle modalità di utilizzo del software

Il codice FEFLOW consente di discretizzare il dominio in una serie di elementi triangolari o quadrangolari.

La schermata di interfaccia del codice presenta una finestra di dialogo posizionata superiormente, pannelli posizionali lateralmente, dove sono riportate le mappe visualizzate nel modello e i parametri utilizzati, e una finestra centrale dove sono riportate le diverse viste del modello, come mostrato in *figura 63*:

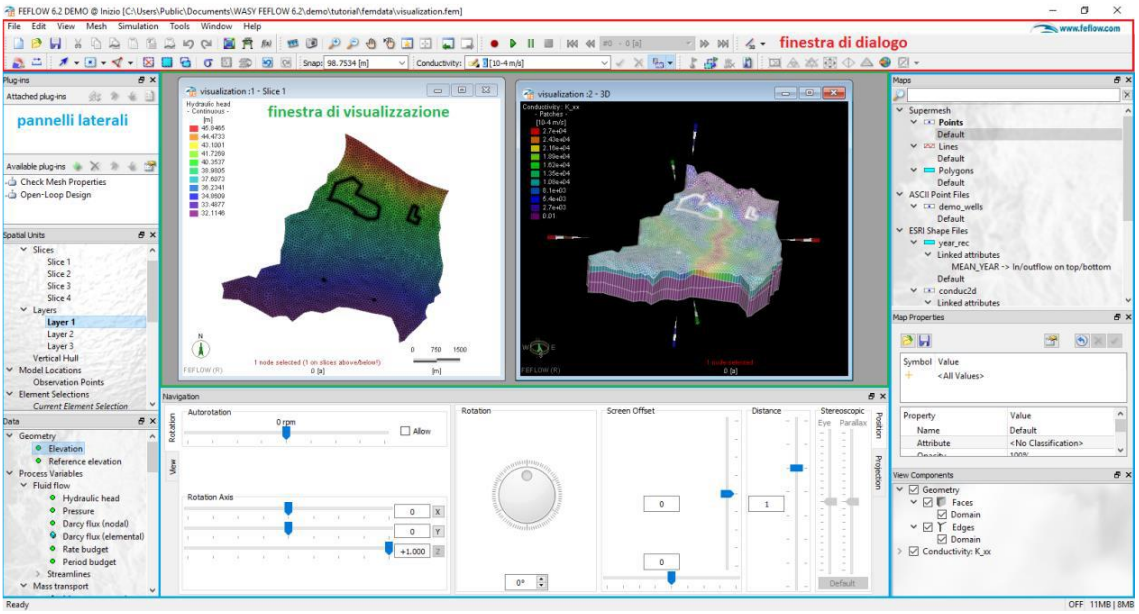

Figura 63 - Schermata di interfaccia del codice FEFLOW

La prima operazione da compiere è la creazione di un nuovo modello, azione che può essere svolta importando direttamente la geometria da una mappa in formato .shp, .pnt, .pli, .ply, .prt, etc… oppure creandola manualmente visualizzando la schermata in cui è possibile definire le dimensioni del modello e la posizione del sistema di riferimento globale e locale.

Definiti questi parametri, è possibile creare il dominio che si intende analizzare attraverso il comando crea poligono nella finestra di dialogo in alto. Il dominio potrà essere creato direttamente attraverso click del mouse o definito per coordinate premendo il tasto F2 ed inserendo nella finestra le coordinate dei vertici del modello separate da una virgola. Il dominio potrà ulteriormente essere suddiviso in sottodomini attraverso il comando *Split Polygon* presente nella finestra superiore.

La seconda operazione da compiere sarà quella di andare a definire la tipologia di trasporto, calore o massa, che si intende considerare e se questo flusso sarà di tipo statico o transitorio: per far ciò bisognerà aprire il menù a tendina e seguire il percorso *Edit-Problem Setting*; da quest'ultima finestra sarà possibile impostare le diverse condizioni di flusso a seconda delle caratteristiche del problema da analizzare, il tempo e la durata degli intervalli utilizzati per le simulazioni e diversi altri parametri che andranno poi a caratterizzare l'analisi (*figura 64*).

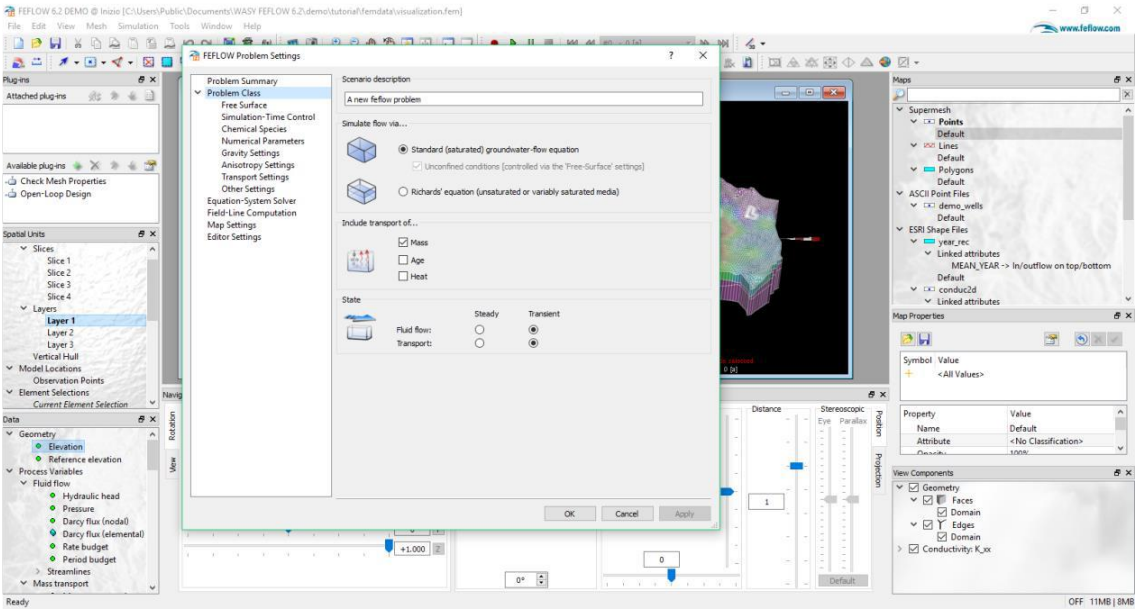

Figura 64 - Schermata delle impostazioni del problema

Si procede quindi con la creazione della mesh grazie al comando *Mesh Generator* avendo selezionato prima una tra le seguenti proposte:

- Advancing Front;
- Triangle;
- GridBuilder.

Nel primo caso il software genera una mesh che non tiene in considerazione la presenza di eventuali linee o punti presenti all'interno del modello; selezionando invece le altre due voci verrà generata una mesh che ne considera la presenza in modo tale da ottenere quindi risultati con una precisione maggiore nei punti di maggiore interesse, come mostrato in *figura 65*.

E' possibile definire anche la densità della mesh, che può variare nelle diverse zone del modello, e il numero di elementi da generare.

Il software prevede ancora la possibilità di creare una mesh quadrangolare selezionando dalla voce *Mesh* nella finestra di dialogo il comando *Quadrilateral Mode* e selezionando la voce *Transport Mapping* sarà quindi possibile generare una mesh con elementi quadrangolari che, a loro volta, potranno essere suddivisi ulteriormente lungo una o entrambe le diagonali.

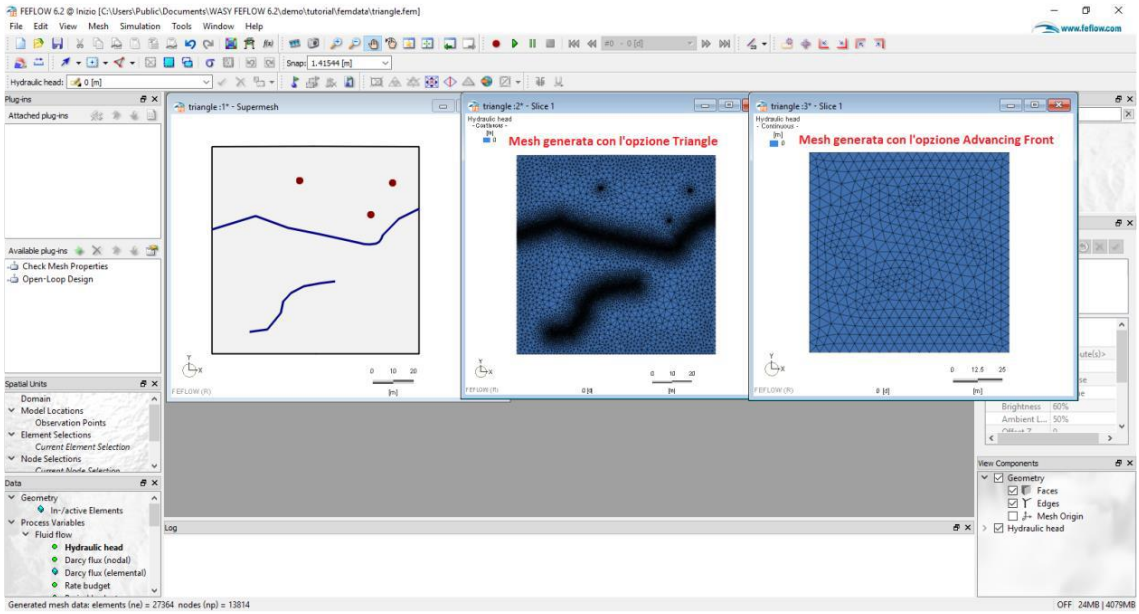

Figura 65 - Confronto tra le varie tipologie di mesh

Si procede quindi alla creazione del modello tridimensionale selezionando dal menù a tendina la voce Edit-3D Layer-Configuration che permette di aprire una finestra dove impostare la quota del piano superiore e il nuemro di strati in cui si vuole dividere il modello, come mostrato in *figura 66:*

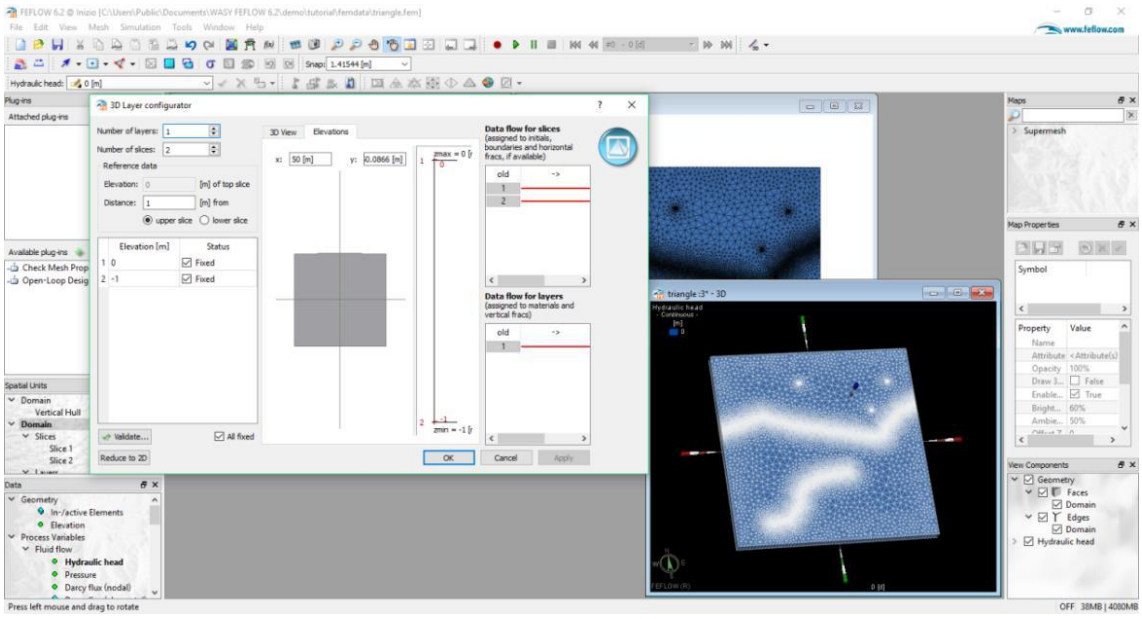

Figura 66 - Finestra di generazione del modello tridimensionale

Definita la geometria del modello, si passa ad assegnare agli elementi del modello le proprietà dei relativi materiali; dalla finestra di dialogo cliccando *Selection - Select Element* è possibile andare a selezionare, sulla faccia superiore del modello,

tutti gli elementi a cui si dovrà assegnare una determinata proprietà. Nel caso in cui tutti gli elementi rappresentino lo stesso materiale, e quindi siano caratterizzati dalle stesse proprietà, sarà possibile utilizzare il comando *Select All*.

La selezione potrà poi essere estesa anche agli altri layer del modello attraverso il comando *Copy to Slice/Layer* grazie al quale sarà possibile definire in una finestra in quali layer si vuole estendere la selezione degli elementi come mostrato in *figura 67:*

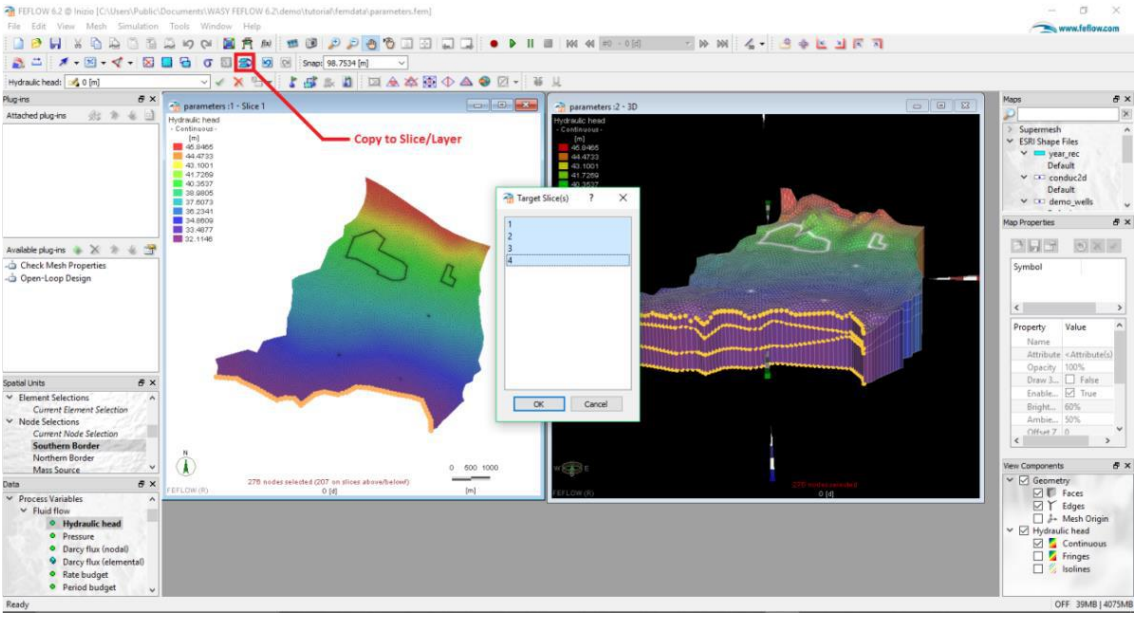

Figura 67 - Selezione degli elementi nel modello tridimensionale

Le proprietà del materiale sono raccolte nel pannello *Data* in basso a sinistra e le principali grandezze che si dovranno inserire sono:

- porosità;
- capacità termica volumetrica della fase solida e delle fase fluida;
- conducibilità idraulica K_{xx}, K_{yy} e K_{zz};
- conducibilità termica della fese solida e della fase fluida;
- fattore di anisotropia;
- dispersività longitudinale e trasversale;
- temperatura.

Cliccando due volte su ognuna di esse e digitando il valore nella casella posizionata in alto centralmente sarà possibile assegnare agli elementi selezionati il relativo valore.

Oltre a definire le caratteristiche dei materiali, è possibile poi imporre le condizioni al contorno che possono essere espresse in termini di flusso di calore o di flusso di un fluido; ad esempio cliccando sulla voce *Fluid-flux BC* è possibile impostare un certo flusso così da simulare una certa portata di acqua che entra in un nodo a cui è possibile assegnare una certa temperatura di ingresso tramite la voce *Temperature BC*. Un'altra possibilità è quella di imporre l'altezza idraulica degli elementi laterali del dominio grazie alla voce *Hydraulic-head BC* in modo da definire un certo flusso idrico all'interno del terreno come mostrato in *figura 68*:

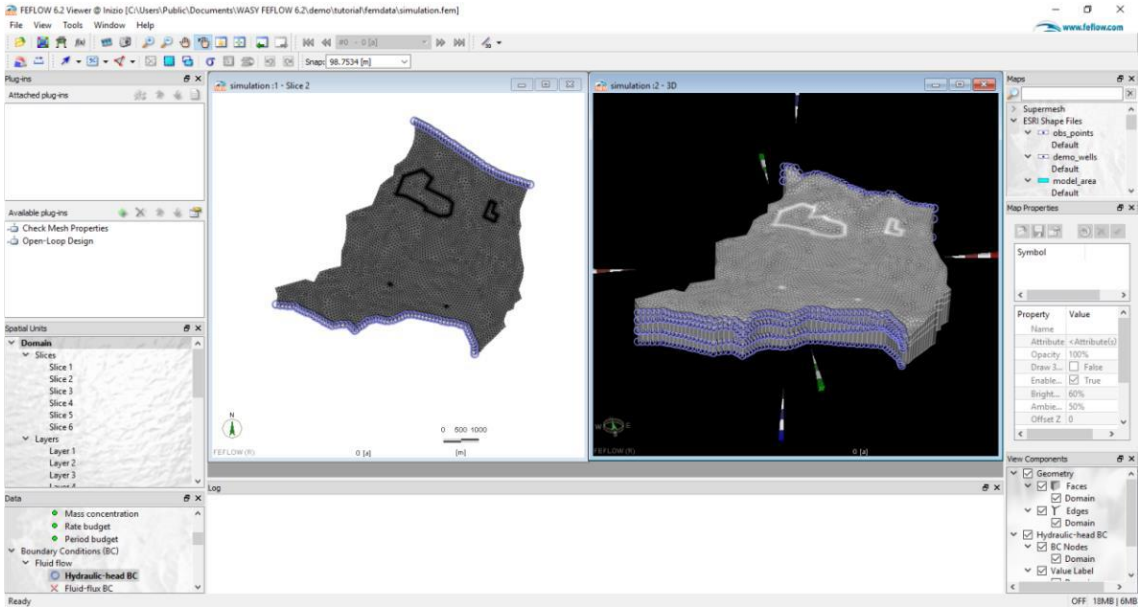

Figura 68 - Definizione delle condizioni al contorno: il cerchietto blu in corrispondenza dei nodi rappresentano l'assegnazione di una condizione al contorno, in questo caso una certa altezza idraulica per simulare un flusso di falda

Per i problemi che includono il trasporto di calore è possibile scegliere l'opzione *Borehole Heat Exchanger (BHE)* che permette di simulare il comportamento di uno scambiatore di calore andando a selezionare una serie di punti del modello allineati in direziona verticale. A questo punto facendo doppio click sul *Borehole Heat Exchanger Editor* comparso nella finestra di dialogo in alto è possibile inserire nella finestra che si aprirà le caratteristiche da assegnare alla sonda geotermica.

In particolare, come mostrato in *figura 69*, sarà possibile definire:

- temperatura di ingresso del fluido;
- apporto di calore esterno;
- differenza di temperatura;

- differenza di potenza;
- flusso immesso all'interno della sonda.

Nella parte inferiore viene invece richiesta la tipologia di sonda che si intende utilizzare, le relative caratteristiche geometriche e le caratteristiche termiche del fluido refrigerante. Sempre in questa sezione è possibile selezionare la tipologia di soluzione che si vuole adottare per lo studio del trasporto del calore; le due alternative proposte dal codice sono la soluzione di Eskilson & Claesson (1988), soluzione analitica implementata in FEFLOW, la quale considera una condizione stazionaria in cui risulta verificato l'equilibrio termico tra la tubazione di mandata e quella di ritorno per una data temperatura in corrispondenza delle pareti a doppia U coinvolge diversi materiali e parametri geotermici, che vengono forniti o dai produttori degli scambiatori o da prove sperimentali, e la soluzione di Al-Khoury et Bonnier (2006), i quali hanno utilizzato per primi un elemento monodimensionale per lo studio di una sonda geotermica a singolo e a doppio tubo a U.

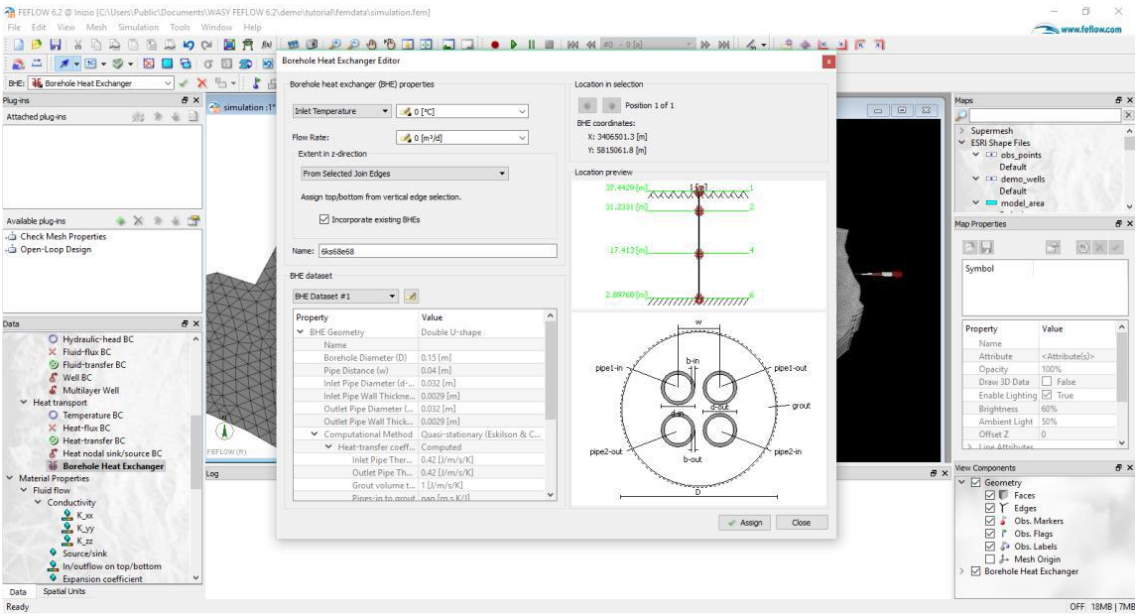

Figura 69 - Finestra di modellazione dello scambiatore di calore BHE

Per simulare la funzione di una condotta di una sonda geotermica o di altri elementi monodimensionali utili, come ad esempio una frattura all'interno del modello, sempre all'interno della finestra *Data* in basso a sinistra nella schermata di visualizzazione, è possibile selezionare la voce *Discrete Features*.

Per creare questa tipologia di elementi si devono selezionare, dalla vista in pianta del modello, i bordi degli elementi che andranno a costituire l'elemento monodimensionale che si vuole creare attraverso il comando *Select Join Edges* oppure *Select Slice Edges* (*figura 70*) e cliccando con il tasto destro del mouse sulla voce *Discrete Features*, si potrà selezionare una delle tre possibili soluzioni proposte dal software (Darcy, Hagen-Poiseuille o Manning-Strickler). Una volta comparso l'elemento creato, si potranno attribuire le relative caratteristiche tra le quali compaiono:

- sezione trasversale;
- raggio idraulico;
- capacità termica volumetrica della fase fluida;
- capacità termica della fase fluida;
- dispersività longitudinale.

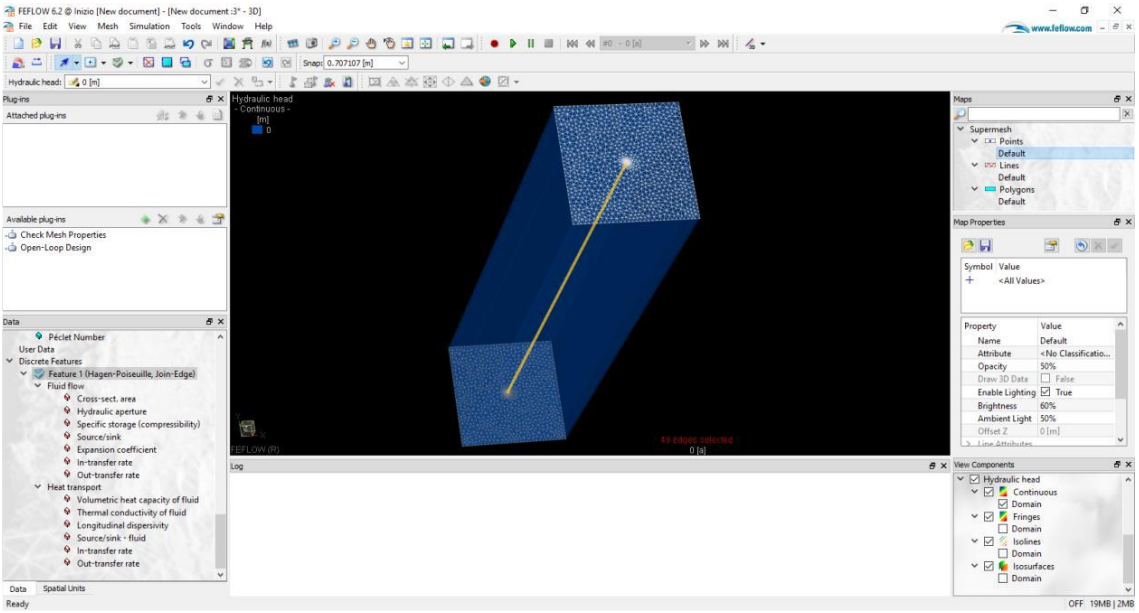

Figura 70 - Creazione di Discrete Feautures per simulare il comportamento di una sonda geotermica

Attraverso il comando *Inspect Nodal/Element Values* posizionato in alto a sinistra nella finestra di dialogo è possibile verificare la correttezza dei parametri inseriti all'interno del modello muovendo il cursore del mouse in corrispondenza di un nodo o all'interno di un elemento e il software restituirà una tabella nel pannello di destra in cui sono elencati tutti i parametri inseriti e i relativi valori.

E' possibile quindi avviare l'analisi attraverso il pulsante *Start* e i risultati ottenuti dall'analisi vengono valutati andando ad inserire degli *Observational Points* nei punti di maggiore interesse del modello, come ad esempio il punto di ingresso dell'acqua in una condotta, come mostrato in *figura 71:*

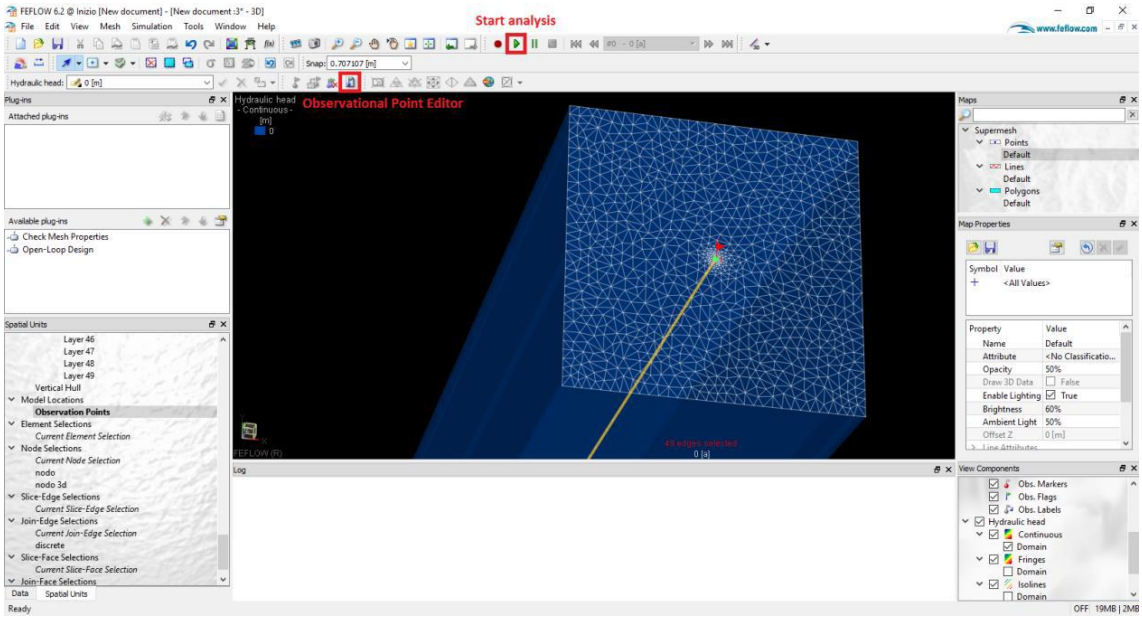

Figura 71 - Esempio di Observational Point

I risultati vengono raccolti in diagrammi visualizzabili facendo click con il tasto destro con il mouse e selezionando la voce *Charts*; in questi grafici verranno riportati i valori di temperatura locale, temperatura media, pressione e altezza idraulica in funzione del tempo e sono i valori misurati in corrispondenza dei punti definiti nella fase precedente. Una volta terminata l'analisi sarà inoltre possibile ripercorrere ogni step per valutare come varia la distribuzione delle diverse grandezze all'interno dell'intero modello e non solo nel singolo punto.

5.2 Modellazione numerica dell'area di studio

Al fine di valutare gli effetti generati dall'estrazione del calore dal terreno presso l'area di studio, è stato creato un modello numerico con il codice di calcolo FEFLOW.

Lo studio viene condotto utilizzando un unico modello tridimensionale che presenta le stesse caratteristiche dell'area di studio presentata nel Capitolo 4. L'utilizzo di un modello tridimensionale permette di considerare il flusso di calore entrante e uscente dal foro in direzione verticale, la stratigrafia del terreno, il gradiente verticale di temperatura, il trasporto del fluido refrigerante all'interno delle tubazioni e le corrette condizioni al contorno da imporre agli estremi del dominio. Dall'altro lato i modelli 3D presentano, però, lo svantaggio di richiedere un tempo di calcolo piuttosto elevato in quanto il modello è suddiviso in una serie di elementi di dimensioni piuttosto ridotte.

In questo capitolo, sulla base dei dati ottenuti dal metodo G.POT (Casasso & Sethi, 2016), la modellazione numerica verrà utilizzata per calcolare il potenziale geotermico dell'area di indagine considerando la situazione di terreno indisturbato.

I risultati verranno poi confrontati con quelli ottenuti dall'attivazione geotermica degli impianti già esistenti del grattacielo Intesa San Paolo e del Palazzo dell'Area Metropolitana di Torino.

5.2.1 Geometria del modello

Il modello è caratterizzato da una lunghezza di 400 m e una larghezza di 250 m, la profondità è di 120 m.

Nel modello viene inserito un BHE, il quale viene rappresentato con la sua geometria grazie a *Supermesh Points;* questi ultimi vengono utilizzati anche al fine di rappresentare i punti dove sono collocati gli scambiatori di calore già presenti nell'area di indagine, come mostrato in *figura 72*:

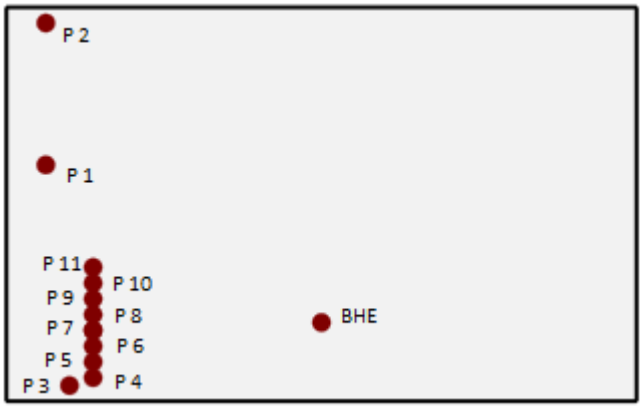

Figura 72 - Geometria del modello

Le coordinate degli scambiatori sono raccolte in *tabella 14*:

Tabella 14 - Coordinate di Supermesh Points nel modello

PALAZZO DELLA PROVINCIA		
BHE	x [m]	y[m]
P1	25	150
P2	25	240

GRATTACIELO INTESA		
BHE	x [m]	y[m]
P3	40	10
P4	55	15
P5	55	25
P6	55	35
P7	55	45
P8	55	55
P9	55	65
P10	55	75
P11	55	85

La sezione trasversale così definita è stata poi estrusa verticalmente per la costruzione del modello tridimensionale (*figura 73*), quest'ultimo presenta 41 strati aventi spessori differenti: negli strati superficiali (dal layer 1 al layer 3) lo spessore risulta di 5 m, mentre, procedendo con la profondità, lo spessore viene posto uguale a 1 m (dal layer 4 al layer 38) e negli ultimi strati (dal layer 39 al layer 41) aumenta a 10 m.

Questa scelta è giustificata dal fatto che ai fini dei risultati sono i primi strati che forniscono valori rilevanti, quindi negli ultimi strati si sono scelti spessori maggiori al fine di non incrementare l'onere computazionale del calcolo.

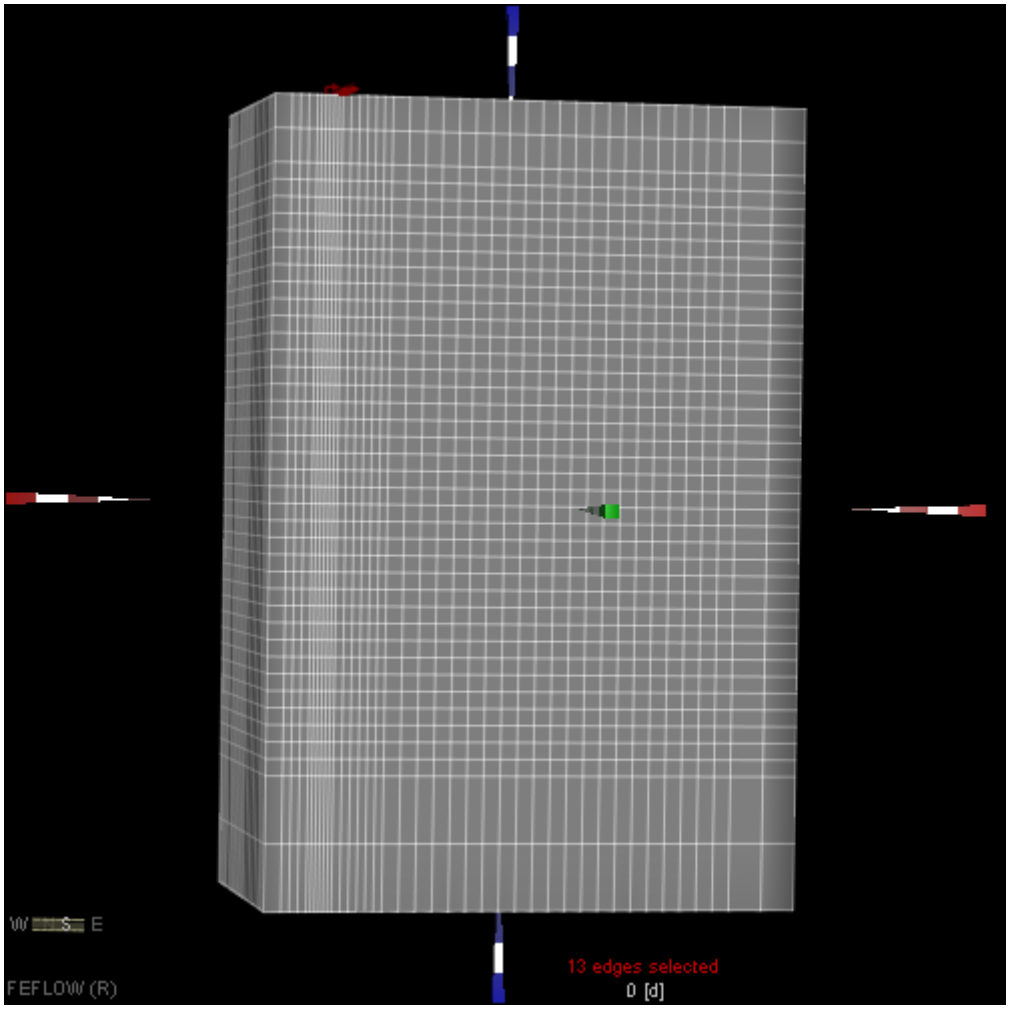

Figura 73 - Modello tridimensionale

5.2.2 Scelta della mesh

La mesh utilizzata per la simulazione appartiene alla tipologia *Triangle*, in quanto risulta la più adatta tra le opzioni fornite dal software FEFLOW per l'analisi perché semplice e snella e non comporta incrementi dei costi computazionali e delle tempistiche della simulazione.

Come già detto, la tipologia *Advancing Front*, non sarebbe stata l'ideale per un'analisi di questo tipo perché non riconoscendo la presenza di punti o linee all'interno del modello non avrebbe permesso la creazione degli elementi necessari all'analisi come gli scambiatori di calore e non avrebbe fornito risultati accurati nelle zone di interesse.

In *figura 74* viene riportata la Slice 1 del modello in cui si può osservare la mesh generata dal software:

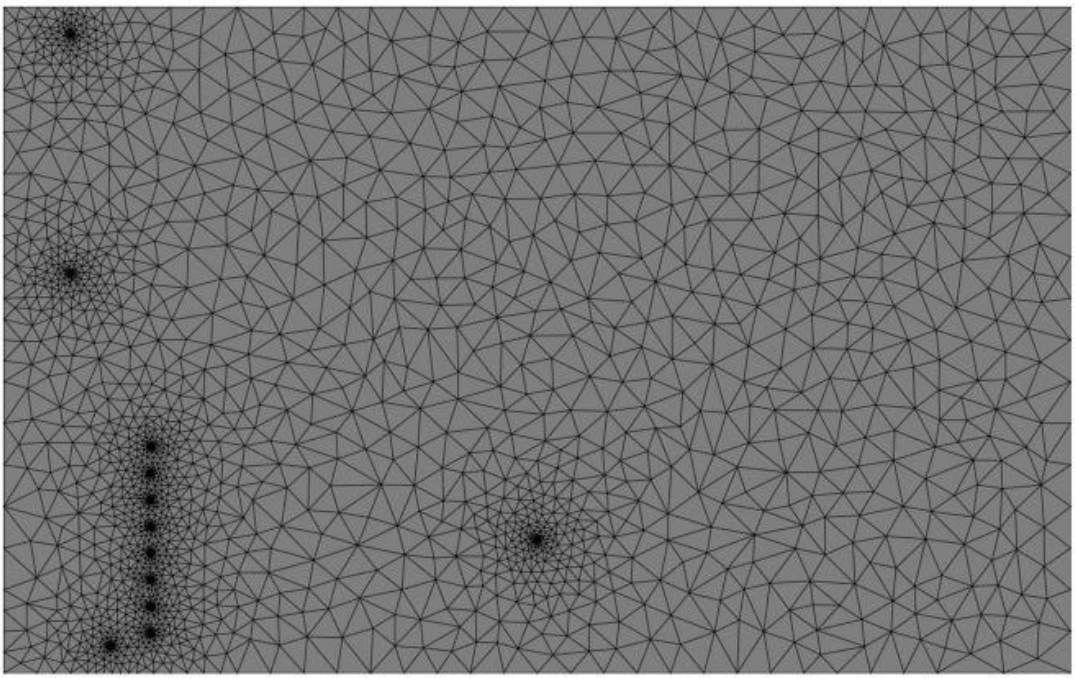

Figura 74 - Mesh del modello

Dal *Mesh Editor*, è stato imposto un raffinamento della mesh in corrispondenza dei *Supermesh Points* ma stabilendo una dimensione minima in corrispondenza dei punti al fine di evitare la creazione di elementi troppo piccoli e poco rappresentativi.

Inoltre in corrispondenza del punto in cui verrà installato il BHE, la mesh viene discretizzata in maniera tale da rappresentare il *virtual radius* dello scambiatore, come mostrato in *figura 75*:

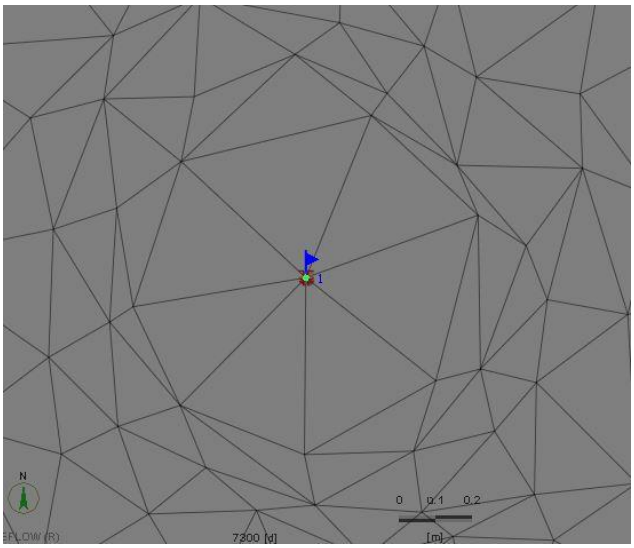

Figura 75 - Mesh in corrispondenza del BHE

Il numero finale di elementi nel modello per ciascun layer è pari a 5051.

5.2.3 Assegnazione dei parametri

A ciascun elemento del modello vengono assegnate le proprietà termoidrauliche, in base alle caratteristiche idrogeologiche discusse nel Capitolo 4, per la simulazione dei processi di flusso e trasporto di calore.

Nella *tabella 15* successiva vengono riportati i valori assegnati ai diversi parametri del suolo:

Tabella 15 - Parametri assegnati ai layer del modello

Proprietà dei materiali	da LAYER 1 a LAYER 4	da LAYER 5 a LAYER 14	da LAYER 15 a LAYER 30	da LAYER 31 a LAYER 41
Conducibilità idraulica orizzontale del terreno [m/s] $K_{xx}=K_{yy}$	1.00E-03	4.20E-03	4.95E-06	1.00E-05
Conducibilità idraulica verticale del terreno [m/s] K_{zz}	5.00E-05	2.10E-04	2.47E-07	5.00E-07
Coefficiente di immagazzinamento [m^{-1}]	1.00E-04	1.00E-04	1.00E-03	1.00E-03
Capacità termica volumetrica dell'acqua [MJ/m^3/K] $c_w\rho_w$	4.2	4.2	4.2	4.2
Capacità termica volumetrica del suolo [MJ/m^3/K] $c_s\rho_s$	2	2	2.5	2.5
Conducibilità termica dell'acqua [W/m/K] λ_w	0.65	0.65	0.65	0.65
Conducibilità termica del suolo [W/m/K] λ_s	1.8	2.8	1.8	1.8
Fattore di anisotropia	1	1	1	1
Dispersione termica longitudinale dell'acquifero [m]	3.1	3.1	3.1	3.1
Dispersione termica trasversale dell'acquifero [m]	0.3	0.3	0.3	0.3
Porosità del suolo [-]	0.24	0.25	0.08	0.23

5.2.4 Condizioni al contorno

Nel modello sono state applicate opportune condizioni al contorno al bordo al fine di fissarne delle caratteristiche che non varieranno durante la simulazione. In particolare in queste simulazioni sono state inserite condizioni al contorno riguardanti la temperatura e condizioni al contorno riguardanti l'altezza di falda.

All'ultima slice viene assegnata condizione di flusso nullo.

Su tutti i restanti nodi del modello è poi stata imposta una condizione iniziale, che risulta differente da una condizione al contorno in quanto essa può variare durante la simulazione. A tutti i nodi è stata assegnata una temperatura di partenza di 14 °C che rappresenta la temperatura media dell'acquifero nell'area considerata durante l'anno.

Infine opportune condizioni al contorno sono state imposte unicamente sui nodi del bordo destro e sinistro del modello al fine di rappresentare il livello e il flusso di falda che si muove da sinistra a destra in direzione del fiume Po. Queste condizioni al contorno rimarranno invariate per tutte le successive analisi che verranno eseguite.

In particolare nel modello per rappresentare l'acquifero superficiale, che si estende dai 15 m ai 40 m al di sotto del piano campagna, si impone un flusso di falda di 1,5 m/d: pertanto nota la conducibilità idraulica del terreno, è possibile calcolare, con la legge di Darcy, la differenza delle altezze idrauliche ai due estremi del modello:

$$\Delta H = \frac{v \cdot L}{k}$$

che risulta essere pari a 1,65 m.

Alla profondità di 80 m dal piano campagna viene considerato anche un acquifero profondo confinato: per questo acquifero non viene considerato un flusso di falda per cui i valori di altezza idraulica saranno uguali sia sul bordo destro che sul bordo sinistro del modello.

I valori di altezza piezometrica assegnata ai bordi del modello sono raccolti in *tabella 16*:

Tabella 16 - Altezze piezometriche assegnate ai bordi del modello

Acquifero superficiale		Acquifero profondo	
H bordo sinistro	105 m	H bordo sinistro	40 m
H bordo destro	103.35 m	H bordo destro	40 m

Infine agli slices appartenenti all'acquicludo vengono applicate altezze piezometriche variabili linearmente tra il valore assegnato all'acquifero superficiale e il valore assegnato all'acquifero profondo confinato.

5.3 Simulazione numerica dell'area di studio

Inizialmente è stata eseguita un'analisi in condizioni di flusso stazionario trascurando il trasporto di calore all'interno del modello: vengono assegnate le condizioni al contorno riguardanti l'altezza idraulica e le temperatura precedentemente descritte.

Questa prima analisi permette di ottenere la distribuzione iniziale di pressione, altezza idraulica e posizione di falda, come mostrato in *figura 76* e *figura 77* di seguito riportate.

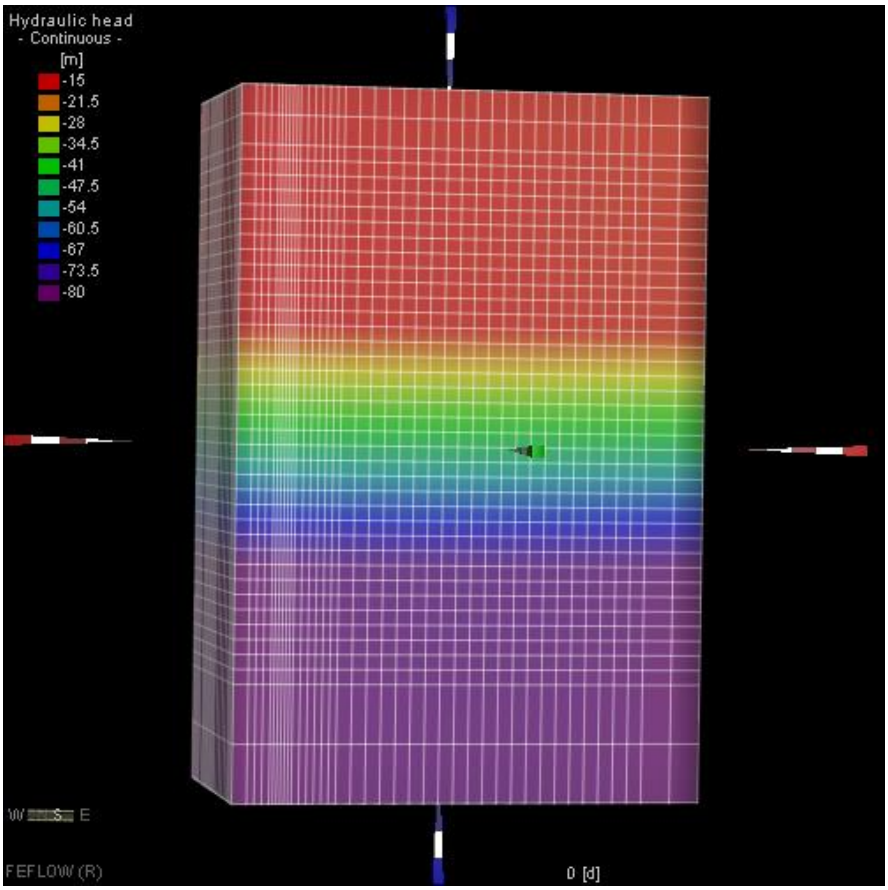

Figura 76 - Distribuzione iniziale delle altezze piezometriche

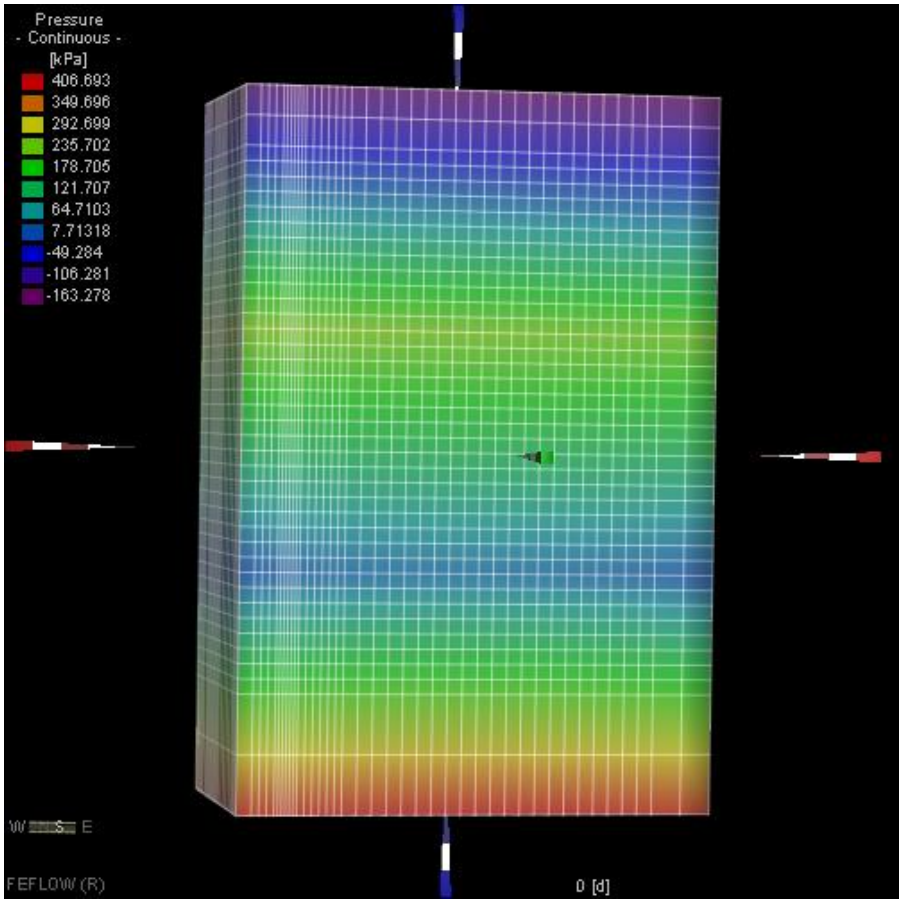

Figura 77 - Distribuzione iniziale delle pressioni

E' possibile ora, partendo dalle condizioni iniziali, lanciare le diverse analisi del modello nel quale viene considerato il trasporto di calore all'interno del terreno.

La durata delle simulazioni viene posta uguale a 20 anni, al fine di eseguire una simulazione a lungo termine.

Tutte le analisi sono state eseguite impostando un errore di tolleranza pari a 10^{-3} e un numero massimo di iterazioni per ogni time-step pari a 12.

5.3.1 Analisi A: Situazione di terreno naturale

5.3.1.1 Descrizione dell'analisi

Nella prima analisi viene analizzata la condizione di terreno naturale senza attivazione di altri impianti preesistenti, così come nel metodo G.POT.

A partire dai valori ottenuti dall' inizializzazione del modello, ovvero dalla distribuzione di altezza idraulica e di pressione in regime stazionario, è stato realizzato un nuovo modello in cui viene considerato il flusso di calore all'interno del terreno: i flussi di fluido e calore vengono considerati come transitori.

Per la modellazione dello scambiatore di calore viene scelta l'opzione *Borehole Heat Exchanger (*BHE) andando a selezionare una serie di punti del modello allineati in direziona verticale.

Nel pannello *Editor* è possibile andare a definire le caratteristiche geometriche dello scambiatore, raccolte in *tabella 17*:

Tabella 17 - Parametri geometrici del BHE

Lunghezza della sonda	100 m
Diametro	0.15 m
Diametro della tubazione in ingresso	0.032 m
Diametro della tubazione in uscita	0.032 m
Spessore della tubazione in ingresso	0.0029 m
Spessore della tubazione in uscita	0.0029 m
Distanza tra le condotte	0.04 m
Area condotta	0.000539 m^2
Raggio idraulico	0.0131 m

Vengono inoltre assegnati come parametri di input la portata e la temperatura del fluido refrigerante in ingresso nelle tubazioni.

Il valore di portata viene definito andando a moltiplicare l'area delle tubazioni per la velocità del fluido in ingresso; quest'ultima viene posta uguale a 0,3 m/s, valore ricavato da studi precedentemente effettuati (Barla et. al, 2016).

Il valore di portata applicato risulta, quindi, pari a 28 m^3/d.

La temperatura del fluido in ingresso viene definita in funzione della quantità di calore calcolata con il metodo G.POT: calcolato il potenziale geotermico, è possibile

definire la funzione di carico termico corrispondente la quale presenta una forma emisinusoidale.

La quantità di calore, espressa in Watt, che può essere scambiata viene calcolata attraverso l'espressione:

$$Q = m \cdot c_w \cdot (T_{in} - T_{out})$$

dove:

- m è la velocità di flusso massica, ovvero la massa che scorre attraverso una sezione nell'unità di tempo e che quindi può essere calcolata come il prodotto tra la densità del fluido refrigerante ρ e la portata volumetrica:

  $$m = \rho \cdot V = \rho \cdot A \cdot v$$

  dove A è l'area delle condotte e v è la velocità del fluido refrigerante;
- c_w è il calore specifico del fluido refrigerante pari a 4186 $Jkg^{-1}K^{-1}$;
- $|T_{in} - T_{out}|$ è la differenza di temperatura del fluido refrigerante in ingresso e in uscita dall'impianto.

Dall'applicazione della formula inversa è possibile quindi calcolare la differenza di temperatura minima cercata.

Inoltre la media tra la minima temperatura del fluido in ingresso e in uscita, quindi in corrispondenza del picco nella stagione di riscaldamento, deve essere pari a -2°C, ovvero pari alla T_{lim} del metodo G.POT, che rappresenta la minima temperatura del fluido termovettore raggiunta nei 183 giorni della stagione.

Mettendo a sistema quest'ultima condizione con il valore della differenza di temperatura calcolata precedentemente, è possibile definire il minimo valore di temperatura in ingresso che rappresenta quindi il valore di *Inlet Temperature* da applicare al BHE.

Questo valore viene mantenuto costante nel corso della stagione al fine di ridurre l'onere computazionale del calcolo e fornisce i risultati nella situazione più gravosa a cui l'impianto può essere sottoposto.

In corrispondenza del nodo in superficie dove è posizionato il BHE viene inoltre posto un *Observational Points* così da monitorare i valori di temperatura in entrata e in uscita.

5.3.1.2 Risultati

Dai valori ottenuti di temperatura del fluido in entrata e in uscita è possibile calcolare la quantità di calore scambiata.

Quest'ultima, espressa in Watt, viene calcolata, come precedentemente detto, attraverso l'espressione:

$$Q = m \cdot c_w \cdot (T_{in} - T_{out})$$

Dall'applicazione della formula è possibile quindi calcolare la quantità di calore cercata.

Di seguito vengono rappresentati i valori ottenuti dal primo al decimo anno (*figura 78*) e dall'undicesimo al ventesimo anno (*figura 79*).

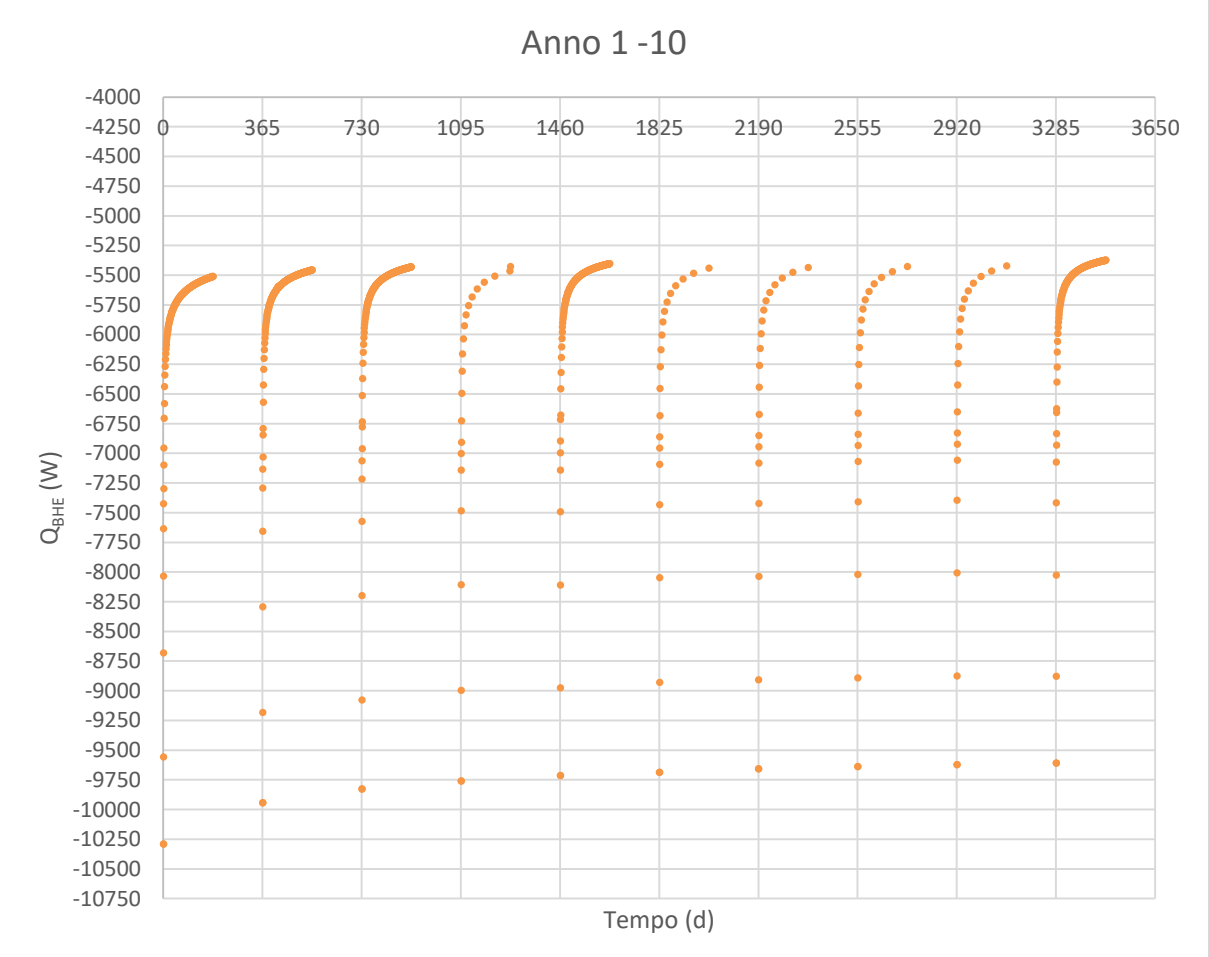

Figura 78 - Quantità di calore scambiata dal primo al decimo anno

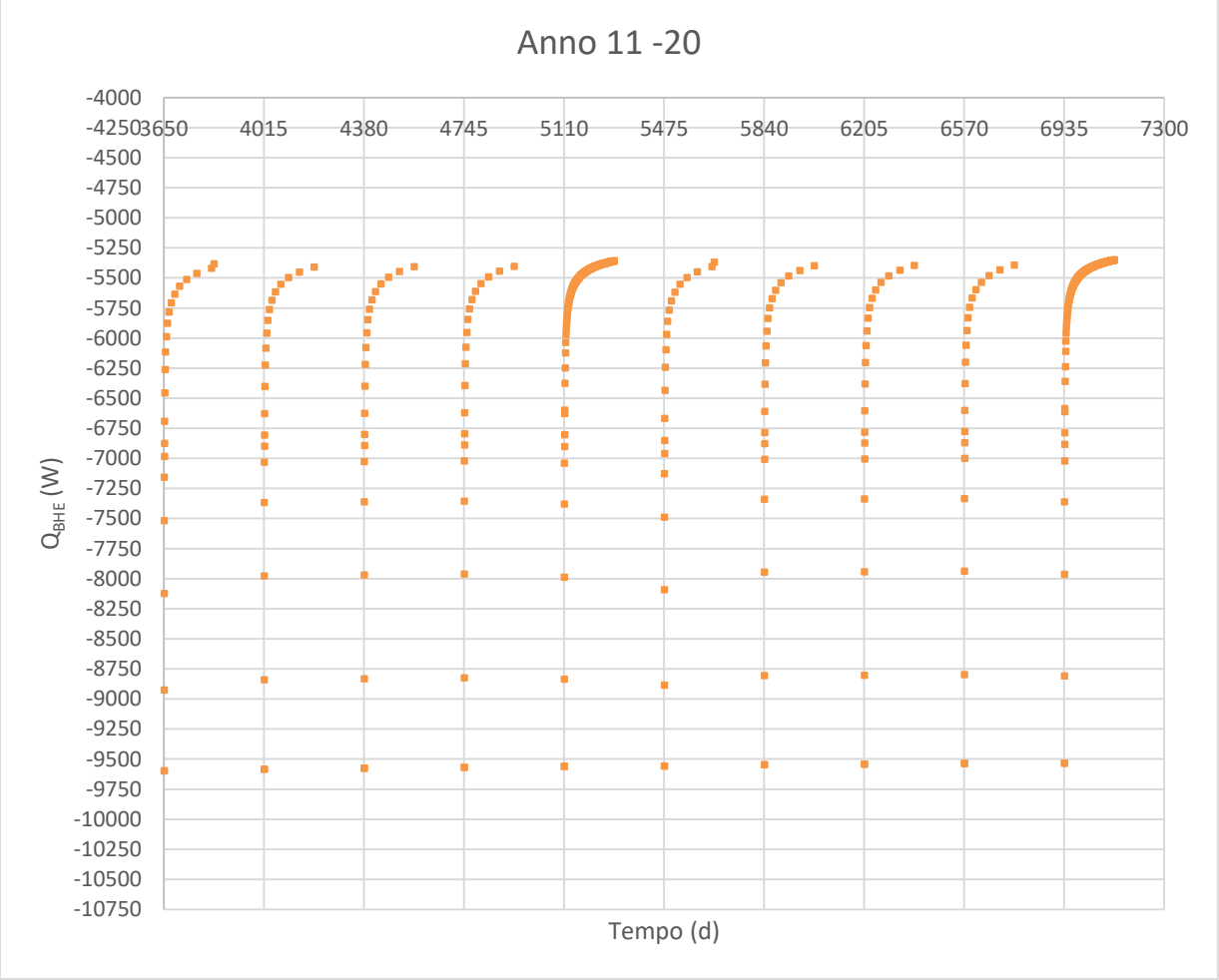

Figura 79 - Quantità di calore scambiata dall'undicesimo al ventesimo anno

E' possibile notare come la quantità di calore scambiata non rimanga costante negli anni, ma tenda a diminuire andando avanti nel tempo.

Questo vuol dire che negli anni c'è deriva termica e il BHE funziona in un contesto che risulta essere geoalterato, ovvero il flusso di falda non è in grado di annullare completamente il thermal plume alla fine della stagione di riscaldamento e riportare, quindi, la temperatura del terreno interessato dallo scambio di calore a 14°C.

Questa considerazione trova conferma anche nei valori minimi di temperatura di uscita del fluido refrigerante, i quali come mostrato in *tabella 18*, seguono un andamento decrescente nel tempo.

Tabella 18 - Valori di temperatura in uscita del fluido refrigerante al termine di ciascuna stagione di riscaldamento

Stagione	T_{out} [°C]
1	0.650
2	0.610
3	0.591
4	0.587
5	0.570
6	0.599
7	0.594
8	0.589
9	0.585
10	0.549

Stagione	T_{out} [°C]
11	0.557
12	0.577
13	0.574
14	0.572
15	0.539
16	0.547
17	0.568
18	0.566
19	0.565
20	0.533

E' possibile calcolare i valori di potenza scambiata per ciascuna stagione andando a moltiplicare la quantità di calore scambiata in ogni *timestep* per il valore stesso di *timestep* corrispondente e andando a dividere il valore ottenuto per 183 giorni, durata della stagione di riscaldamento, è possibile ottenere la potenza media in Watt scambiata per ciascuna stagione.

I risultati vengono raccolti in *tabella 19* e seguono anch'essi un andamento decrescente nel tempo:

Tabella 19 - Valori di potenza stagionale e potenza media per ciascun ciclo di riscaldamento

Anno	Q_{stag} [Wd]	Q_{media} [W]
1	1029692	5627
2	1020322	5576
3	1014323	5543
4	1017927	5562
5	1008342	5510
6	1013621	5539
7	1012144	5531
8	1010972	5524
9	1009994	5519
10	1002272	5477

Anno	Q_{stag} [Wd]	Q_{media} [W]
11	1008400	5510
12	1007801	5507
13	1007257	5504
14	1006766	5501
15	999522	5462
16	1005927	5497
17	1005540	5495
18	1005217	5493
19	1004914	5491
20	997881	5453

Vengono calcolati, inoltre, i valori di T_{lim} nelle diverse stagioni di riscaldamento come media delle temperature di ingresso e di uscita nei diversi anni.

I risultati sono raccolti in *tabella 20*:

Tabella 20 - Valori di T_{lim} valutati per ciascuna stagione di riscaldamento

Stagione	T_{lim} [°C]
1	-2.566
2	-2.622
3	-2.648
4	-1.89
5	-2.674
6	-1.876
7	-1.885
8	-1.893
9	-1.9
10	-2.701

Stagione	Tlim [°C]
11	-1.923
12	-1.9145
13	-1.9182
14	-1.9216
15	-2.7126
16	-1.94
17	-1.9299
18	-1.9321
19	-1.9341
20	-2.7196

Andando invece ad analizzare i *thermal plume* ottenuti al termine delle stagioni di riscaldamento, intesi come distribuzione di incrementi di temperatura nel tempo causati dall'estrazione di potenziale, è possibile vedere come essi varino in funzione della stratigrafia del modello e della presenza di falda, come è possibile vedere dalla *figura 80, figura 81, figura 82 e figura 83* :

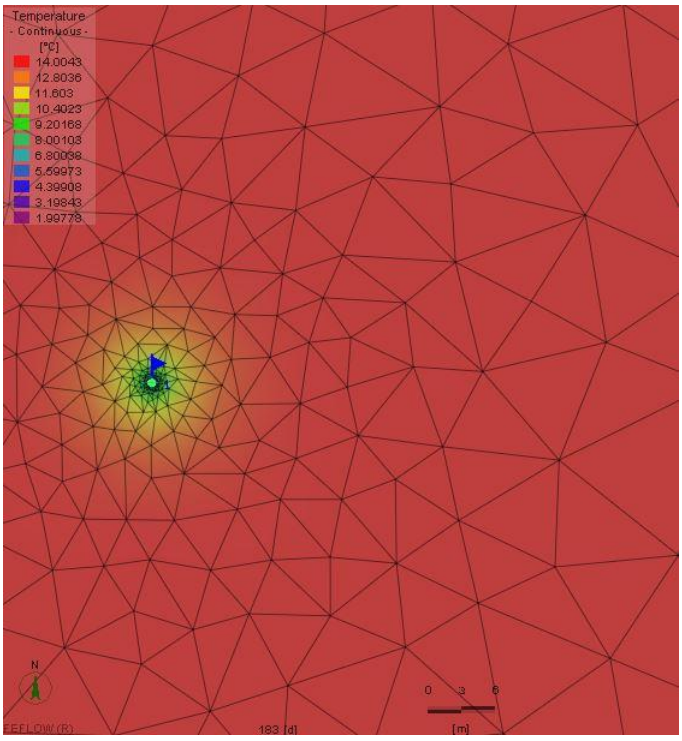

Figura 80 - Thermal plume nello strato al di sopra dell'acquifero superficiale

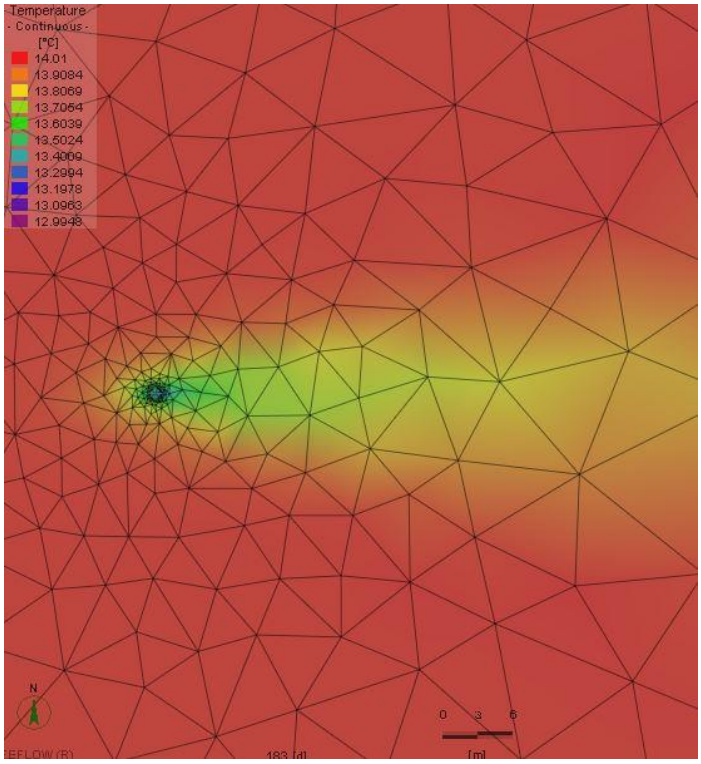

Figura 81 - Thermal plume nello strato dell'acquifero superficiale

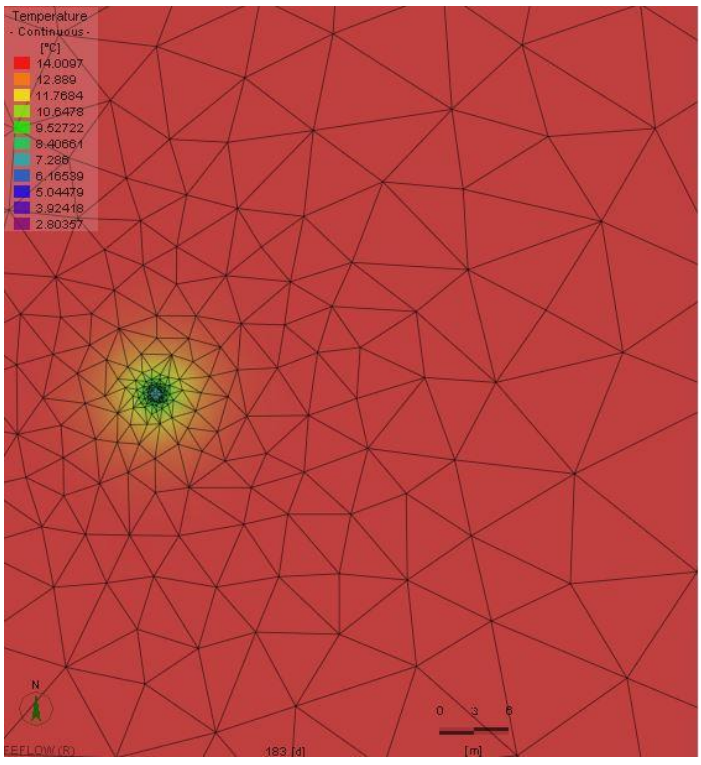

Figura 82 - Thermal plume nello strato dell'acquitardo

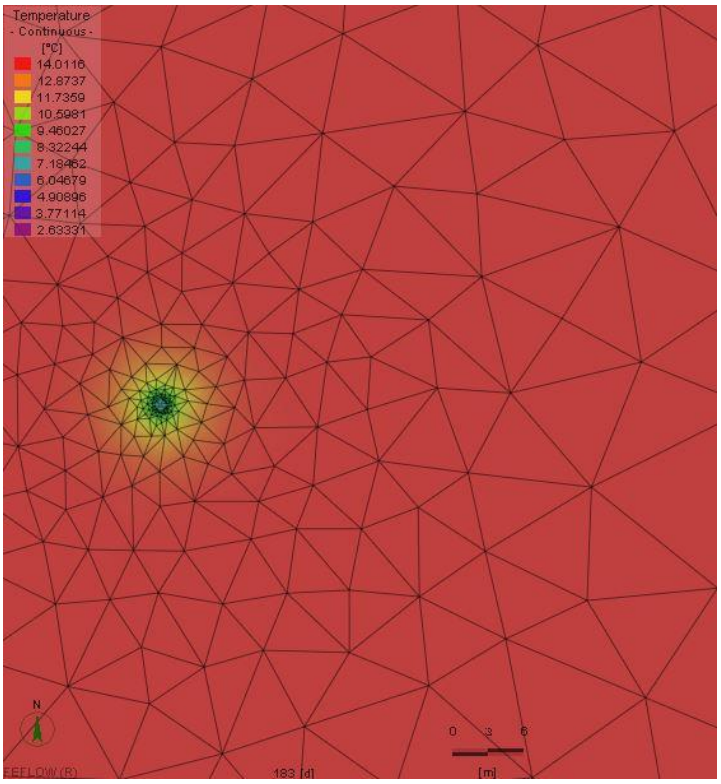

Figura 83 - Thermal plume nello strato dell'acquifero profondo confinato

Si nota infatti che il *thermal plume* del secondo strato (*figura 81*) presenta il centro in corrispondenza del BHE e un'asse centrale che segue le linee di flusso di falda, negli altri strati (*figura 80*, *figura 82*, *figura 83*), invece, rimane confinato attorno al BHE a causa della mancanza di flusso di falda (l'acquifero confinato viene considerato fermo) e delle caratteristiche di capacità termica e conducibilità che negli strati al di sotto dell'acquifero superficiale risultano essere nettamente inferiori.

5.3.2 Analisi B: Attivazione della sonda geotermica e degli impianti esistenti nell'area

5.3.2.1 Descrizione dell'analisi

In questa analisi oltre allo scambiatore di calore, vengono attivati i pozzi degli impianti geotermici già presenti nell'area.

Nell'area di studio ricadono i 9 pozzi di immissione del grattacielo Intesa San Paolo e i due pozzi del palazzo dell'Area Metropolitana di Torino, di cui uno di immissione e uno di estrazione.

Inizialmente il pozzo P1 era di immissione mentre il pozzo P2 di estrazione, quando però è stato messo in opera l'impianto del grattacielo Intesa San Paolo questo ordine è stato invertito al fine di evitare interferenze date dalla vicinanza dei pozzi di immissione.

I pozzi ricadenti nell'area di studio, assunti come verticali, vengono rappresentati applicando la *Multilayer Wells BC* agli elementi verticali al di sotto dei *Supermesh Points* di cui si è parlato precedentemente.

Per definire l'andamento nel tempo della portata passante nei pozzi di immissione viene definita una *Time Series*, i cui valori sono raccolti in *tabella 21*, sulla base di studi precedentemente effettuati sull'area (*Barla et al., 2017*)

Tabella 21 - Time Series per la portata di fluido refrigerante passante negli impianti esistenti

Grattacielo Intesa San Paolo	
Tempo [d]	Portata [m³/d]
0	460
30	340
45	0
60	160
125	250
160	160
185	125
245	400
275	640
305	740
335	700
365	460

Palazzo dell'Area Metropolitana	
Tempo [d]	Portata [m³/d]
0	2250
5	1500
30	400
45	0
215	300
245	1340
275	2000
305	2500
340	2250
365	2250

Inoltre al pozzo di estrazione del palazzo dell'Area Metropolitana di Torino viene applicata una *Time Series* per la portata i cui valori risultano uguali e di segno opposto alla *Time Series* definita per il pozzo di immissione dello stesso impianto.

Vengono inoltre applicate *Temperature BC* ai nodi appartenenti ai pozzi di immissione così da definire la temperatura dell'acqua in ingresso: anche per quest'ultima viene definita una *Time Series* così da descriverne l'andamento nel tempo (*tabella 22*).

Tabella 22 - Time Series per la temperatura del fluido refrigerante passante negli impianti esistenti

Grattacielo Intesa San Paolo	
Tempo [d]	Temperatura [°C]
0	22
15	15.8
45	11
85	10
110	10.5
140	14
175	22
365	22

Palazzo dell'Area Metropolitana	
Tempo [d]	Temperatura [°C]
0	22.5
45	14
235	22.5
365	22.5

L'analisi termica viene condotta su una durata di 20 anni al fine di valutare gli effetti a lungo termine.

5.3.2.2 Risultati

L'analisi viene condotta al fine di valutare l'interferenza degli impianti esistenti sui valori di calore scambiato dal BHE.

In *figura 84* e *figura 85* vengono riportate le quantità di calore scambiate nei diversi anni:

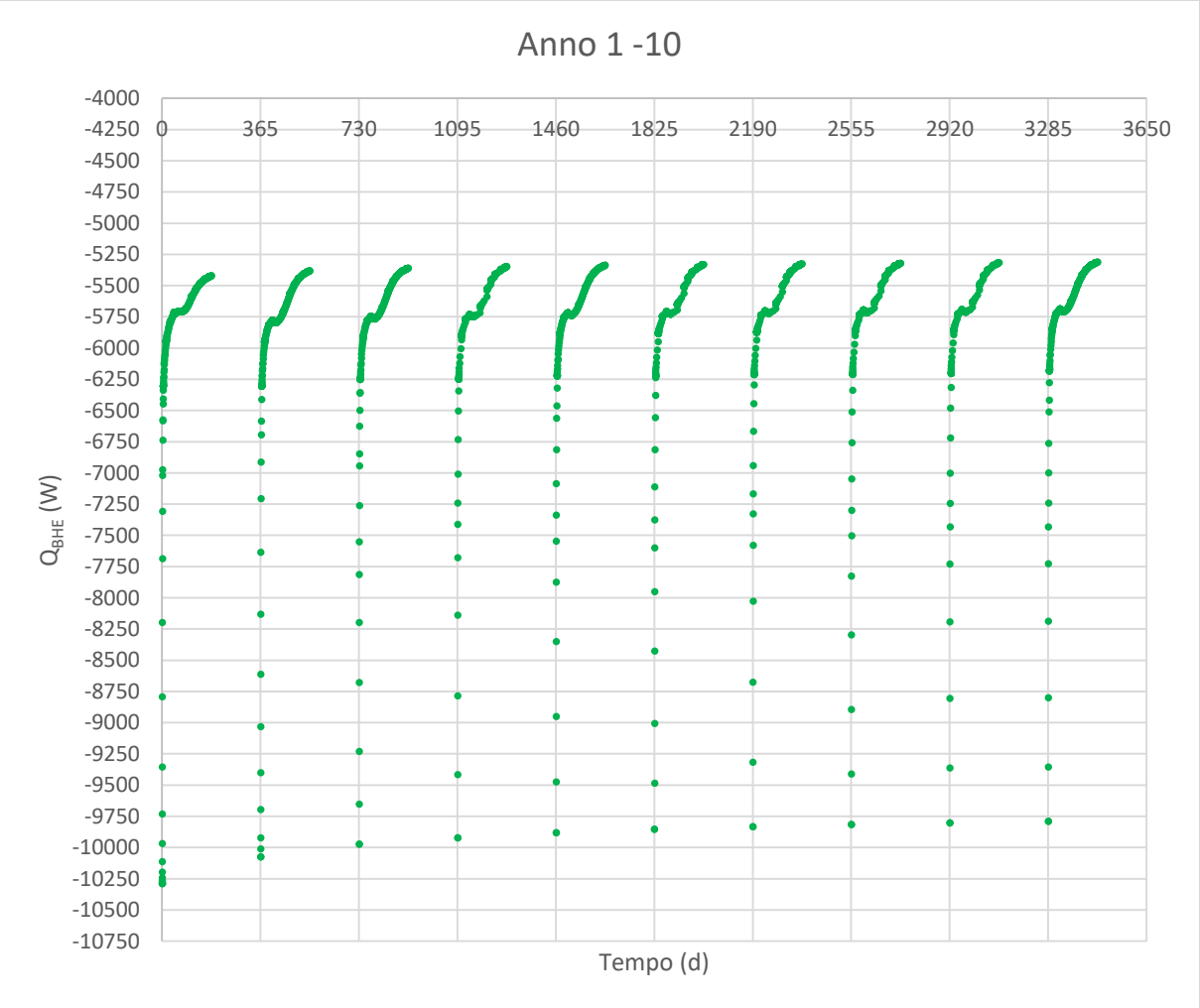

Figura 84 - Andamento della quantità di calore scambiata dal primo al decimo anno

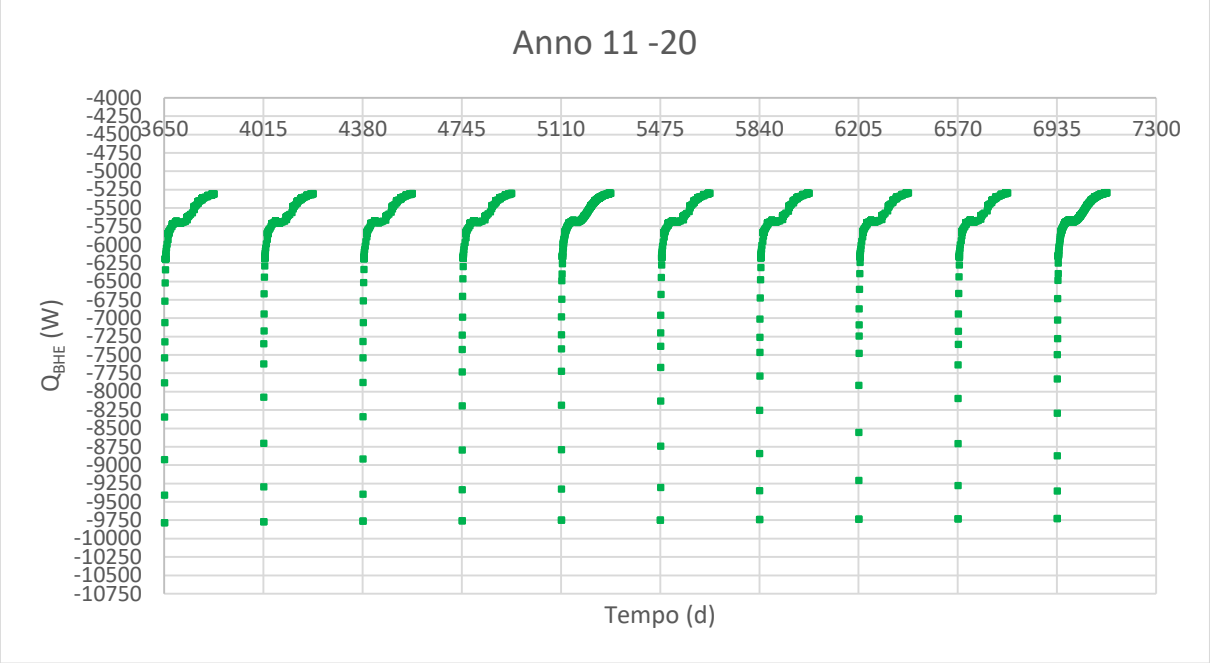

Figura 85 - Andamento della quantità di calore scambiata dall'undicesimo al ventesimo anno

Anche in questo caso la deriva termica trova conferma nella diminuzione della quantità di calore scambiata oltre che nei valori della temperatura di uscita del fluido refrigerante alla fine di ciascuna stagione riscaldamento, i cui valori sono raccolti in *tabella 23*:

Tabella 23 - Valori di T_{out} registrati alla fine di ciascuna stagione di riscaldamento

Stagione	T_{out} [°C]
1	0.584
2	0.554
3	0.539
4	0.530
5	0.522
6	0.517
7	0.514
8	0.509
9	0.507
10	0.503

Stagione	T_{out} [°C]
11	0.502
12	0.500
13	0.498
14	0.496
15	0.494
16	0.496
17	0.494
18	0.493
19	0.492
20	0.490

Come nella simulazione precedente viene calcolata la potenza media scambiata in ciascuna stagione e i valori di T_{lim} : i risultati ottenuti sono raccolti in *tabella 24* e *tabella 25*:

Tabella 24 - Valori di potenziale stagionale e potenziale medio per ciascun ciclo di riscaldamento

Anno	Q_{stag} [Wd]	Q_{media} [W]
1	-1032258	-5641
2	-1032548	-5642
3	-1027316	-5614
4	-1025964	-5606
5	-1022371	-5587
6	-1022351	-5587
7	-1021013	-5579
8	-1020090	-5574
9	-1019230	-5570
10	-1017151	-5558

Anno	Q_{stag} [Wd]	Q_{media} [W]
11	-1018105	-5563
12	-1017417	-5560
13	-1017069	-5558
14	-1016644	-5555
15	-1014759	-5545
16	-1016112	-5553
17	-1015770	-5551
18	-1015372	-5548
19	-1015158	-5547
20	-1013508	-5538

Tabella 25 - Valori di T_{lim} registrati al termine di ciascuna stagione di riscaldamento

Stagione	T_{lim} [°C]
1	-2.534
2	-2.584
3	-2.617
4	-2.603
5	-2.645
6	-2.614
7	-2.618
8	-2.625
9	-2.629
10	-2.669

Stagione	Tlim [°C]
11	-2.6219
12	-2.6384
13	-2.6265
14	-2.6409
15	-2.6725
16	-2.642
17	-2.6415
18	-2.6485
19	-2.6468
20	-2.6749

5.4 Discussione dei risultati ottenuti

In *figura 86* e *figura 87* vengono messe a confronto le quantità di calore estratte stagionalmente nelle diverse simulazioni:

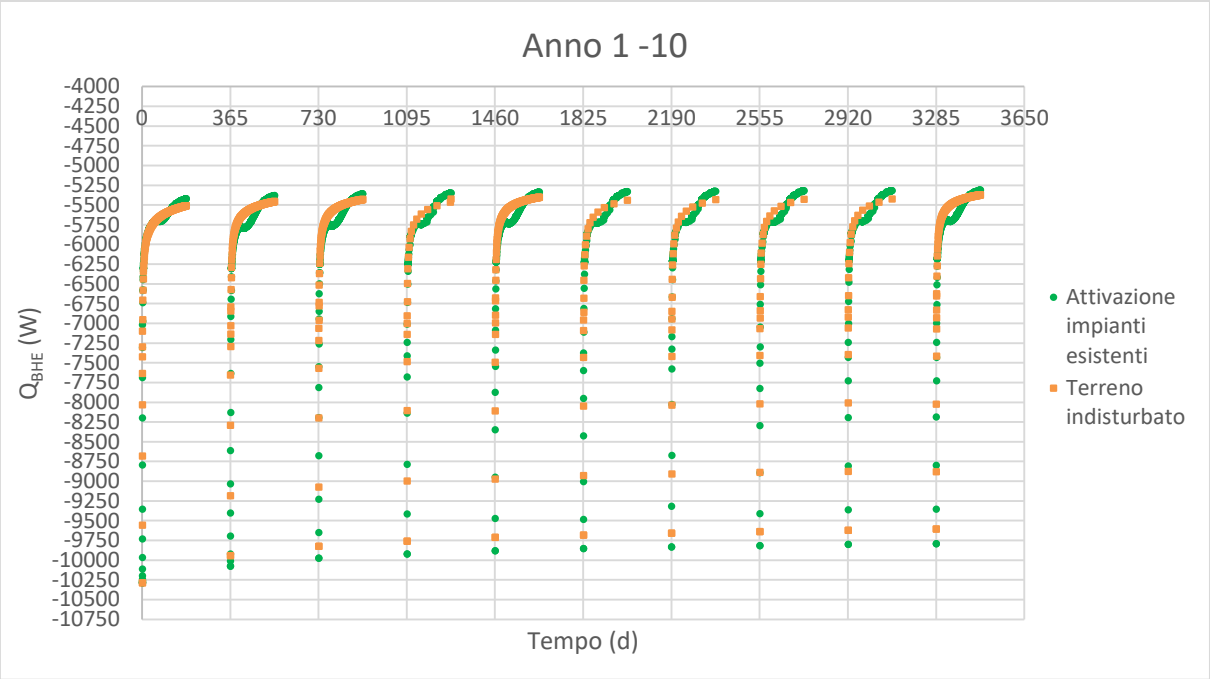

Figura 86 - Confronto tra i valori di potenza scambiata dal primo al decimo anno

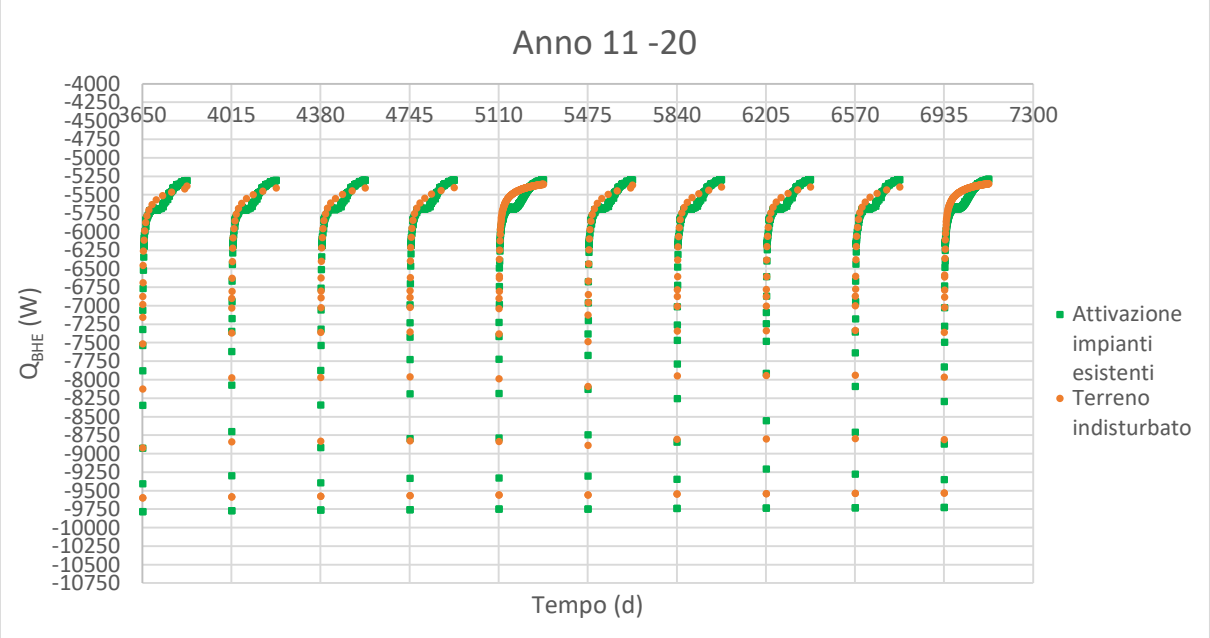

Figura 87 - Confronto tra i valori di potenza scambiata dall'undicesimo al ventesimo anno

Come è possibile notare i valori di quantità di calore scambiata quanto gli impianti geotermici preesistenti sono attivi risultano minori dei valori ottenuti in condizione di terreno naturale.

A conferma dell'effetto di interferenza che gli impianti del grattacielo Intesa San Paolo e del palazzo dell'Area Metropolitana di Torino hanno sul BHE, anche i valori di T_{lim} ad impianti attivi risultano essere più bassi, come è possibile vedere dalla *figura 88*:

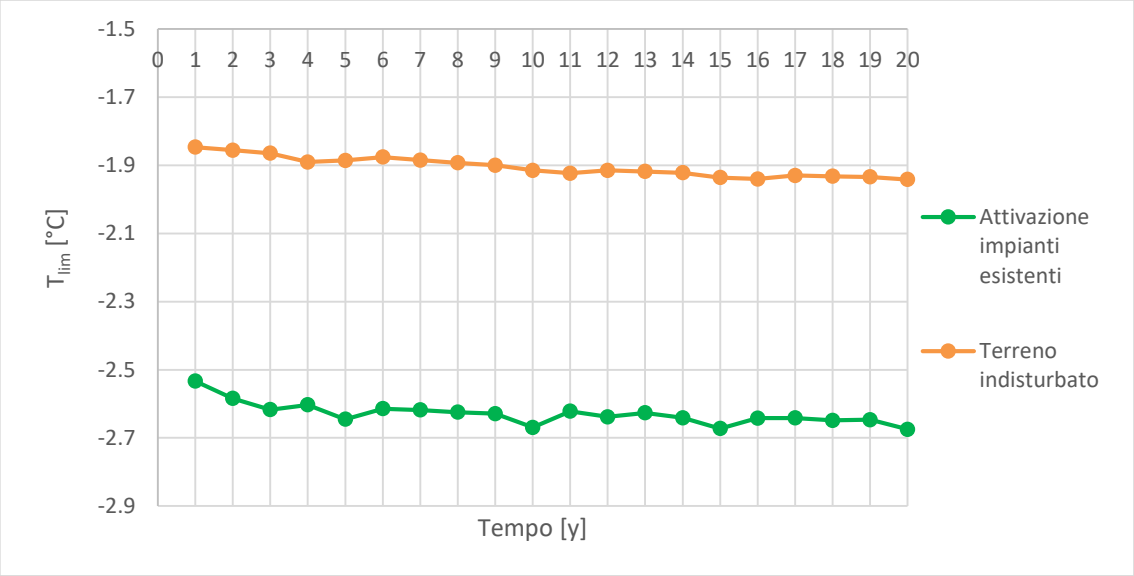

Figura 88 - Confronto tra i valori di T_{lim}

Questa interferenza è giustificata dall'alterazione termica subita dal terreno in corrispondenza degli impianti preesistenti, i quali fanno variare la temperatura del terreno indisturbato, posta uguale a 14°C.

I valori di alterazione termica sono stati valutati grazie ad un *Observational Point* posto prima del BHE di progetto, che quindi è stato investito dal *thermal plume* stagionale degli impianti, e sono riportati in *figura 89*:

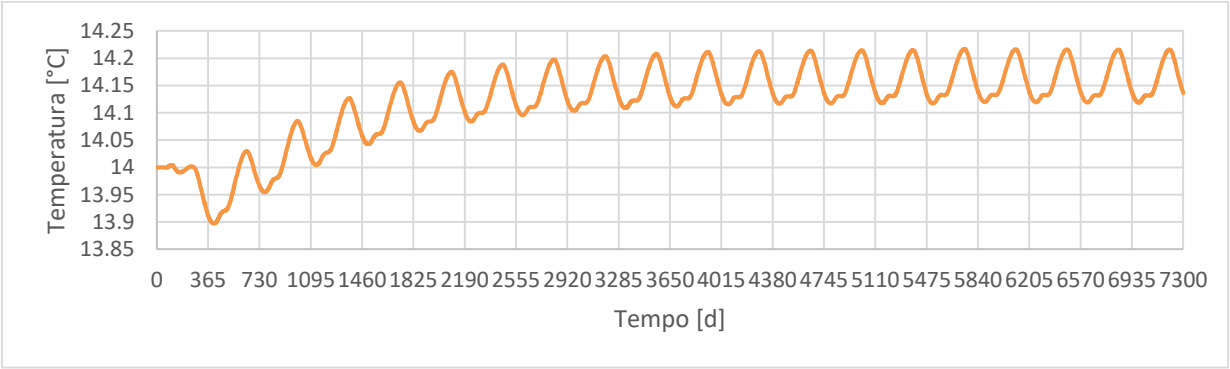

Figura 89 - Alterazione termica subita dal terreno rispetto al valore indisturbato di 14°C

Capitolo 6

Conclusioni

La prima parte della tesi è servita ad introdurre i principi fondamentali su cui si basa lo sfruttamento dell'energia geotermica.

Negli ultimi anni il panorama mondiale ha visto nei sistemi a bassa entalpia, in cui si fa uso diretto del calore, una risorsa energeticamente sfruttabile in grado di combinare interessi economici con interessi ambientali e sociali.

L'utilizzo di queste nuove tecnologie non può però prescindere dal contenuto termico del territorio e questa esigenza ha spinto numerosi autori a cercare metodologie in grado di calcolare il potenziale geotermico delle aree di studio considerate, tra cui la metodologia G.POT , sviluppata da Casasso & Sethi (2016).

Il caso di studio considerato ha voluto analizzare i valori di potenziale di uno scambiatore di calore (BHE) prima in una condizione di terreno indisturbato e dopo in seguito all'interferenza data dall'attivazione degli impianti preesistenti nell'area di studio considerata, in cui ricadono i 9 pozzi di immissione del grattacielo Intesa San Paolo e il pozzo di immissione e il pozzo di estrazione del palazzo dell'Area Metropolitana di Torino.

Per la modellazione numerica del suddetto impianto ci si è avvalsi del codice di calcolo agli elementi finiti FEFLOW, grazie al quale è possibile valutare gli effetti del flusso di falda e del flusso di calore nel terreno.

I risultati delle simulazioni mostrano che la quantità di calore scambiata risulta più bassa quando tutti gli impianti risultano essere attivati termicamente.

Questo risultato è giustificato dal fatto che il *thermal plume* degli impianti investe il BHE di progetto, riducendonoe l'efficienza in termini di quantità di calore scambiata stagionalmente, come è possibile vedere dalla *figura 90*:

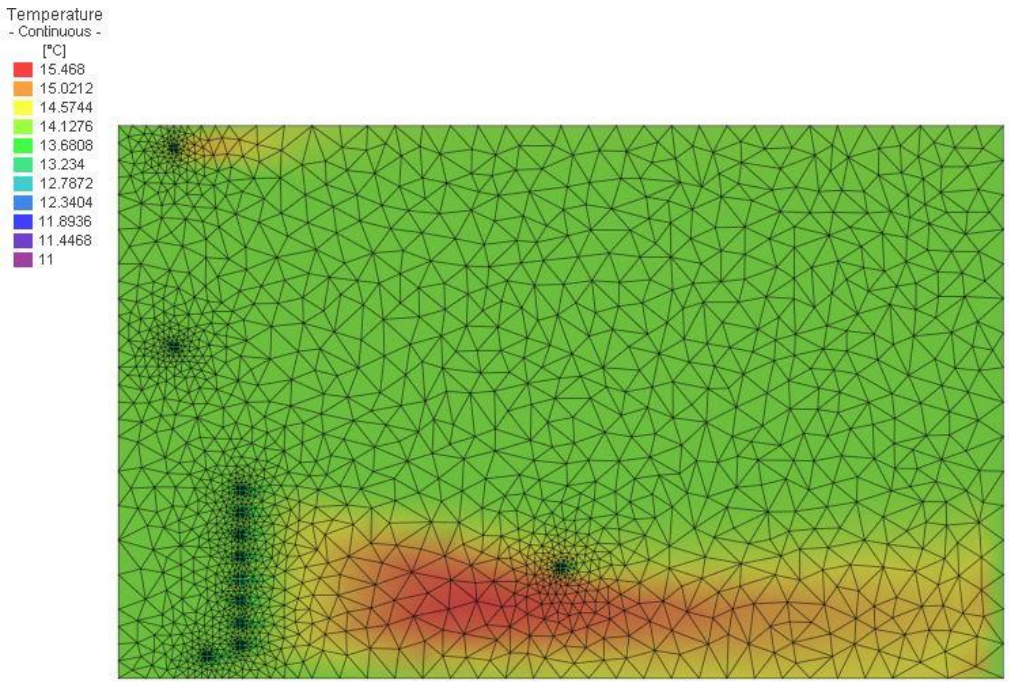

Figura 90 - Thermal Plume generato dagli impianti presistenti

Da questo studio emerge quindi che la presenza di impianti esistenti influenza i valori di potenziale geotermico estraibile da impianti di nuova installazione per cui potrebbe essere interessante provvedere con studi futuri a determinare i valori dei parametri da inserire nelle metodologie per il calcolo del potenziale geotermico che rendano i risultati ottenuti coerenti con la situazione reale riprodotta attraverso modellazione numerica.

Bibliografia

Alcaraz M., Garcia-Gil A., Vazquez-Sune E., Velasco V. "*Use rights markets for shallow geothermal energy management*", Applied Energy, vol.172, 2016

Adam D., Markiewicz R. "*Energy from earth- coupled structures, foundations, tunnels and sewers*", Geothechnique, 2009

Amis T., Robinson C.A.W., Wong S. "*Integrating geothermal loops into the diaphragm walls of the knightbridge palace hotel project*", 2010

Barla G. "*Comprehensive study including testing, monitoring and thermo-hydro modelling for desing and implementation of a geothermal system in Torino (Italy)*", 2017

Barla M., Di Donna A., "*Gallerie energetiche in ambito urbano*", Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica, 2015

Barla M., Di Donna A., Perino A., "*Application of energy tunnels to an urban environment*", Geothermics, vol. 61, 2016

Benelli M., Benelli M., Franci T. "*La risorsa geotermica per usi elettrici in Italia: Energia, Ambiente e Accettabilità sociale*", Amici della Terra-Firenze-Onlus, 2008

Bertermann D., Klug H., Morper-Busch L. "*A pan-European planning basis for estimating the very shallow geothermal energy potentials*", Renewable Energy, vol.75, 2014

Brandl H. "*Energy foundations and other thermo- active ground structures*", Géotechnique, vol. 56, 2005

Casasso A., Sethi R. "*G.POT: A quantitative method for the assessment and mapping of the shallow geothermal potential*", Energy, vol.106, 2016

Casasso A., Sethi R. "*Assessment and mapping of the shallow geothermal potential in the province of Cuneo (Piedmont, NW Italy)*", Renewable Energy, vol.102, 2016

Cornelio C., Di Donna A., Barla M. "*Energy diaphragm walls for Turin metro*", EGEC-European Geothermal Energy Council, 2016

Dickson M.H., Fanelli M. "*Geothermal Energy: Utilization and Technology*", Routledge, 2013

De Carli M., Roncato N., Zarrella A., Zecchini R. "*Energia dal terreno*", AICARR

Eugster W. J., Sanner B. "*Technological Status of Shallow Geothermal Energy in Europe*", Proceedings European Geothermal Congress, 2007

Franzius J. N., Pralle N., "*Turning segmental tunnels into sources of renewable energy*", Proceedings of the ICE - Civil Engineering, 164(1), pp. 35-40, 2011

Furno F., Barla M., Dematteis A., Lo Russo S. "*Methodological approach for a sustainable management of water inflow and geothermal energy in tunnels*", 2015

Garcìa-Gil., Vàzquez-Sune E., Alcaraz M.M, Serrano Juan A., Sanchez-Navarro J.A., Montlleo M., Rodriguez G, Lao J. "*GIS-supported mapping of low-temperature geothermal potential taking groundwater flow into account*", Renewable Energy, vol.77, 2014

Gemelli A., Mancini A., Longhi S. "*GIS-based energy-economic model of low temperature geothermal resources: Acase study in the Italian Marche region*", Renewable Energy, vol.36, 2011

Kiavarz M., Jelokhani-Niaraki M. "*Geothermal prospectivity mapping using GIS-based Ordered Weighted Averaging approach: A casa study in Japan's Akita and Iwate provinces*", Geothermics, 2017

Laloui L., Di Donna A. "*Energy Geostructures: Innovation in Underground Engineering*" ISTE Ltd and John Wiley

Lund J.W., Boyd T.L. "*Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review*", Geothermics, vol.60, 2016

Miglani S., Orehounig K., Carmeliet J. "*A methodology to calculate long-term shallow geothermal energy potential for an urban neighbourhood*", Energy and Buildings, 2017

Noorollahi Y., Itoi R., Fujii H., Tanaka T. "*GIS integration model for geothermal exploration and well siting*", Geothermics vol.37, 2008

Noorollahi Y., Itoi R., Fujii H., Tanaka T. "*GIS model for geothermal resource exploration in Akita and Iwate prefectures, northern Japan*", Computers and Geosciences, vol. 33, 2007

Sanner B. "*Shallow geothermal energy*", GHC Bulletin, 2001

Schiel K., Baume O., Caruso G., Leopold U. "*GIS-based modelling of shallow geothermal energy potential for CO_2 emission mitigation in urban areas*", Renewable Energy, vol.86, 2015

Signorelli S. , Kholi T. "*Regional ground surface temperature mapping from meteorological data*", Global and Planetary Change, vol.40, 2004

Sommarga C., Verdiani G. "*GEOTERMIA: Principi, ricerca, produzione*", NIS-La Nuova Italia Scientifica, 2008

Unione Geotermica Italiana "*La Geotermia: Ieri, Oggi, Domani*", 2007

Varrone A. "*Sistemi per la climatizzazione mediante pompe di calore geotermiche e pali energetici*"

Xia C., Meng Sun, Guozhu Zhang G., Suguang Xiao S., Yichuan Zou Y. "*Experimental study on geothermal heat exchangers buried in diaphragm walls*", ELSEVIER, 2012

Zheng C. "*FEFLOW: A Finite-Element Ground Water Flow and Transport Modeling Tool*"

Indice

Introduzione 1

La Geotermia 4

2.1 Premessa 4

2.2 Risorse Geotermiche 6

2.3 Sistemi Geotermici 9

2.4 Cenni storici 12

2.5 Situazione attuale 13

2.6 Utilizzi 15

2.6.1 Usi agro-alimentari 16

2.6.2 Usi industriali 16

2.6.3 Balneoterapia 16

2.6.4 Condizionamento di ambienti 17

2.7 Circuiti idraulici chiusi: tipologie di sonde di geoscambio 21

2.7.1 Sistemi a sonde orizzontali (SGO) 21

2.7.2 Sistemi a sonde verticali (SGV) 23

2.8 Circuiti idraulici aperti 26

2.9 Impatto ambientale 27

2.10 Rischio sismico 28

2.11 Geostrutture energetiche 28

2.11.1 I pali energetici 30

2.11.1.1 Modalità di trasmissione del calore in un sistema di pali energetici 31

2.11.2 I diaframmi energetici.....34
2.11.3 Le gallerie energetiche.....38
Le tecniche di mappatura del potenziale geotermico 44
3.1 Premessa 44
3.2 Analisi con i modelli di integrazione 47
3.2.1 Analisi MCDA (Multi Criteria Decision Analysis).....47
3.2.1.1 Modello GIS.....48
3.2.1.2 Boolean Integration Model.....49
3.2.1.3 Index Overlay Model.....50
3.2.2 Analisi GIS-based Ordered Weighted Averaging.....51
3.2.2.1 L'operatore OWA.....52
3.2.2.2 Standardizzazione degli attributi.....53
3.2.2.3 Order Weights.....54
3.3 Analisi del potenziale geotermico secondo Garcìa-Gil (2016) 57
3.3.1 La metodologia.....57
3.3.2 Calcolo per i sistemi a circuito aperto.....58
3.3.3 Calcolo per i sistemi a circuito chiuso.....59
3.4 Analisi del potenziale geotermico secondo Bertermann et al. (2014) 62
3.4.1 Il metodo.....62
3.4.1.1 Criteri di esclusione e fattori limitanti.....64
3.4.1.2 Stato idrogeologico del sistema.....65
3.4.1.3 Proprietà del suolo.....65
3.4.1.4 Calcolo finale.....66
3.4.2 La mappa EOM.....67
3.5 Analisi del potenziale geotermico secondo Alcaraz et al. (2016) 68
3.5.1 MetroGeoTher.....69
3.5.1.1 Strumento curva caratteristica termica (TCC).....73
3.5.1.2 Strumento Plume termico.....75
3.6 Analisi del potenziale geotermico secondo Miglani et al. (2017).....76
3.7 Analisi del potenziale geotermico secondo Schiel et al. (2016) 81
3.7.1 Metodologia.....82

3.7.1.1 STEP 1:Calcolo della domanda di energia termica.....83
3.7.1.2 STEP 2:Calcolo del potenziale di energia geotermica.....84
3.7.1.3 STEP 3:Domanda soddisfatta dell'energia geotermica per lotto.....85
3.7.1.4 STEP 4:Riduzione potenziale delle emissioni di CO_2 86
3.8 Metodo G.POT.....87
3.8.1 Funzione di carico termico di riferimento.....89
3.8.2 Trasferimento di calore nel terreno.....90
3.8.3 Trasferimento di calore nello scambiatore.....91
3.9 Conclusioni..... 96
Il caso di studio dell'Area Metropolitana di Torino..... 98
4.1 Premessa 98
4.2 L'Area Metropolitana di Torino 100
4.2.1 Clima.....100
4.2.2 Geologia.....102
4.2.3 Idrogeologia.....104
4.3 Il Palazzo della Città Metropolitana di Torino 105
4.4 Il Grattacielo Intesa San Paolo 108
4.4.1 Indagini in situ.....111
4.4.1.1 Prova di pompaggio su larga scala.....112
4.4.1.2 Prova su larga scala del flusso d'acqua e del trasporto di calore con monitoraggio in tempo reale della temperatura e del livello dell'acqua in prossimità di un pozzo geotermico.....114
4.4.2 Simulazione numerica del funzionamento dell'impianto geotermico del Grattacielo San Paolo.....117
4.5 Area di studio 120
4.5.1 Risultati ottenuti dall'applicazione del metodo G.POT.....120
Modellazione numerica per la determinazione del potenziale geotermico dell'area di studio.....125
5.1 Il codice di calcolo FEFLOW.....125
5.1.1 Cenni sulle modalità di utilizzo del software.....126

5.2 Modellazione numerica dell'area di studio 135

5.2.1 Geometria del modello 136

5.2.2 Scelta della mesh 138

5.2.3 Assegnazione dei parametri 140

5.2.4 Condizioni al contorno 141

5.3 Simulazione numerica dell'area di studio 142

5.3.1 Analisi A: Situazione di terreno naturale 144

5.3.1.1 Descrizione dell'analisi 144

5.3.1.2 Risultati 146

5.3.2 Analisi B: Attivazione della sonda geotermica e degli impianti esistenti nell'area 152

5.3.2.1 Descrizione dell'analisi 152

5.3.2.1 Risultati 154

5.4 Discussione dei risultati ottenuti 157

Conclusioni 159

Bibliografia I

Indice delle figure

Figura 1 - Profili della temperatura del terreno in funzione della profondità (www.unienergia.it) 5
Figura 2 - Struttura interna della Terra 7
Figura 3 - Rappresentazione schematica di un sistema geotermico 10
Figura 4 - Larderello 1904. La prima macchina (un motore alternativo accoppiato ad una dinamo), che ha prodotto elettricità sfruttando il vapore geotermico. A fianco, il Principe Piero Ginori Conti, succeduto a Francesco Larderel nella proprietà dell'industria boracifera. 13
Figura 5 - Comparazione dell'energia geotermica di uso diretto a livello mondiale in TJ / anno valutata nel 1995, 2000, 2005 e 2010 14
Figura 6 - Applicazioni geotermiche dirette in tutto il mondo nel 2015, distribuite in base alla percentuale della capacità installata totale (MWt) (J.W. Lund & T.L.Boyd, 2015).....15
Figura 7 - Schema di impianto geotermico 18
Figura 8 - Schema impiantistico del funzionamento di una pompa di calore 20
Figura 9 - Sistema a sonde orizzontali (SGO)..... 22
Figura 10 - Sistema a sonde verticali (SGV) 23
Figura 11 -Sonda geotermica verticale a singolo tubo a U (particolare zavorra) 24
Figura 12 - Tipologie di scambiatori 25
Figura 13 - Sistema a circuito aperto 27
Figura 14 - Schema rappresentativo dei pali geotermici 30
Figura 15 -Particolare del posizionamento dei tubi all'interno dell'armatura . 30
Figura 16 - Modalità di scambio termico per un palo energetico.....32
Figura 17 - Diaframma energeticamente attivo: a9 schema del posizionamento dei tubi; b) tubi geotermici fissati all'armatura del diaframma 34

Figura 18 - Schema della Linea 2 per la metro di Torino 35
Figura 19 - Schema rappresentativo del diaframma energetico.....35
Figura 20 - Modellazione tridimensionale dei tubi all'interno della paratia ... 36
Figura 21- Disposizione dei tubi assorbitori all'interno delle paratie: a) tipologia a W; b) tipologia a W implementata; c) tipologia a singola U 37
Figura 22 - Fasi realizzative del metodo "Cut and Cover" 38
Figura 23 - Rappresentazione schematica di un rivestimento di una galleria costituito da conci equipaggiati con tubi scambiatori di calore (Barla M. et al., 2016) 39
Figura 24 - Dettaglio degli scambiatori di calore fissati al geotessuto..... 40
Figura 25 - Disposizione tubi in PE all'interno della gabbia di armatura.....41
Figura 26 - Anello di rivestimento ENERTUN 42
Figura 27 - Schema dell'impianto geotermico del prolungamento sud della linea 1 della metropolitana di Torino..... 43
Figura 28 - Diagramma di flusso per il modello di integrazione Boleano usato nelle esplorazioni geotermiche (Y. Noorollahi et al., 2008) 50
Figura 29 - Diagramma di flusso per il modello di sovrapposizione dell'indice per l'identificazione delle aree idonee alle esplorazioni geotermiche..... 51
Figura 30 - Valori ORness e corrispondenti strategie decisionali o di combinazione 55
Figura 31 -Esempio di calcolo del fattore OWA per l'i-esimo appezzamento e valori di ORness pari a 0, 0.25, 0.5 e 1. (M.Kiavarz & M. Jelokhani-Niaraki, 2017) ...56
Figura 32 - Schema rappresentativo dell'approccio per il calcolo di vSGP..... 63
Figura 33 - Classificazione del suolo USDA..... 66
Figura 34 - Mappa EOM per il vSGP 67
Figura 35 - Componenti del geodatabase HYDOR 72
Figura 36 - a) Rappresentazione del Thermal Plot con la massima distaza misurabile con il relativo strumento GIS. c)Rappresentazione del thermal plumes per diversi valori di temperatura.....73
Figura 37 - Schema rappresentativo della metodologia e valori di input e output dell'analisi (S.Miglani et al., , 2017) 76
Figura 38 - Domanda di riscaldamento/condizionamento oraria e variazione del MFT per il singolo BHE nel primo anno di operatività 78

Figura 39 - Step seguiti nella metodologia per il calcolo del potenziale geotermico a scala locale (K.Schiel et al., 2015) 82
Figura 40 - Funzione di carico termico assunta con forma emisinusoidale per un ciclo termico annuale (Casasso & Sethi, 2016)..... 89
Figura 41 - Valori della funzione di carico termico valutato per differenti lunghezze di ciclo di carico e lo stesso valore medio termico annuale..... 90
Figura 42 - Simulazione di trasferimento del calore termico annuale..... 92
Figura 43 - La suddivisione territoriale dell' Area Metropolitana di Torino ("Piano territoriale di coordinamento provinciale", Agosto 2011)..... 99
Figura 44 - Area di interesse e sezioni geologiche rappresentative 103
Figura 45 - Il palazzo della Città Metropolitana di Torino(www.spaziotorino.it) 105
Figura 46 - Impianto geotermico del Palazzo della Città Metropolitana di Torino 106
Figura 47 - Schizzo del grattacielo realizzato dall'Arch. Renzo Piano (www.grattacielosanpaolo.com) 108
Figura 48 - Grattacielo in fase di costruzione (www.mole24.it) 109
Figura 49 - Vista in pianta del sistema geotermico con pozzi verticali (a monte) e pozzi trivellati inclinati (a valle) 111
Figura 50 - Schematizzazione pozzi per il test di pompaggio: pozzi P5 e P6 usati per il pompaggio dall'acquifero e pozzi PM1, PF1, PF2, PF3 e PF4 equipaggiati le la misura della quota piezometrica; pozzo P8 già esistente (G.Barla, 2017) 112
Figura 51 - Risultati test di pompaggio su larga scala (G.Barla, 2017)..... 113
Figura 52 - Schematizzazione pozzi per il test di flusso dell'acqua e trasporto di calore: pozzi P1 e P2 del Palazzo della Città Metropolitana di Torino e pozzi PT1, PT2, PT3, PT4, PT5 e PT6 equipaggiati per il monitoraggio della temperatura e del livello dell'acqua di falda..... 114
Figura 53 - Andamento della quota piezometrica valutata tra Giugno e Novembre 2012 (G.Barla, 2017) 115
Figura 54 - Incremento di temperatura registrata tra Giugno e Novembre 2012 115
Figura 55 - Modello tridimensionale FEM dell'area di interesse 117
Figura 56 - Rappresentazione del flusso d'acqua in condizioni indisturbate del sistema.....117

Figura 57 - Andamento della portata d'acqua 118
Figura 58 - Andamento della portata d'acqua con acqua fredda pompata da P_2 e acqua calda restituita a P_1 (G.Barla, 2017) 118
Figura 59 - Confronto dei valori monitorati con i valori computati di temperatura nel pozzo PT3 (G.Barla, 2017) 119
Figura 60 - Quota idraulica che rappresenta le condizioni naturali del flusso d'acqua per due diversi valori della conduttività orizzontale 119
Figura 61 - Schematizzazione area di indagine (www.geoportale.piemonte.it/geocatalogorp/) 120
Figura 62 - Valori del potenziale geotermico ottenuti dall'applicazione del metodo G.POT 124
Figura 63 - Schermata di interfaccia del codice FEFLOW 127
Figura 64 - Schermata delle impostazioni del problema 128
Figura 65 - Confronto tra le varie tipologie di mesh 129
Figura 66 - Finestra di generazione del modello tridimensionale 129
Figura 67 - Selezione degli elementi nel modello tridimensionale 130
Figura 68 - Definizione delle condizioni al contorno: il cerchietto blu in corrispondenza dei nodi rappresentano l'assegnazione di una condizione al contorno, in questo caso una certa altezza idraulica per simulare un flusso di falda 131
Figura 69 - Finestra di modellazione dello scambiatore di calore BHE 132
Figura 70 - Creazione di Discrete Feautures per simulare il comportamento di una sonda geotermica 133
Figura 71 - Esempio di Observational Point 134
Figura 72 - Geometria del modello 136
Figura 73 - Modello tridimensionale 137
Figura 74 - Mesh del modello 138
Figura 75 - Mesh in corrispondenza del BHE 139
Figura 76 - Distribuzione iniziale delle altezze piezometriche 142
Figura 77 - Distribuzione iniziale delle pressioni 143
Figura 78 - Quantità di calore scambiata dal primo al decimo anno 146
Figura 79 - Quantità di calore scambiata dall'undicesimo al ventesimo anno 147
Figura 80 - Thermal plume nello strato al di sopra dell'acquifero superficiale 149
Figura 81 - Thermal plume nello strato dell'acquifero superficiale 150

Figura 82 - Thermal plume nello strato dell'acquitardo 150
Figura 83 - Thermal plume nello strato dell'acquifero profondo confinato ... 151
Figura 84 - Andamento della quantità di calore scambiata dal primo al decimo anno 154
Figura 85 - Andamento della quantità di calore scambiata dall'undicesimo al ventesimo anno 155
Figura 86 - Confronto tra i valori di potenza scambiata dal primo al decimo anno 157
Figura 87 - Confronto tra i valori di potenza scambiata dall'undicesimo al ventesimo anno 157
Figura 88 - Confronto tra i valori di T_{lim} 158
Figura 89 - Alterazione termica subita dal terreno rispetto al valore indisturbato di 14°C 158
Figura 90 - Thermal Plume generato dagli impianti presistenti.....160

Indice delle tabelle

Tabella 1- Classificazione delle risorse geotermiche in base alla temperatura .. 8
Tabella 2 - Riassunto dei dati sull'uso diretto in tutto il mondo per regione e continente 14
Tabella 3- Set di dati utilizzati per la EOM (D.Bertermann et al., 2014) 63
Tabella 4 - Domanda termica delle diverse tipologie di insediamento (K.Schiel et al., 2015) 83
Tabella 5 - Calore specifico estraibile da uno scambiatore di calore (4640 Richtline VDI) 85
Tabella 6 - Valori dei parametri adottati nel processo di calibrazione nell'equazione per il calcolo di P_{max} termico annuale (Casasso & Sethi, 2016) 94
Tabella 7 - Valori di temperatura massima e minima media mensile registrate a Torino (it.climate-data.org/location/1108/) 101
Tabella 8 - Valori di temperatura massima e minima media stagionale a Torino 101
Tabella 9 - Valori di temperatura massima e minima assoluta mensile a Torino 102
Tabella 10 - Valori di temperatura massima e minima assoluta stagionale a Torino 102
Tabella 11 - Range di variazione dei parametri di input per il calcolo del Q_{BHE} 121
Tabella 12 - Valori di input per il calcolo del potenziale geotermico 122
Tabella 13 - Valori di conduttività termica per i diversi materiali 123
Tabella 14 - Coordinate di Supermesh Points nel modello 136
Tabella 15 - Parametri assegnati ai layer del modello 140
Tabella 16 - Altezze piezometriche assegnate ai bordi del modello 141
Tabella 17 - Parametri geometrici del BHE 144

Tabella 18 - Valori di temperatura in uscita del fluido refrigerante al termine di ciascuna stagione di riscaldamento 148
Tabella 19 - Valori di potenza stagionale e potenza media per ciascun ciclo di riscaldamento 148
Tabella 20 - Valori di T_{lim} valutati per ciascuna stagione di riscaldamento 149
Tabella 21 - Time Series per la portata di fluido refrigerante passante negli impianti esistenti 153
Tabella 22 - Time Series per la temperatura del fluido refrigerante passante negli impianti esistenti 153
Tabella 23 - Valori di T_{out} registrati alla fine di ciascuna stagione di riscaldamento 155
Tabella 24 - Valori di potenziale stagionale e potenziale medio per ciascun ciclo di riscaldamento 156
Tabella 25 - Valori di T_{lim} registrati al termine di ciascuna stagione di riscaldamento 156

Ringraziamenti

Lord Baden Powell diceva:

"*Una vita tutta dolcezza sarebbe insulsa; il sale è amaro, se preso da solo, ma quando è gustato nella pietanza, dà sapore alla carne. Le difficoltà sono il sale della vita.*"

Studiare Ingegneria non è stata certo una passeggiata, ma eccomi qua a godermi la ricompensa per i miei sacrifici, a dire che ce l'ho fatta!

Penso alle nottate in bianco per studiare, all'ansia prima di ogni esame e alle lacrime per la paura di non farcela e ho capito che se sono arrivata qui oggi è perché ho l'immensa fortuna di avere intorno a me persone che mi sostengono, persone che sono entrate nella mia vita e in un modo o nell'altro l'hanno resa meno insulsa.

Il primo ringraziamento va a miei genitori, Franco e Laura, per il loro essere amore puro e incondizionato, per il loro tenermi la mano da 27 anni senza lasciarmi nemmeno un minuto da sola e per avermi supportato e sopportato sempre e comunque, anche quando forse non lo meritavo.

E poi devo ringraziare mio fratello, Roberto, perché la distanza non è riuscita a tenerci lontani e perché ne abbiamo fatta di strada da quando facevamo a botte con i cuscini del divano. Il mio grazie va a te per avermi fatto riscoprire quanto è straordinario il legame tra fratello e sorella.

Impossibile non ringraziare Lei, Nonna Merina, per l'amore che arrivava da giù con le polpette e le focacce di cipolle che mi riempivano la pancia ma soprattutto il cuore. Nonna, la tua "tempesta" ce l'ha fatta e sono sicura che da lassù anche qualcun altro mi ha sempre dato la forza per andare avanti.

Un grazie anche al resto della mia famiglia, ai mie zii e alle mie cugine per essere stati il porto sicuro dove tornare.

E poi, se è vero che gli amici sono la famiglia che ti scegli, io devo essere stata davvero fortunata.

Un grazie infinito a La Zì, per il tuo essere presente sempre e comunque nella mia vita e per avermi dimostrato che anche nelle aule della facoltà possono nascere legami veri e profondi.

Grazie a te, Francesca, per tutto quello che abbiamo passato e condiviso insieme, per il nostro legame talmente intenso da non poter essere nemmeno scalfito.

E grazie a te, Marzia, per ogni passo fatto assieme e per ogni ostacolo incontrato e superato: ne è valsa e ne varrà sempre la pena!

Devo ringraziare Giulio, perché probabilmente sei stato la scoperta più bella di quest'anno, e ti assicuro che la nostra amicizia andrà in serie A.

E devo ringraziare anche tutte voi, Valentina, Alessia e Maria, perché a volte mi sono davvero attaccata "o' cranj" ma avete avuto il coraggio di continuare ad essermi amiche.

Un grazie a te, Luigi, perché sei la persona più inaffidabile che conosca ma anche quella su cui posso contare sempre, e se non è vera amicizia questa…

E poi ci sono i miei (IN)CIVILI che hanno reso migliori le giornate passate al Poli. A Luca, Massi, Giulia, Ilaria, Alle, Bart, Corrado e a tutti coloro con cui ho condiviso le giornate in aula studio e gli infiniti caffè, grazie per le risate tra i banchi e per avermi svegliato quando mi addormentavo durante le lezioni di Scienza delle Costruzioni.

Grazie a tutti coloro che hanno voluto condividere un pezzo della loro strada con me, perché ne ho fatto tesoro e mi hanno portato ad essere quella che sono oggi, nel bene e nel male.

E infine, direi che l'ultimo ringraziamento va a me, per non aver mollato anche quando sembrava essere troppo difficile continuare e ora che questa lunga e tortuosa scalata è finita posso sedermi e vedere quanto il panorama sia incredibile.

Sipario.

Silv