Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO

Studio preliminare di applicabilità di sorgente geotermica a bassa entalpia ad un caso studio con pompa di calore

A.C. Violante, G. Boccardi, L.M. Falconi, A. Lattanzi, C. Menale,
M. Morlacca, L. Simonetti, M. Proposito, R. Trinchieri

Report RdS/PTR (2019)/026

STUDIO PRELIMINARE DI APPLICABILITÀ DI SORGENTE GEOTERMICA A BASSA ENTALPIA AD UN CASO STUDIO CON POMPA DI CALORE

A.C. Violante, G. Boccardi, L.M. Falconi, A. Lattanzi, C. Menale, M. Morlacca, L. Simonetti, M. Proposito, R. Trinchieri (ENEA)

Dicembre 2019

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA
Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 – I annualità
Obiettivo: Tecnologie
Progetto 1.7: Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali
Work package 3: Pompe di Calore
Linea di attività 9: Sistemi complessi di PdC integrate: Studio preliminare di applicabilità di sorgente geotermica a bassa entalpia ad un caso studio specifico
Responsabile del Progetto: Claudia Meloni ENEA
Responsabile del Work package: Raniero Trinchieri ENEA

Indice

SOMMARIO 4

1 INTRODUZIONE 5

2 SISTEMI GEOTERMICI A BASSA ENTALPIA 5

2.1 INTRODUZIONE 5
2.2 INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO-GEOLOGICO REGIONALE 9
2.3 EVOLUZIONE TETTONICO-SEDIMENTARIA DELL'AREA DI STUDIO 13
2.4 SUCCESSIONE STRATIGRAFICA DEL C.R. CASACCIA 14
2.5 UBICAZIONE DEL CAMPO GEOSONDE E ASSETTO STRATIGRAFICO-LITOLOGICO PRESUNTO 16

3 IDROGEOLOGIA 19

3.1 INQUADRAMENTO REGIONALE 19
3.2 IDROLOGIA DEL C.R. CASACCIA 21
3.3 CIRCOLAZIONE IDRICA SOTTERRANEA DEL C.R. CASACCIA 23

4 DIMENSIONAMENTO DI MASSIMA DI UN IMPIANTO GEOTERMICO INTEGRATO CON PDC 26

4.1 INTRODUZIONE 26
4.2 PRINCIPI DI DIMENSIONAMENTO 28
4.3 PDC GEOTERMICA 31
4.4 IMPATTO PER I SISTEMI CLOOSED LOOP 33

5 DIMENSIONAMENTO DELL'IMPIANTO CASACCIA 33

5.1 SIMULAZIONE GEOHEATCAL 38
5.2 COSTO DELL'IMPIANTO 45
5.3 VALUTAZIONE DELL'INVESTIMENTO DELL'IMPIANTO 46

6 CONCLUSIONI 48

7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI 49

8 ACRONIMI 50

Sommario

L'attività prevista per il primo anno è incentrata sullo studio preliminare finalizzato ad individuare una zona che meglio si presti, dal punto di vista geo-litologico ed idrogeologico, allo sfruttamento della sorgente termica terreno. La peculiarità di questo sistema è che il calore prelevato dal terreno è caratterizzato da una temperatura inferiore ai 90°C (sistema geotermico a bassa entalpia) che rimane costante tutto l'anno. Pertanto, rispetto ad un sistema convenzionale di climatizzazione degli ambienti (scambiatore aria-acqua), il terreno offre una temperatura che rimane costante e fissa tutto l'anno, comportando perciò un aumento nell'efficienza del sistema stesso. Inizialmente, sono stati analizzati tutti i dati disponibili in letteratura e/o reperiti dalle consultazioni dei dati di pozzo presenti nelle banche dati online [1]. Inoltre, nel C.R. Casaccia nell'anno 2008 è stata condotta una campagna di monitoraggio, commissionata dalla Società di Gestione degli Impianti Nucleari (Sogin)[2], attraverso l'installazione di piezometri al fine di monitorare l'eventuale presenza di radionuclidi nella falda acquifera. Pertanto, grazie all'accesso ai piezometri è stato possibile misurare direttamente in loco il livello piezometrico della falda e consultare le stratigrafie dei pozzi. A fronte di ciò è stata individuata l'area di studio e ricostruito l'assetto litostratigrafico e il livello piezometrico tramite l'interpolazione lineare dei dati di pozzi ricadenti nelle aree appena circostanti di proprietà Sogin. Le litologie presenti nell'area di studio hanno permesso di individuare il valore di conducibilità termica delle rocce presenti e quindi della produttività del pozzo per metro lineare di sonda geotermica verticale installata nel terreno. Tale applicazione nasce a scopo di ricerca scientifica al fine di testare la produttività dei diversi pozzi, ubicati a differente profondità, nel corso della stagione, del giorno e dell'ora. In funzione di ciò, potranno essere soddisfatte le esigenze di carico termico richiesto eventualmente dall'utenza in modo continuativo nell'arco dell'anno, oppure questa applicazione potrà essere utilizzata per il solo sbrinamento della pompa di calore. In particolare, nel secondo anno verranno effettuate quattro perforazioni, rispettivamente a 35 m, 50 m, 80 m e 100 m, che interesseranno la zona adiacente l'Edificio F40, ubicato nel C.R. Casaccia, sito in Roma, via Anguillarese 301, Foglio Catastale 26, Particella 15, Santa Maria di Galeria (RM). Inoltre, il campo delle geosonde sarà dotato di un sistema di controllo, tramite fibre ottiche direttamente impiantate all'interno dei tubi in polietilene, al fine di monitorare costantemente i valori termometrici all'interno del pozzo stesso; e quindi definire il campo termico, la sua evoluzione nell'arco delle stagioni, e non ultimo l'efficienza del sistema sonde-terreno nel tempo.

1 Introduzione

Tale attività si inserisce nell'ambito del progetto di ricerca di cui all'art. 10 comma 2, lettera a) del Decreto 26/01/2000 relativo al Piano Triennale di realizzazione 2019-2021 della Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale, riguardante la linea di attività 1.7 denominata "Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali". Nello specifico, l'attività in oggetto è la L.A. 1.9 contenuta nel WP3, riguardante i "Sistemi complessi di pompe di calore (PdC) integrate: Studio preliminare di applicabilità di sorgente geotermica a bassa entalpia ad un caso studio con PdC". L'obiettivo principale del progetto consiste nella realizzazione di un apparato sperimentale del tipo *"Hardware in the Loop"* (*HiL*), costituito da componenti innovativi e nel frattempo equipaggiato con componentistica e logiche di gestione per applicazioni specifiche, quali per esempio lo sbrinamento della pompa di calore.
Particolare attenzione sarà volta alla sperimentazione su sezione di prova scalata rispetto a un'applicazione reale e i risultati saranno utilizzati ai fini della realizzazione di sistemi di accumulo innovativi dimensionati in funzione delle esigenze dell'utenza e per l'ottimizzazione del sistema stesso. In questo contesto è previsto che l'apparato "*HiL*" sia dotato di un sistema di captazione di energia termica dal terreno tramite l'impiego di sonde geotermiche verticali, ubicate a diversa profondità. Il numero delle sonde installate dipenderà dalle esigenze di carico termico richiesto e dalla destinazione di tale calore, se impiegato per il solo sbrinamento della PdC oppure per essere utilizzato in modo continuativo nell'arco delle stagioni da parte di un'utenza. Inoltre, l'apparato *"HiL"* sarà dotato di un sistema di controllo, costituito da fibre ottiche direttamente inserite all'interno delle sonde geotermiche, al fine di monitorare costantemente i valori termometrici all'interno dei pozzi, in modo da definire il campo termico tridimensionalmente nell'intorno dell'area occupata dalle geosonde stesse. Tramite l'elaborazione dei dati di temperatura, con opportuni software, sarà possibile stimare le variazioni di temperatura nella stagione invernale ed estiva e soprattutto capire se il sistema risente degli apporti di calore che il terreno riceve durante la stagione estiva.

2 Sistemi geotermici a bassa entalpia

2.1 Introduzione

L'energia geotermica è l'energia termica immagazzinata sotto la superficie terrestre. È una fonte rinnovabile, disponibile tutto l'anno, ecocompatibile e sostenibile dal punto di vista ambientale. Questo calore terrestre deriva in parte dal calore residuo legato alla formazione del nostro pianeta, in parte dai processi di decadimento degli elementi radioattivi di Th, U, e K presenti nel mantello. La temperatura aumenta in maniera progressiva a mano a mano che si scende in profondità, secondo il gradiente geotermico medio, ovvero un aumento di 30 °C per ogni Km di profondità. La propagazione del flusso di calore (*heat flow*) dall'interno della Terra verso la superficie terrestre avviene attraverso processi conduttivi e convettivi, ovvero tramite un fluido vettore (acqua di origine meteorica). La densità dell'"*heat flow"* varia nello spazio e nel tempo (Figura 1 e Tabella 1). I "sistemi geotermici" convenzionali sono i "sistemi idrotermali" dominati dal moto convettivo dell'acqua, intesa come l'acqua di precipitazione meteorica che a contatto con rocce calde profonde, caratterizzate da un'anomalia termica, si riscalda. Il fluido risalendo, grazie alla circolazione convettiva, comporta un efficace trasferimento di energia (calore) in superficie o a profondità economicamente raggiungibili ed economicamente sfruttabili. L'energia geotermica è utilizzata convenzionalmente o per la produzione di energia elettrica (reservoir ad alta-media entalpia) oppure per usi diretti del calore (risorse a bassa-media entalpia) quali climatizzazione degli edifici, teleriscaldamento e molteplici applicazioni agroalimentari, florovivaistiche e industriali. L'Italia ha una forte vocazione geotermica; le risorse potenzialmente estraibili entro 5 km di profondità sono dell'ordine di 21 exajoule (circa 500 Mtep). Circa un terzo delle risorse potrebbe permettere la produzione di energia elettrica, in determinate aree geotermiche distribuite principalmente nel settore occidentale d'Italia [3]. Il campo di sforzi generato dalla convergenza delle placche tettoniche Africa-Europa ha dato spazio, a partire dal Miocene, ad un processo di apertura e di *oceanizzazione* del Tirreno. L'assottigliamento crostale che ne è conseguito, sviluppatosi per tutto il Neogene e ancora parzialmente in atto, ha comportato l'avvio di un'intensa attività magmatica in tutto il margine tirrenico e peri-tirrenico (catena appenninica) della penisola. Il settore compreso tra il Monte Amiata, a nord, e il sistema vulcanico campano, a sud, è stato interessato da un'intensa

tettonica distensiva che, con diverse tempistiche e fasi, ha prodotto diffusi fenomeni vulcanici, i cui corpi magmatici sono in stretta relazione con gli attuali sistemi geotermici a media ed alta entalpia (Figura 2).

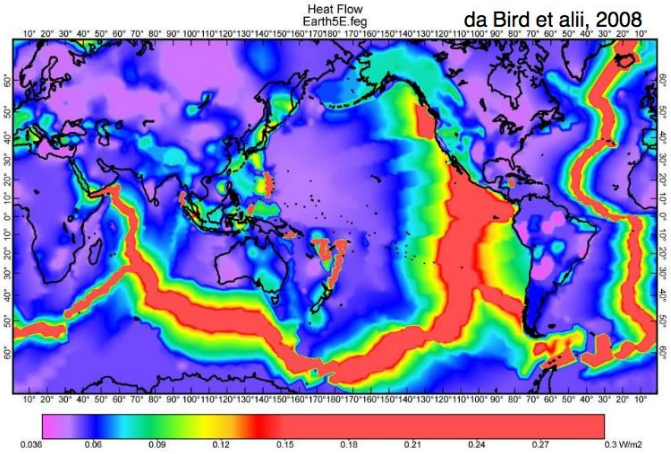


Figura 1. *Heat flow* terrestre [4]

Tabella 1. *Heat flow* terrestre, area continentale ed oceanica [5]

	Area (m^2)	Heat Flow (TW)	Mean Heat Flow ($mW\,m^{-2}$)
Continent	2.073×10^{14}	14.7	70.9
Ocean	3.028×10^{14}	31.9	105.4
Global Total	5.101×10^{14}	46.7	91.6

I sistemi a bassa entalpia (T < 90 °C) possono essere, invece, utilizzati in ogni parte del territorio italiano, in quanto è possibile sfruttare il gradiente geotermico a scopo diretto già al di sotto dei 15 metri di profondità dal piano campagna; a tale quota la temperatura del terreno si mantiene fissa e costante tutto l'anno, non risentendo delle fluttuazioni stagionali, mensili e giornaliere della stessa. Perciò, la geotermia a bassa entalpia è uno strumento vincente in quanto, oltre ad essere disponibile ovunque sulla superficie terrestre, è una forma di calore pulita, rinnovabile e sicura nel tempo. Per uso diretto del calore si intende una vasta gamma di applicazioni: climatizzazione di ambienti, usi termali, usi agricoli (riscaldamento serre, pastorizzazione di derivati dal latte, essiccazione e fermentazione di prodotti alimentari), acquacoltura e usi industriali.
Esistono diversi schemi impiantistici per sfruttare il calore terrestre:
• impianti che utilizzano uno scambiatore di calore per trasferire il calore del fluido geotermico ad un circuito secondario collegato sia a singole utenze che a reti di teleriscaldamento;
• impianti che utilizzano direttamente il fluido geotermico;
• impianti a pompa di calore geotermica (PdC) (sia singole utenze che reti di teleriscaldamento) (Figura 3).
Questa categoria di impianti può essere ulteriormente suddivisa in funzione della tipologia di geoscambio utilizzata per l'accoppiamento con il terreno, ovvero configurazione a circuito aperto (*open loop*) o a circuito chiuso (*closed loop*). I sistemi a circuito aperto utilizzano le acque sotterranee come sorgente termica per la pompa di calore (Figura 4). Il fluido, estratto tramite pozzi, scambia calore con la pompa di calore, e successivamente viene reiniettato nell'acquifero.

Gli impianti a circuito chiuso (Figura 5) possono essere a loro volta suddivisi in:

• impianti a sonde verticali (una o più coppie di "*tubi ad U*" alloggiati in pozzi, al cui interno scorre il fluido termovettore);

• impianti a sonde orizzontali (sonde costituite da serpentine di tubi variamente configurate e alloggiate in trincee nel suolo profonde da 1 a 5 metri);

• geostrutture e pali di fondazione (inserimento delle sonde all'interno dei pali di fondazione dell'edificio).

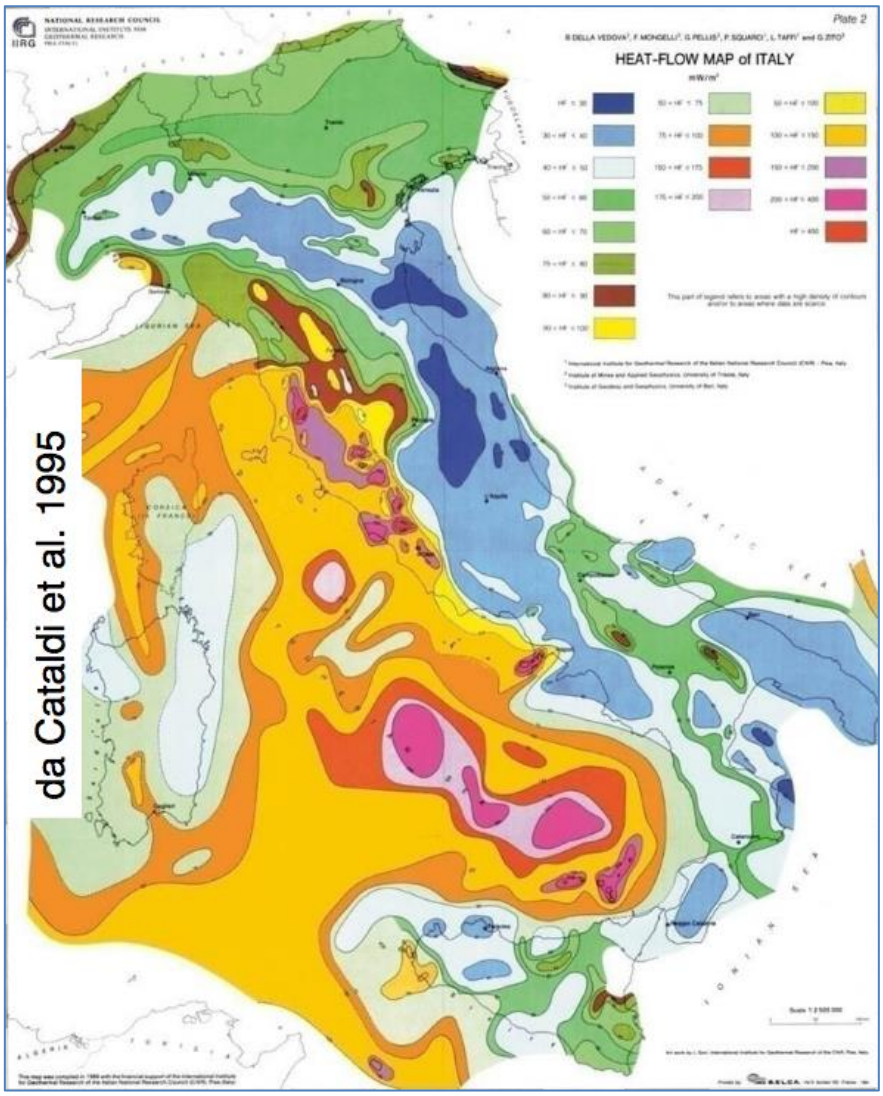


Figura 2. Mappa del flusso di calore d'Italia [6]

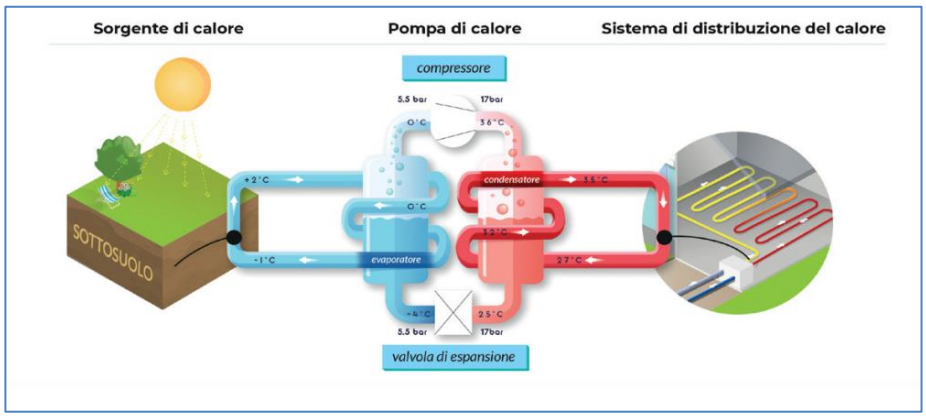


Figura 3. Schema di funzionamento della pompa di calore [7]

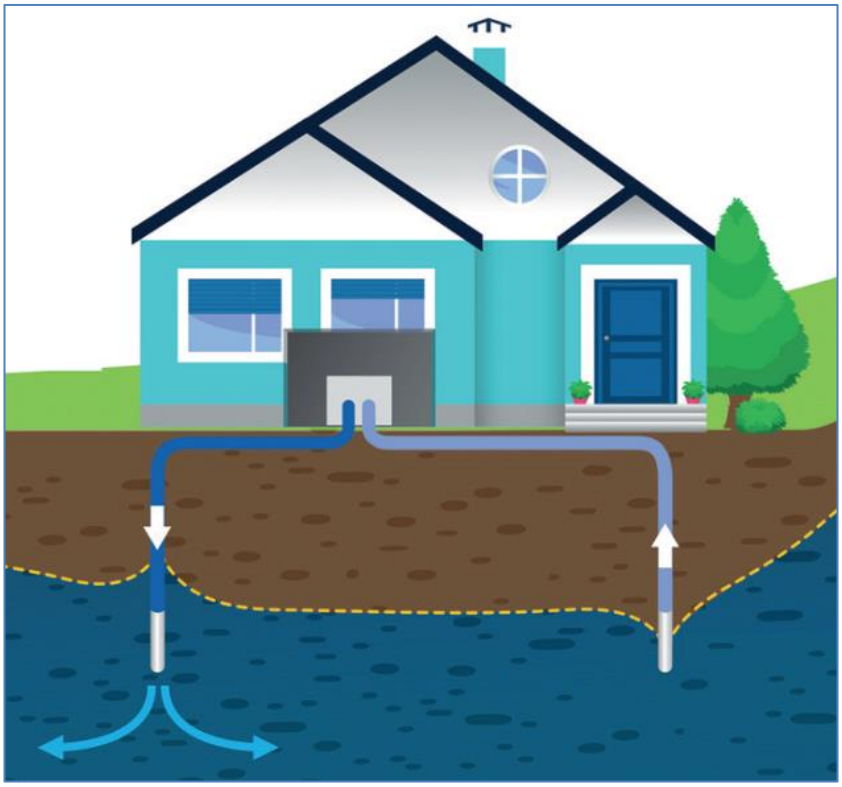


Figura 4. Sistema geotermico a circuito aperto: PdC, pozzo di presa e pozzo di resa [7]

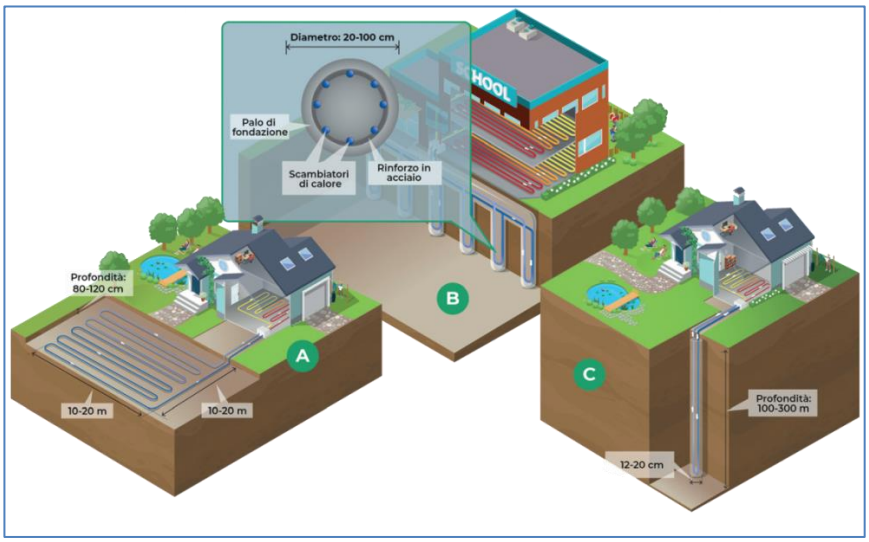


Figura 5. Sistema geotermico a circuito chiuso: scambiatori orizzontali (A), geostrutture (B), sonde geotermiche verticali (C) [7]

Per progettare sistemi in grado di fornire energia termica e frigorifera è necessario acquisire informazioni di carattere geologico, idrogeologico e termico. In particolare, è necessario determinare il valore di temperatura del sottosuolo, le conducibilità e diffusività termiche degli strati di terreno e rocce, il livello dell'acqua di falda, le caratteristiche dell'acquifero e il flusso sotterraneo. Il grado di approfondimento a cui vanno spinte le indagini a carattere geologico è funzione della taglia del progetto e della complessità geologica ed idrogeologica intrinseca del settore in cui ci si trova ad operare [8]. La consultazione delle carte geologiche e dei dati stratigrafici di pozzi e sondaggi va effettuata ai fini di una corretta ricostruzione dei parametri termofisici del sottosuolo. In particolare, i parametri di riferimento da considerare sono:

• la conducibilità termica;

• la diffusività termica;
• la capacità termica.

La conducibilità e la diffusività termica dei terreni dipendono da diversi fattori, quali la porosità, l'umidità, la densità e il grado di saturazione. Nelle rocce, invece, i fattori che condizionano la conducibilità sono la densità e la composizione mineralogica. Inoltre, la presenza di un flusso di falda acquifera sotterranea permette un rinnovo dello stock termico attorno agli scambiatori, consentendo un incremento dell'efficienza del sistema complessivo.

Per determinare il valore della conduzione del calore attraverso un corpo roccioso si ricorre alla legge di Fourier 1), che oltre ad introdurre il concetto di gradiente geotermico ($\frac{dT}{dx}$) presenta il coefficiente di conducibilità o conduttività termica in funzione della temperatura e tipica per ogni roccia (k):

1) $$Q = k\left(\frac{dT}{dx}\right)$$

2.2 Inquadramento geomorfologico-geologico regionale

L'area di studio ricade all'interno del C.R. ENEA-Casaccia, sito in prossimità dell'intersezione tra la via Braccianese (Claudia) e la Via Anguillarese, nei pressi dell'abitato di Osteria Nuova. Essa si localizza su di un versante degradante verso sud-est e sud-ovest, tra i fossi "Rosciolo" e "Fossetto", tributari in destra idrografica del fiume Arrone. L'area di studio ricade nella tavoletta 143 "*S. Maria di Galeria*" della Carta topografica d'Italia alla scala 1:25.000, dell'Istituto Geografico Militare, indicata con il pallino rosso in Figura 6 e nel Foglio 364161 della Carta Tecnica Regionale del Lazio, in scala 1: 5.000, indicata con il pallino rosso in Figura 7.

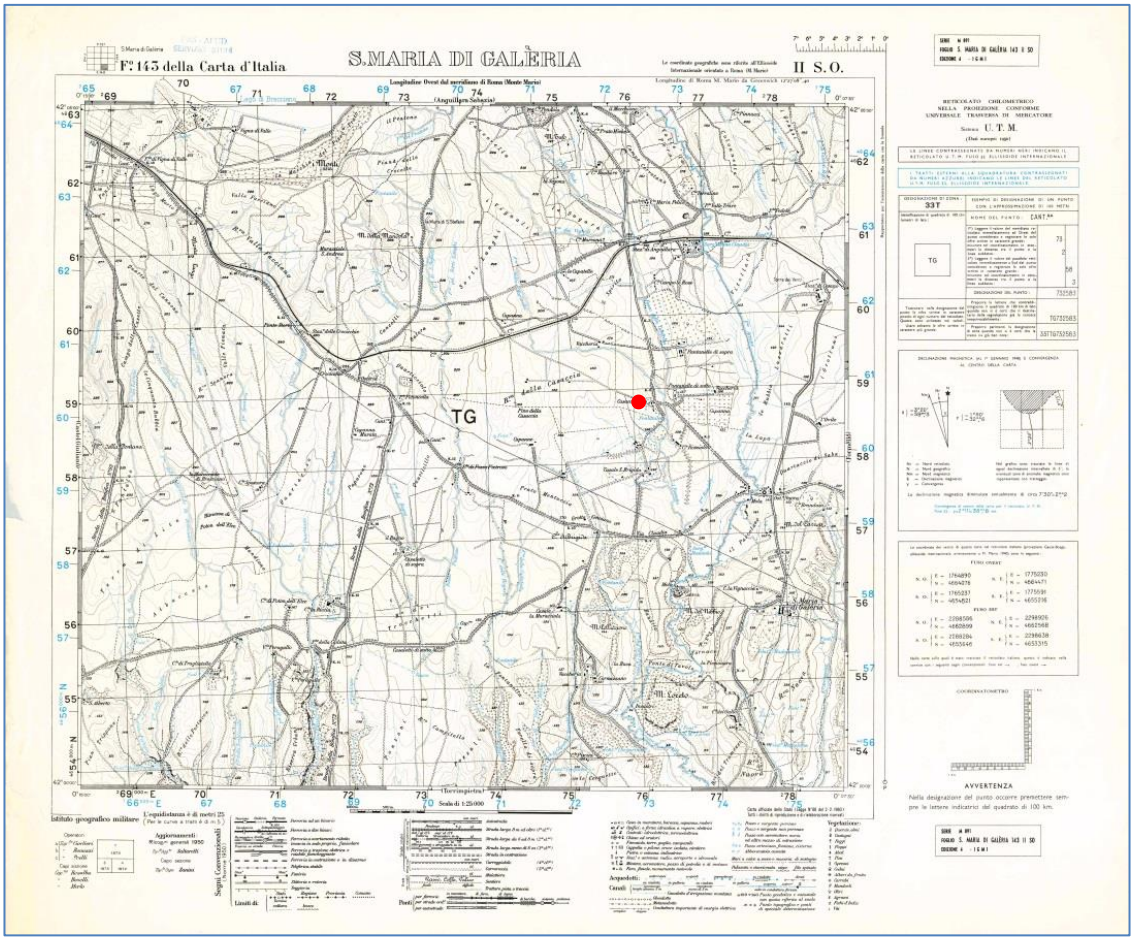


Figura 6. Tavoletta IGM "S. Maria di Galeria", scala 1:25.000 (in rosso ubicazione dell'area di studio)

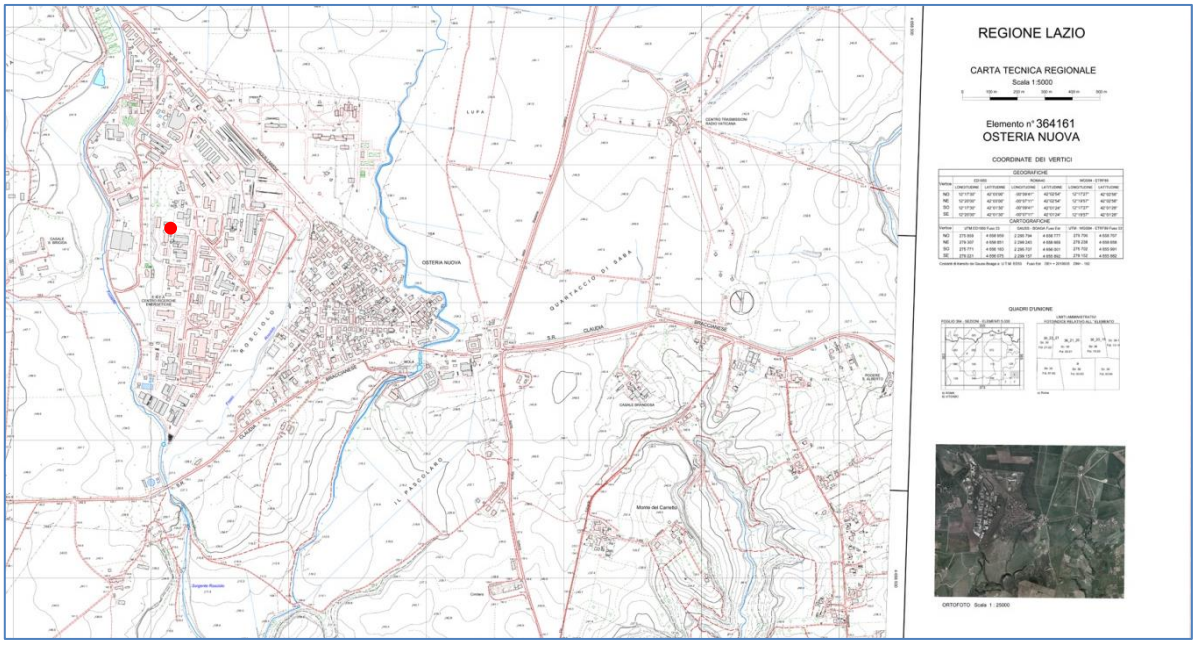


Figura 7. Foglio 364161 della Cartografia Tecnica Regionale del Lazio, in scala 1: 5.000 (in rosso ubicazione dell'area di studio)

L'area circostante il C.R. ENEA-Casaccia si caratterizza per la presenza di rocce vulcaniche appartenenti al Distretto Vulcanico Sabatino, che si estende su di una vasta area del Lazio centro-settentrionale (Figura 8). I litotipi prevalenti, tufi e pozzolane, sono stati emessi durante il Pleistocene medio dall'attività eruttiva del sistema multicentrico, obliterando i terreni sedimentari del Pleistocene inferiore. La formazione vulcanica ha complessivamente una potenza maggiore di 20 metri ed è stata interessata in epoche post vulcaniche da spinti processi erosivi che ne hanno ridotto lo spessore senza però consentire gli affioramenti dei sottostanti terreni sedimentari. L'esistenza del lago di Bracciano è da relazionare alla fine dell'attività parossistica del Complesso Vulcanico Sabatino (CVS) ed in particolare dell'apparato vulcanico di Baccano che ha causato, a partire da 800.000 anni fa, il collasso di varie caldere con conseguente formazione di alcuni bacini dalla caratteristica forma circolare.

Il CVS risale a circa 600.000 anni fa e si sviluppa su una vasta area pianeggiante largamente occupata dai sedimenti argillo-sabbiosi. La morfologia dei basamenti prevulcanici è strettamente connessa all'evoluzione della tettonica di quell'area, la quale ha creato un sistema a "Horst" e "Graben", ovvero depressioni ed elevazioni prevulcaniche (Figura 9). Tale assetto influenza direttamente i flussi idrici sotterranei determinando quote piezometriche maggiori in corrispondenza degli alti strutturali del basamento.
L'origine dell'attività magmatica, con prodotti a elevata concentrazione di potassio, è legata allo sviluppo delle strutture estensive orientali del bacino tirrenico, tra la cintura orogenica degli Appennini e la lenta diffusione del centro del Mar Tirreno. I prodotti vulcanici, composti prevalentemente da colate laviche, flussi piroclastici e depositi di ricaduta, ricoprono un'area di circa 1800 km^2 dalla valle del Tevere, verso est, fino ai monti della Tolfa e ai rilievi del complesso Tolfetano-Cerite-Manziate, a ovest [9].

Il vulcanismo del CVS comprende una varietà di diverse eruzioni quali: i flussi di lava, i flussi piroclastici e depositi di caduta di piroclastiti, di differente intensità e magnitudo. Pertanto si può suddividere e schematizzare la sua evoluzione in quattro fasi, come riportato in Figura 10.

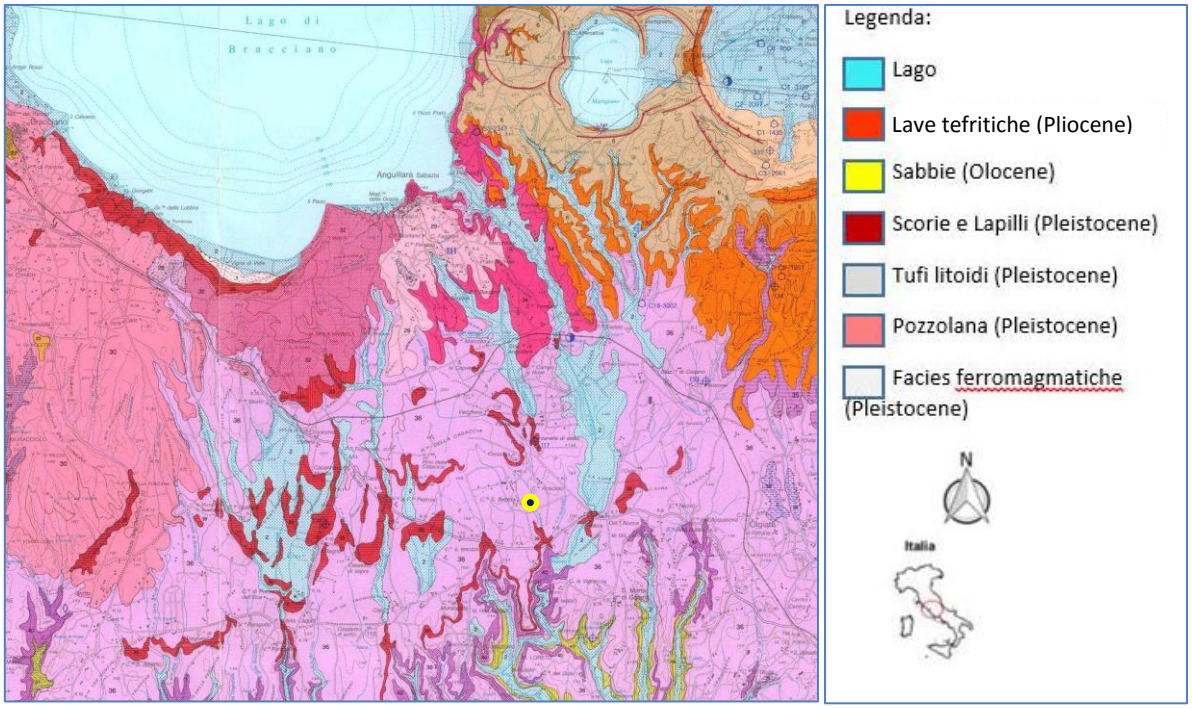


Figura 8. Stralcio della Carta geologica del complesso vulcanico dei Sabatini (in giallo l'area di interesse) [10]

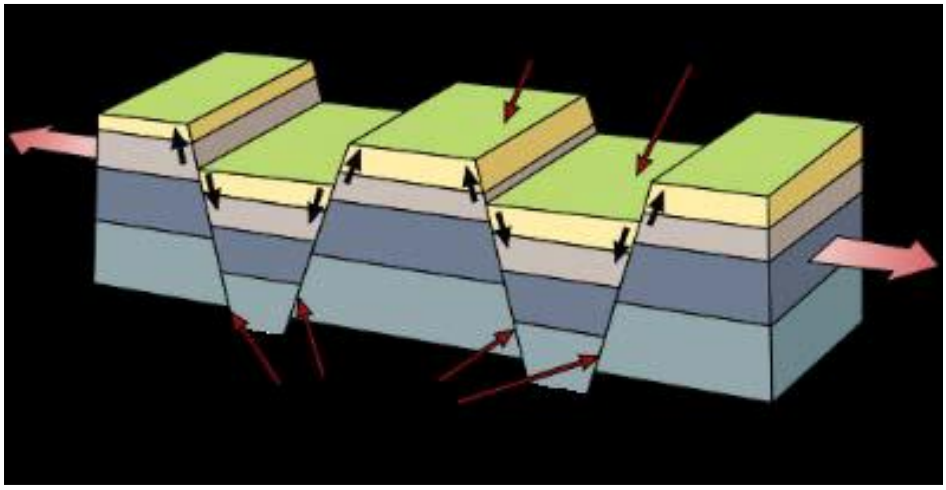


Figura 9. Struttura a "Horst" e "Graben"

A) la prima attività del CVS è iniziata nel settore orientale con lo sviluppo del vulcano di Morlupo-Castelnuovo di Porto (10.A), ad est dell'attuale lago di Bracciano;
B) l'attività vulcanica è migrata successivamente verso ovest, fino all'area di Sacrofano. Il flusso di lava e le unità di caduta sono tipici di questa attività che rappresenta la fase più diffusa e duratura del CVS. L'attività nella zona di Sacrofano iniziò simultaneamente con alcuni coni di cenere allineati lungo i fenomeni estensivi, situati a nord del Lago di Bracciano (10.B);
C) in tutto il complesso si sviluppa una fase parossistica (10.C). La forte percentuale di emissione ha determinato un collasso del settore interno del complesso vulcanico e lo sviluppo di una depressione vulcano-tettonica che ospita proprio il lago di Bracciano;
D) la fase finale del vulcanismo è caratterizzata da violente eruzioni magmatiche da Martignano, Baccano e altri piccoli centri di emissione nel settore orientale del CVS (10.D). L'attività del CVS cessa con l'emissione delle unità di Baccano e il crollo della caldera.

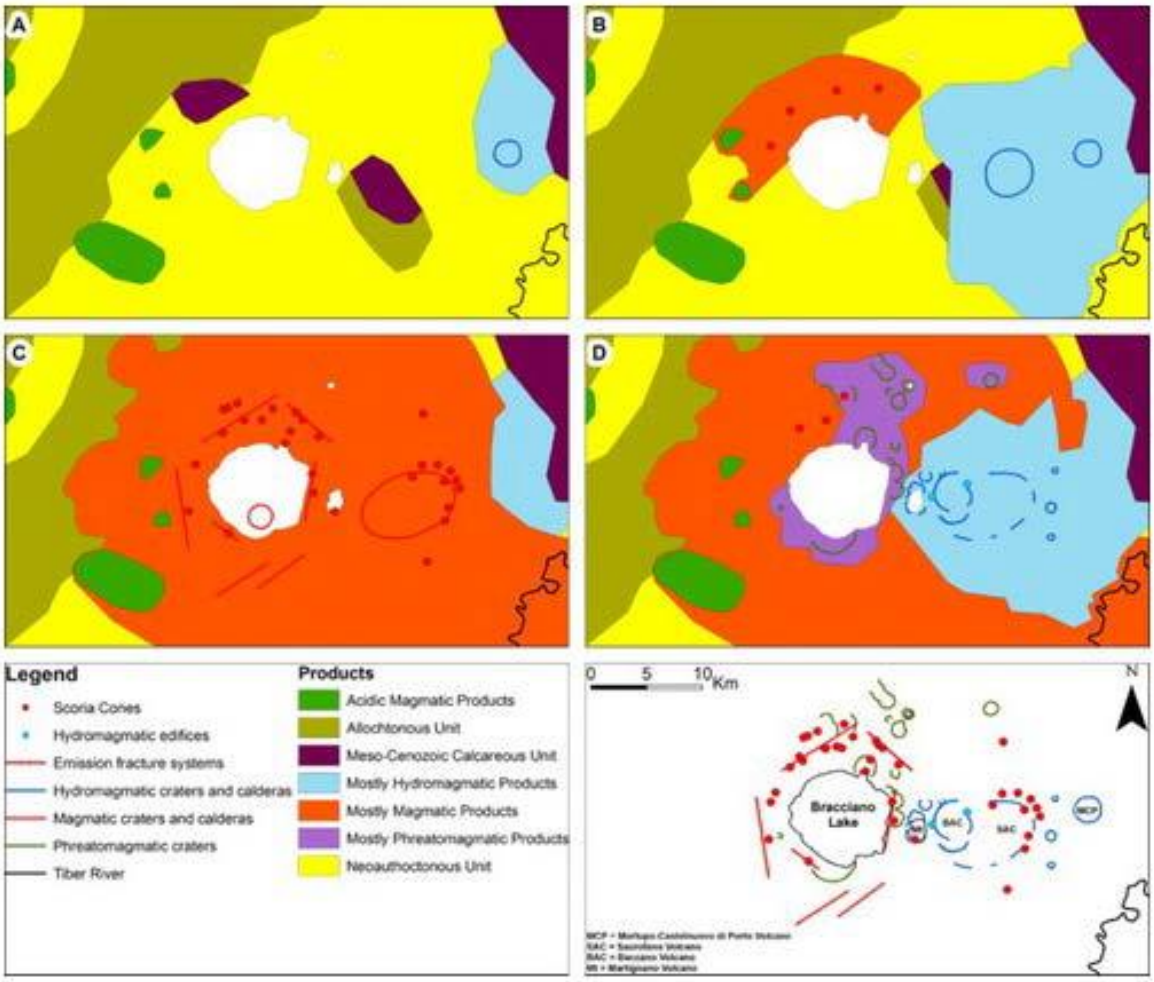


Figura 10. Evoluzione del CVS: A) struttura prevulcanica e sviluppo dei primi centri di emissione; B) attività idromagmatica di Sacrofano e attività magmatica nel settore settentrionale; C) stadio piroclastico dell'attività magmatica nel CVS; D) fase finale dell'attività del CVS [11]

In altre parole, gli eventi tettonici e i frequenti fenomeni di emissione hanno causato, nella parte centrale del CVS, il collasso vulcano-tettonico per svuotamento della camera magmatica, che ha portato ad un approfondimento dell'aquiclude, all'origine della formazione della caldera di Bracciano dove attualmente si trova l'omonimo lago [12]. La vasta depressione del lago si è formata in parte per l'azione di faglie regionali ed in parte perché la vasta camera magmatica, che doveva trovarsi a pochi km dalla superficie e che alimentò tutti i crateri del complesso, nel suo progressivo svuotarsi favorì il graduale crollo del tetto lungo fratture di distensione che alimentarono anche potenti colate di lava.

Attualmente, i terreni vulcanici costituiscono la quasi totalità degli affioramenti ad eccezione delle aree depresse, dove si rinvengono i terreni alluvionali recenti. Come gran parte del comprensorio vulcanico romano anche questa zona è stata abbondantemente incisa dai corsi di acqua, che confluiscono verso il bacino principale rappresentato dal torrente Arrone.

La morfologia è di tipo collinare, con rilievi caratterizzati da versanti a debole pendenza e rare presenze di forre. Le colline della zona, con quote massime di circa 180 m s.l.m., hanno direttrici N-S e E-W e, nell'area d'interesse, sono delimitate dal fosso della Casaccia ad est e dal fosso della Marinella a sud.

2.3 Evoluzione tettonico-sedimentaria dell'area di studio

Prima dell'attività vulcanica sabatina, l'area sulla quale oggi sorge il C.R. ENEA-Casaccia era attraversata da una valle allungata ad andamento N-S, degradante verso S a debole pendenza. I primi depositi piroclastici, legati all'attività vulcanica, hanno colmato la valle in maniera piuttosto regolare. In seguito, la colata piroclastica del "Tufo rosso a scorie nere" [10] ha colmato le depressioni esistenti, comportando una regolarizzazione della morfologia preesistente. Al di sopra di tale assetto morfologico si depositò ulteriore materiale vulcanico, rispettivamente il tufo superiore nella parte alta e i "Tufi stratificati varicolori de' La Storta" nella parte più depressa. In seguito, conseguentemente ad eventi di tettonica distensiva, in tutti i settori del distretto sabatino, a N e a S dell'attuale lago di Bracciano, si ebbe la fuoriuscita di colate laviche, emesse da fratture causate dal collasso vulcanico-tettonico della conca del lago di Bracciano [10]. A questa fase è riconducibile la messa in posto della colata lavica che ha interessato il centro Casaccia, che presenta un andamento N-S (Figura 11). Contemporaneamente, il collasso vulcano-tettonico dell'alto strutturale Baccano-Cesano ha comportato la messa in posto nel bacino di depositi lacustri. Lo stazionamento del livello di base ha condizionato la sedimentazione di depositi lacustri-palustri anche all'interno della successione stratigrafica del centro nella parte più meridionale, ovvero quella rivolta verso Osteria Nuova, e nell'area Capanna, verso la sinistra idrografica dell'Arrone. La parte alta dei tufi superiori affioranti nella zona centrale del C.R. ENEA-Casaccia, in particolare le facies granulari stratificate, potrebbero essere imputabili a fasi idromagmatiche successive alla messa in posto dei "Tufi stratificati varicolori de' La Storta".

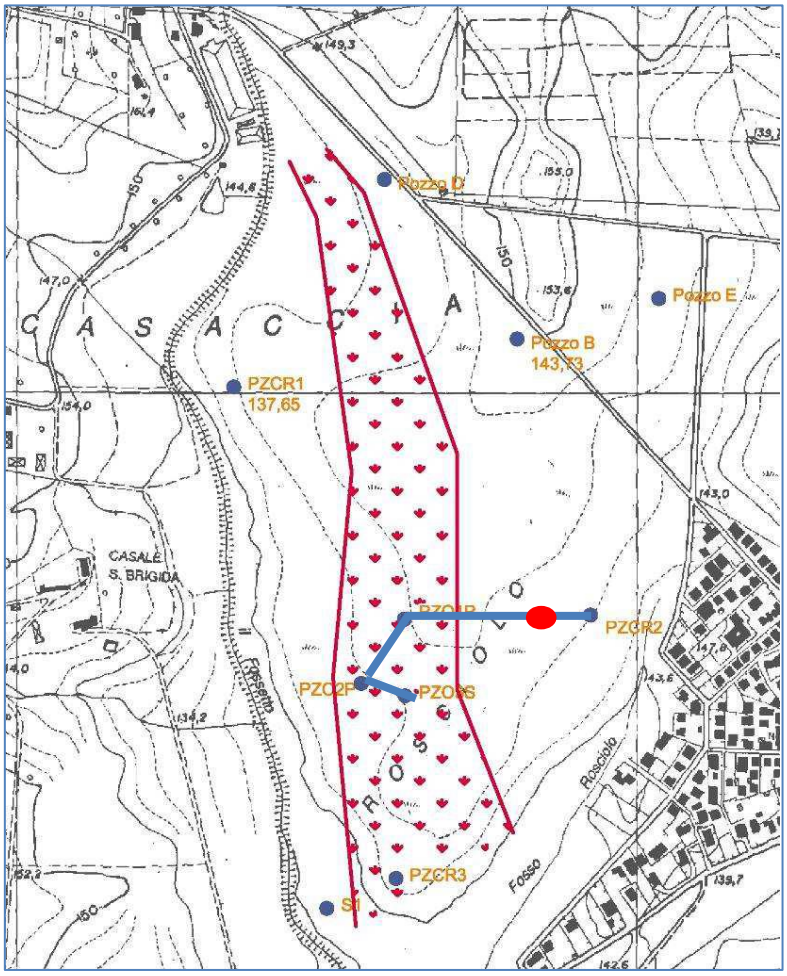


Figura 11. In rosso la colata lavica che ha occupato l'area centrale del C.R. Casaccia (andamento N-S). In blu linea di congiunzione tra i pozzi interpolati (dati Sogin) e in rosso l'area di interesse

2.4 Successione stratigrafica del C.R. Casaccia

La stratigrafia locale è stata estrapolata dai dati riportati nella Relazione Tecnica C.R. Casaccia – Impianto OPEC 1., riguardante la "Caratterizzazione idrogeologica e radiometrica del sito Casaccia propedeutica, impianto Casaccia-OPEC" redatta per conto della Società Gestione Impianti Nucleari (Sogin) nell'anno 2008 [2]. Nel C.R. ENEA-Casaccia si evidenziano in affioramento le "Piroclastiti di Sacrofano", localmente rimaneggiate [10], al cui interno sono comprese le due successioni definite dagli Autori "Tufi stratificati varicolori di Sacrofano" sotto e "Tufi stratificati varicolori de' La Storta" sopra, localmente separate dal "Tufo rosso a scorie nere".

La successione sintetizzata nella carta geologica, in Figura 12, è descritta nel seguito partendo dai termini più antichi fino ai più recenti:

- **substrato prevulcanico:** litotipi sabbioso-limosi incoerenti, di colore da marrone-giallastro a grigio, mentre i termini argilloso-limosi sono costituiti prevalentemente da argille consistenti, debolmente plastiche, di colore prevalentemente grigiastro subordinatamente marrone chiaro e avana. Questi sedimenti sono riconducibili ad un ambiente deposizionale costiero con frequenti passaggi a facies di laguna, evolutosi tra il Pliocene superiore ed il Pleistocene inferiore;

- **tufi inferiori:** tufi incoerenti (costituiti da cenere grossolana, subordinatamente fine, con diffusi lapilli e pomici gialle spesso organizzati in livelli a diversa granulometria dello spessore da centimetrico a decimetrico), livelli vulcano-clastici rimaneggiati. Diffusi i cristalli di leucite alterata in analcime e frammenti di cristalli di pirosseno. I primi metri della successione vulcanica sono caratterizzati dalla presenza di epivulcaniti costituite da ceneri vulcaniche fini e limi argillosi con minerali vulcanici, potrebbero essere correlati con i con i "Tufi stratificati varicolori di Sacrofano";

- **tufo rosso a scorie nere:** costituito da lapilli e pomici nere immerse in matrice cineritica grossolana, poco coerente di colore da giallo a marrone-rossastro;

- **tufo superiore:** affiora nell'area del C.R. ENEA-Casaccia. È caratterizzato da un'alternanza di strati e lenti di natura eterogenea, costituito in prevalenza da materiale vulcanico di origine piroclastica. All'interno di questa unità sono presenti colate laviche, depositi lacustri ed epivulcaniti, per cui sono spesso frequenti e improvvisi passaggi verticali e laterali tra un litotipo e l'altro, il che conferisce una certa complessità anche dal punto di vista della circolazione delle acque sotterranee. La parte bassa di questa unità è correlabile con i "Tufi stratificati varicolori de' La Storta", mentre non è da escludere che le facies granulari stratificate talora presenti al tetto dell'unità possano essere attribuite a fasi idromagmatiche successive;

- **tufi granulari:** tufo granulare organizzato in livelli a diversa granulometria, dai lapilli alla cenere grossolana e, subordinatamente, fine. All'interno di questo litotipo sono riconoscibili abbondanti pomici gialle e scorie nere di piccole dimensioni;

- epivulcaniti: si tratta di prodotti piroclastici a composizione prevalentemente cineritica, depositati in ambiente acquatico (tufiti), in genere rimaneggiati e risedimentati. Spesso intercalati con strati e piccole lenti di limi argillosi e sabbiosi con materiale vulcanico rimaneggiato;

- tufi terrosi: costituiti da ceneri fini, subordinatamente grossolane, di colore da marrone chiaro a marrone rossastro contenenti diffuse pomici gialle, analcime e pirosseno;

- depositi lacustri: formati da ceneri fini, livelli argillosi scuri e materiali vulcanici rimaneggiati;

- lave leucititiche: di colore grigio chiaro con fenocristalli costituiti da leuciti talvolta analcimizzate. La colata lavica presente nel substrato del centro ha una un andamento circa N-S, spessori e fronti minori verso N e massimi verso S (circa 20 metri); sembra che la lava si sia incanalata verso sud in una incisione esistente dovuta a fenomeni di erosione (Figura 11).

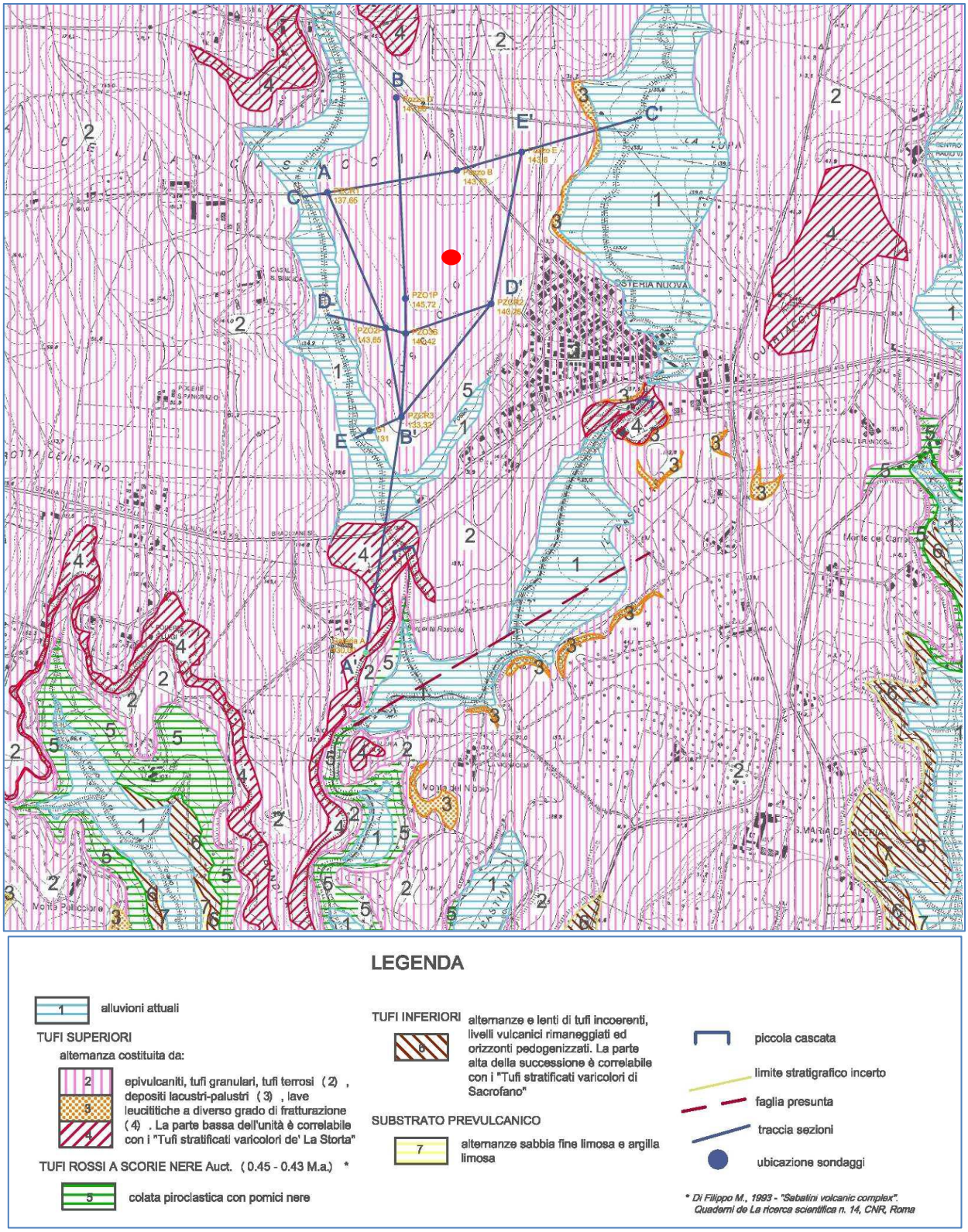


Figura 12. Carta geologica con in rosso l'area di interesse, scala 1:20.000 [10]

2.5 Ubicazione del campo geosonde e assetto stratigrafico-litologico presunto

L'area prescelta si trova all'interno del C.R. ENEA-Casaccia, disposta su di un versante degradante verso SE e SW, compresa tra i fossi "Rosciolo" e "Fossetto", tributari in destra idrografica del fiume Arrone. Nell'area prescelta verranno effettuate quattro perforazioni, attrezzate con sonde geotermiche, a diversa profondità. La stratigrafia è stata estrapolata dall'interpolazione dei dati di pozzo, di proprietà Sogin, presenti nelle immediate vicinanze (Figura 11). In particolare, le perforazioni interesseranno la zona carrabile adiacente l'edificio F40 (Figure 13 e 14). La distanza reciproca tra i pozzi dovrà essere di circa 8 metri e la distanza dalla pompa di calore, che sarà ubicata all'interno della hall presente nel suddetto edificio, sarà di circa 16 metri dalla testa dei pozzi. Pertanto, arealmente, la superficie occupata dal campo geosonde sarà di circa 42 metri quadrati. Inoltre, è stata considerata una distanza di sicurezza, maggiore di 5 metri, dalla rete del gas e dalla rete fognaria, al fine di escludere potenziali incidenti.

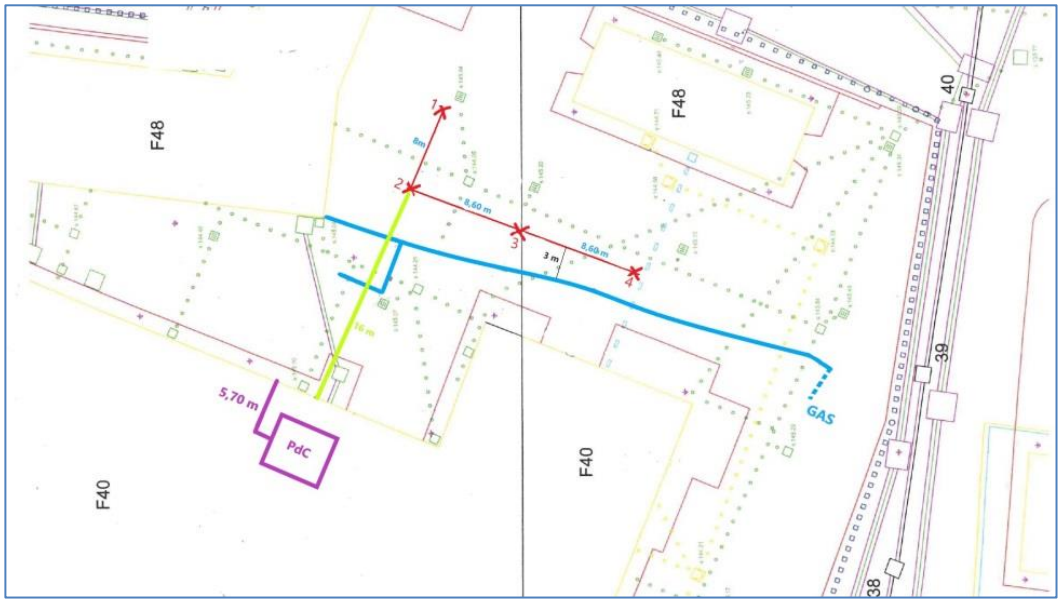


Figura 13. Planimetria con ubicazione dei pozzi adiacenti l'edificio F40, nel C.R. ENEA-Casaccia (in verde scuro la rete fognaria, in blu la rete gas, in rosso l'ubicazione dei quattro pozzi, in verde chiaro la distanza dalla pompa di calore, che sarà ubicata all'interno della hall dell'edificio F40)

Figura 14. Foto della zona prescelta per l'ubicazione del campo geosonde

Per definire una sequenza stratigrafica presumibile dell'area del campo geosonde, in maniera preventiva all'esecuzione delle perforazioni, si è fatto riferimento ai dati relativi alle perforazioni descritte nello studio Sogin. In particolare, sono stati considerati i seguenti pozzi: PZ03s, PZ02p, PZ01p e PZCR2 (Figura 11). Tali sondaggi, eseguiti nel 2008, sono stati commissionati dalla Sogin per l'impianto Casaccia OPEC 1, al fine di caratterizzare il sito dal punto di vista idrogeologico e radiometrico, propedeutico allo smaltimento dei serbatoi Waste A e Waste B. La finalità di tale studio è stata di ricostruire l'assetto geologico del sottosuolo del C.R. ENEA-Casaccia e tramite la rete piezometrica di individuare, campionare e misurare (anche di continuo) i livelli di falda e gli indicatori chimico-radiometrici delle acque di circolazione superficiali e profonde. Sono stati considerati i sopracitati pozzi perché realizzati a carotaggio continuo, a differenza degli altri che sono stati condotti a distruzione di nucleo. Successivamente, i dati dei pozzi, opportunatamente georeferenziati, sono stati inseriti in un progetto GIS sviluppato appositamente con il software open source QGIS (versione 3.4.14).
Sono stati individuati i litotipi presenti in modo più marcato e significativo nei suddetti pozzi, in modo da poterne seguire l'evoluzione in termini di spessore e arealmente. L'attività prevista il secondo anno, che prevede la realizzazione di una perforazione a carotaggio continuo di uno dei quattro pozzi, servirà a definire con certezza l'assetto stratigrafico, così da poter misurare in modo corretto il valore della conducibilità termica del terreno e quindi della resa termica per metro lineare di sonda installata nel terreno.
Intanto, l'attenta analisi e consultazione delle colonnine stratigrafiche, riportate nello studio Sogin e redatte dalla società EarthScience, ha portato all'identificazione di una sequenza stratigrafica semplificata rappresentativa del sottosuolo del campo geosonde, costituita da 4 macro-classi principali. Attraverso l'interpolazione delle quote relative al tetto e al letto delle diverse macro-classi identificate nelle stratigrafie dei pozzi disponibili, sono state modellate le superfici rappresentative delle diverse interfacce tra una macro-classe e l'altra (Modelli Digitale di Elevazione - DEM), in maniera da poter conoscere approssimativamente la quota di ogni interfaccia e lo spessore di ogni corpo rappresentato dalle macro-classi. Le macro-classi individuate sono, dal basso verso l'alto (Tabella 2):

- **depositi sedimentari:** costituiti da limo con argilla fine a limo argilloso, da debolmente umido a umido, consistente, debolmente plastico, di colore marrone. È presente materiale vulcanico molto alterato (scorie marroni) e sono presenti concrezioni travertinose e ossidi di ferro (striature color ruggine). Non è possibile definire lo spessore in quanto la profondità delle perforazioni non ha superato tale litotipo;

- **materiale eterogeneo (ET):** tufo terroso costituito da cenere fine, umido, coerente di colore marrone e tufo granulare costituito da cenere grossolana/fine, da umido a saturo, coerente, di colore grigio verdastro. **Spessore presunto ~10.5 metri;**

- **tufo granulare con lapilli e bombe (TGLB):** tufo granulare costituito da lapili e bombe (scorie nere) in una matrice di cenere grossolane, saturo, da debolmente coerente e coerente con diffusi livelli cementati (litoidi) più frequenti alla base (da marrone e marrone-arancio a nerastro). Diffusa leucite alterata in analcime, scorie nere, scorie grigie e pirosseno e rare scorie rossastre. **Spessore presunto ~12 metri;**

- **tufo granulare stratificato (TGS):** tufo granulare stratificato in livelli a diversa granulometria, da cenere grossolana lapillosa a cenere grossolana/fine, asciutto, coerente a tratti cementato, mediamente addensato, di colore da marrone chiaro a marrone scuro. Sono abbondanti pomici gialle; diffuse scorie nere e grigie, diffusa microleucite;

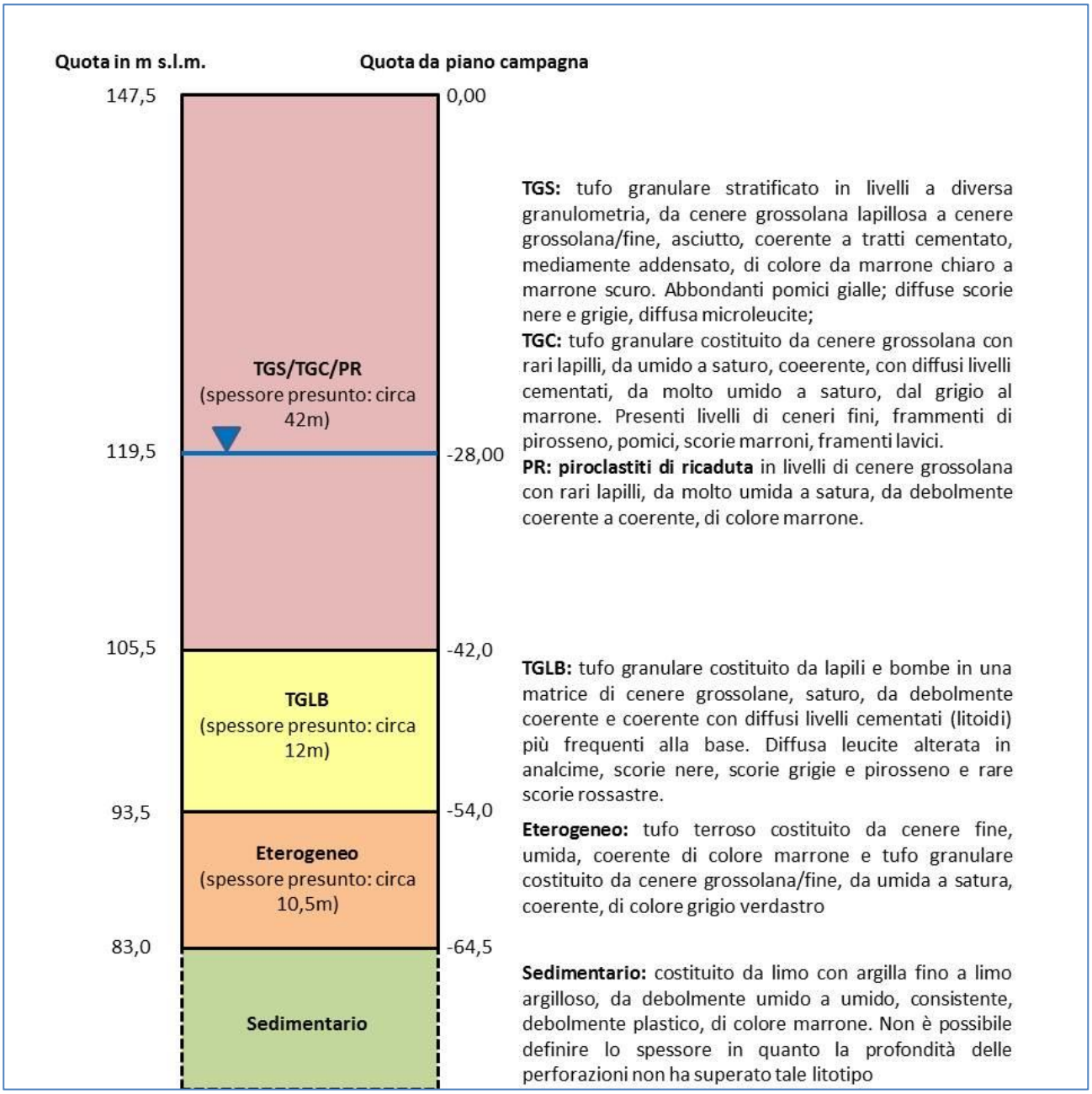
- **tufo granulare con cenere grossolana (TGC):** tufo granulare costituito da cenere grossolana con rari lapilli, da umido a saturo, coerente, con diffusi livelli cementati, da molto umido a saturo, colore da grigio a marrone. Sono presenti livelli di ceneri fini, frammenti di pirosseno, pomici, scorie marroni, framenti lavici;

- **piroclastiti di ricaduta (PR):** in livelli di cenere grossolana con rari lapilli, da molto umida a satura, da debolmente coerente a coerente, di colore marrone.

Gli ultimi tre litotipi sono stati accorpati in un'unica macro-classe, il cui **spessore complessivo presunto è di ~42 metri**.

La lava, ove presente, si colloca tra i tufi granulari stratificati (TGS) e i tufi granulari con cenere grossolana (TGC). Dato l'andamento della colata lavica e dalle evidenze riscontrate nei dati di pozzo interpolati, si ipotizza la non presenza delle lave nella zona prescelta per l'installazione delle sonde geotermiche verticali. Ciò implica meno accorgimenti durante l'attività di scavo, in quanto non sarà necessario adoperare speciali scalpelli e prevedere maggiori consumi energetici.
In ultimo, è stato stimato il livello della superficie piezometrica, che si attesta nell'area di studio intorno ai 28 metri dal piano campagna, ovvero a circa 119,5 m s.l.m.

Tabella 2. Litotipi e livello della superficie piezometrica ipotizzata per i quattro pozzi



3 Idrogeologia

3.1 Inquadramento regionale

L'acquifero regionale è contenuto nell'intero sistema dei depositi vulcanici, e le formazioni sedimentarie costituiscono il letto impermeabile dell'acquifero sovrastante. La circolazione idrica nei sistemi vulcanici dipende da diversi fattori, quali:
- la paleomorfologia dei depositi basali costituiti da sedimenti marino-continentali a bassa permeabilità che costituiscono l'aquiclude;
- l'attuale assetto morfologico dei rilievi e del reticolo idrografico, che determina l'andamento delle infiltrazioni e della percolazione delle acque sotterranee.

La carta dei complessi idrogeologici dell'area permette di identificare diverse litoformazioni (Figure 15-16):

- complesso delle lave, laccoliti e scorie: presentano valori di permeabilità mediamente alta, ma per la presenza di materiale eterogeneo (ceneri, paleosuoli) si presentano, talvolta, contrasti dei valori di permeabilità verticale;

- complesso delle pozzolane: depositi di colata piroclastica, massivi e caotici spesso litoidi. Presentano una permeabilità elevata. Talvolta per la presenza di paleosuoli si possono presentare falde sospese;

- complesso dei tufi stratificati e delle facies freatomagmatiche: tufi stratificati e tufi terrosi. Compresi anche i depositi lacustri, livelli di pomici, lapilli, brecce piroclastiche. La permeabilità nel complesso è mediamente bassa;

- complesso delle sabbie, argille, ghiaie: permeabilità bassa;

- complesso dei depositi terrigeni: comprende il flysh dell'Olocene, le argille del Pliocene e del Pleistocene. Permeabilità bassa e costituisce l'aquiclude degli acquiferi regionali sovrastanti.

Come già detto, al di sotto dei depositi vulcanici sono presenti due tipi di basamento prevulcanico che rappresentano l'aquiclude dell'acquifero regionale, il primo rappresentato dalle unità depositatesi in posto, il secondo costituito dai depositi pliocenici e pleistocenici marini.
Nell'area della Casaccia la superficie di separazione tra i depositi vulcanici e le formazioni sedimentarie sottostanti è tra i 40 e i 90 m di profondità dal piano campagna. Nell'area del campo geosonde tale superficie si trova presumibilmente a circa 64 metri dal piano campagna.

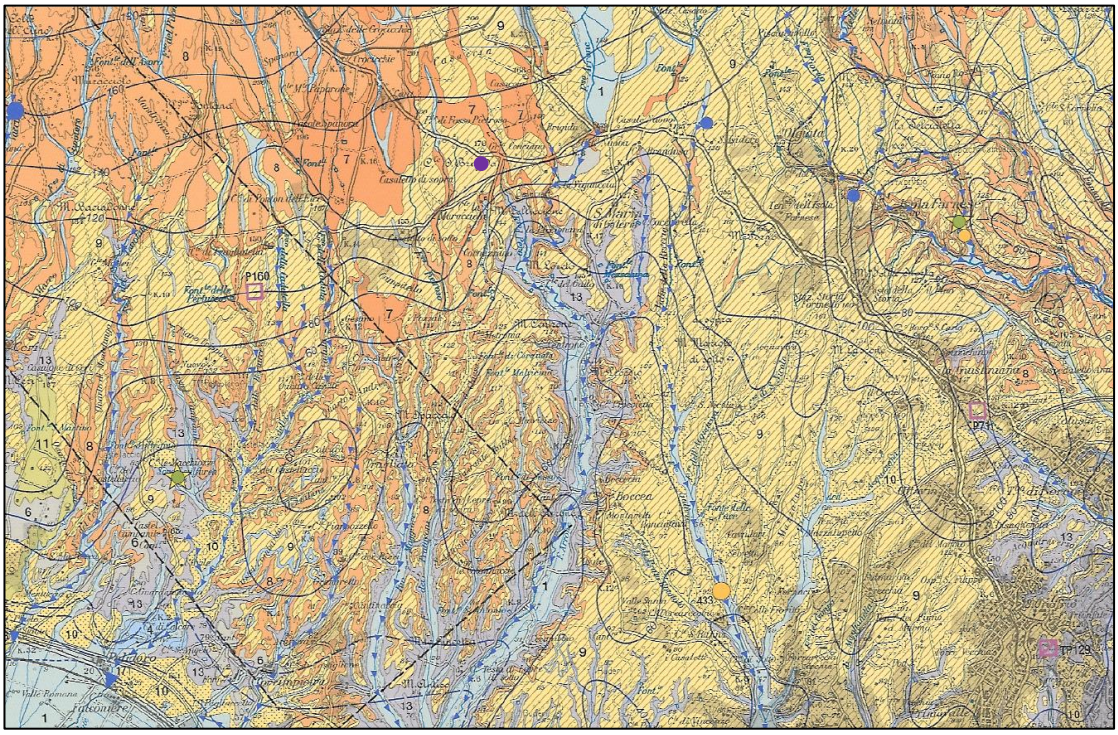


Figura 15. Stralcio Carta Idrogeologica del Territorio della Regione Lazio; 1:100.000 [13] (in viola l'area di interesse)

6 — **COMPLESSO DEI DEPOSITI FLUVIO PALUSTRI E LACUSTRI** - *potenzialità acquifera bassa*
Depositi prevalentemente limo - argillosi in facies palustre, lacustre e salmastra con locali intercalazioni ghiaiose e/o travertinose (*PLEISTOCENE - OLOCENE*). Spessore variabile da pochi metri ad alcune decine di metri. La prevalente componente argillosa di questo complesso impedisce una circolazione idrica sotterranea significativa: la presenza di ghiaia, sabbie e travertini può dare origine a limitate falde locali. Il complesso può assumere il ruolo di aquiclud confinando la circolazione idrica sotterranea degli acquiferi carbonatici (Piana Pontina e di Cassino).

7 — **COMPLESSO DELLE LAVE, LACCOLITI E CONI DI SCORIE** - *potenzialità acquifera media alta*
Scorie generalmente saldate, lave e laccoliti. (*PLEISTOCENE*). Spessori da qualche decina a qualche centinaio di metri. Questo complesso contiene falde di importanza locale ad elevata produttività, ma di estensione limitata.

8 — **COMPLESSO DELLE POZZOLANE** - *potenzialità acquifera media*
Depositi da colata piroclastica, genericamente massivi e caotici, prevalentemente litoidi. Nel complesso sono comprese le ignimbriti e tufi (*PLEISTOCENE*). Spessore da pochi metri ad un migliaio di metri.
Questo complesso è sede di una estesa ed articolata circolazione idrica sotterranea che alimenta la falda di base dei grandi acquiferi vulcanici regionali.

9 — **COMPLESSO DEI TUFI STRATIFICATI E DELLE FACIES FREATOMAGMATICHE** - *potenzialità acquifera bassa*
Tufi stratificati, tufi terrosi, brecce piroclastiche, pomici, lapilli e blocchi lavici in matrice cineritica (*PLEISTOCENE*). I termini del complesso si presentano interdigitati tra gli altri complessi vulcanici per cui risulta difficile definirne lo spessore totale. Il complesso ha una rilevanza idrogeologica limitata anche se localmente può condizionare la circolazione idrica sotterranea, assumendo localmente il ruolo di limite di flusso e sostenendo esigue falde superficiali.

10 — **COMPLESSO DEI DEPOSITI CLASTICI ETEROGENEI** - *potenzialità acquifera bassa*
Depositi prevalentemente sabbiosi e sabbioso - argillosi a luoghi cementati in facies marina e di transizione, terrazzati lungo costa, sabbie e conglomerati fluviali di ambiente deltizio (*PLIOCENE - OLOCENE*). Spessore variabile fino a un centinaio di metri. Il complesso non presenta una circolazione idrica sotterranea significativa. Ove sono prevalenti facies conglomeratiche di elevata estensione e potenza si ha la presenza di falde di interesse locale.

11 — **COMPLESSO DELLE CALCARENITI ORGANOGENE** - *potenzialità acquifera media*
Calcareniti, calcari sabbiosi e arenarie calcaree (macco) (*PLIOCENE*). Spessori variabili fino ad alcune decine di metri. Dove l'estensione dell'affioramento consente una ricarica zenitale significativa, ospitano falde di interesse locale.

12a / 12b — **COMPLESSO DEI CONGLOMERATI** - *potenzialità idrica da medio bassa a medio alta*
Conglomerati poligenici che assumono potenzialità idriche differenti in funzione del loro spessore e della natura della matrice e/o cemento. Sono stati distinti due sottocomplessi:
12a - conglomerati a potenzialità idrica medio bassa
Breccia calcarea cementata, calcareniti, calcirudite con livelli argillosi, conglomerati poligenici a cemento argilloso (*MIOCENE - PLIOCENE*), puddinghe a cemento sabbioso (conglomerati di Santopadre) (*PLEISTOCENE INF.*). Spessore variabile da qualche decina ad oltre un centinaio di metri. La ridotta estensione degli affioramenti, associata all'abbondante matrice argilloso - sabbiosa di questo complesso, impediscono l'attivazione di una circolazione idrica sotterranea significativa. Solo dove poggiano su un substrato a bassa permeabilità possono contenere falde esigue.
12b - conglomerati a potenzialità idrica medio alta
Conglomerati generalmente cementati con spessore variabile da qualche decina a diverse centinaia di metri (*PLIOCENE - PLEISTOCENE*). Nelle zone di Rieti e di Formia questo complesso è sede di falde produttive.

13 — **COMPLESSO DELLE ARGILLE** - *potenzialità acquifera bassissima*
Argille con locali intercalazioni marnose, sabbiose e ghiaiose (*PLIOCENE - PLEISTOCENE*), argille con gessi (*MIOCENE*); spessore variabile da decine a centinaia di metri. La prevalente matrice argillosa di questo complesso definisce i limiti di circolazione idrica sotterranea sostenendo gli acquiferi superficiali e confinando quelli profondi. Laddove affiorano i termini ghiaioso-sabbiosi è presente una circolazione idrica di importanza locale (Bacino del Farfa).

Figura 16. Stralcio legenda complessi idrogeologici della carta idrogeologica del Territorio della Regione Lazio; 1:100.000 [13]

3.2 Idrologia del C.R. Casaccia

L'area del C.R. ENEA-Casaccia ricade nel bacino imbrifero del Fiume Arrone, emissario del Lago di Bracciano, che sfocia nel Mar Tirreno poco a nord di Fregene dopo un percorso di circa 40 km. Il bacino imbrifero è ampio circa 140 km^2. Il corso del fiume Arrone può essere diviso in tre tratti:

- tratto superiore, dal Lago di Bracciano ad Osteria Nuova, tra quota 164 e 133 m.s.l.m.;
- tratto medio, fino al Monte Loreto a quota 54 m.s.l.m.;
- tratto inferiore, dal monte Loreto alla foce.

Nel primo tratto la portata naturale è essenzialmente imputabile al solo contributo in subalveo delle acque di falda, oltre che dal discontinuo apporto direttamente dal Lago. Nel secondo tratto si assiste a un aumento di portata dell'ordine di qualche centinaio di l/s. Ciò è dovuto al contributo dell'acqua di falda e in maggior misura alle sorgenti puntuali. Nell'ultimo tratto, il fiume scorrendo su depositi marini e continentali a bassa permeabilità riceve il contributo delle acque contenute nelle formazioni vulcaniche e dalle sorgenti poste a quote più elevate del fondovalle.

Nell'intorno della Casaccia gli elementi idrologici principali sono costituiti dal fosso "Rosciolo" e dal fosso "Fossetto" (Figura 17). Il fosso Rosciolo costeggia il lato orientale del Centro Casaccia, nasce in zona Pantanelle in prossimità dell'area Capanna. Il fosso Fossetto, invece, costituisce il confine occidentale del Centro e nasce dalle pendici del rilievo calderico a sud di Anguillara. Il Fossetto, dopo aver ricevuto le acque dal fosso Rosciolo, confluisce nell'Arrone poco a sud del Centro. Inoltre, riceve nel tratto adiacente il centro, una notevole alimentazione dell'acqua di falda e dalla sorgente Micara.

Tali fossi presentano un alveo notevolmente incassato; nonostante ciò riescono a defluire le acque superficiali nei periodi di intensa precipitazione. Si nota che la portata del fosso Rosciolo via via va diminuendo, fino a valle della via Braccianese Claudia (107 l/s) (Figura 17). Alla quota di 110 m s.l.m. l'alveo intercetta la linea piezometrica della falda basale e ne determina il drenaggio. A fine anni '60 il regime del fiume Arrone raggiungeva portate considerevoli già a poche centinaia di metri di distanza dalla località Incile del Lago, come si evince dalla portata misurata a Mola Vecchia (Tabella 3).

Le misure di portata riportate nella Figura 18 si riferiscono ad una serie di misure di portata effettuate da Dall'Aglio e Giannotti nel 1963 [14]. Le misure riportate nella Tabella 3, invece, si riferiscono a misure effettuate dagli stessi nel 1967 [15]. Tali misure sono state effettuate per progettare il sistema di approvvigionamento idrico del C.R. ENEA-Casaccia. Il fosso Fossetto a regime torrentizio manteneva, in prossimità del Centro, una portata di un certo rilievo (68 l/s). Ciò è dovuto, come già detto, all'apporto della sorgente Micara, ubicata in sponda destra in prossimità dello spigolo NO della recinzione della Casaccia e in misura minore dall'apporto delle falde superficiali presenti nei versanti dei rilievi del Centro e del Podere S. Brigida (146 m s.l.m.). A valle della via Braccianese è stato misurato un decremento della portata paria a 46 l/s, dovuto probabilmente all'infiltrazione nelle lave intensamente fratturate. Poco più a valle è stata misurata una portata di 247 l/s; tale aumento è dovuto al contributo della sorgente Rosciolo (32 l/s).

Nella località Incastri (50 m) la portata del F. Arrone era di 369 l/s. Il contributo della falda di base a valle della via Braccianese Claudia nel F. Arrone è stato definito considerevole e stabile. L'incremento notato nelle portate tra quota 120 e 50 m s.l.m. è stato 273 l/s nel 1967.

Dal punto di vista ecosistemico il fiume è classificato dalla Regione Lazio come ciprinicolo, ovvero corso d'acqua in cui vivono pesci di rilevante valore della famiglia dei ciprinidi (es. carpa, tinca, cefalo, luccio).

Nel corso dei decenni successivi, il regime idrologico del Fiume Arrone e della rete di fossi che drenano verso di esso è profondamente mutato. L'Arrone ha perso la sua sorgente principale, ossia il lago di Bracciano, che nel corso degli ultimi 30 anni ha raramente superato la quota dell'Incile di immissione nell'alveo del fiume.

Più a valle le portate sono regolate dagli scarichi del depuratore del consorzio CoBIS, ubicato poco a monte del C.R. ENEA-Casaccia, che raccoglie le acque reflue dei Comuni di Anguillara Sabazia, Bracciano, Trevignano Romano, Manziana, Oriolo Romano e Cesano. Il regime di flusso del fosso Rosciolo risente del collettore fognario di Osteria Nuova, e quello del fosso Fossetto risente dell'apporto del depuratore ubicato in prossimità di via Braccianese Claudia. Tale situazione comporta la difficoltà di definire con certezza gli scambi tra falde e corsi d'acqua, in quanto l'apporto delle acque reflue subisce frequenti fluttuazioni nel corso degli anni.

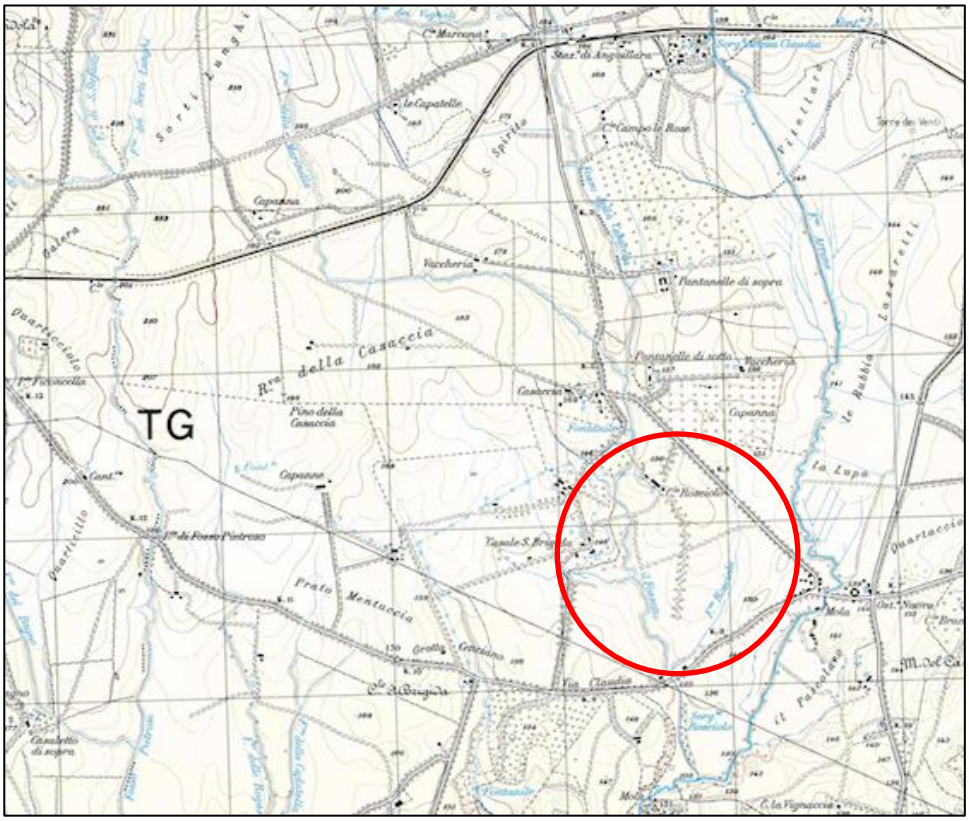


Figura 17. Stralcio della Carta topografica IGM 1:25:000, Foglio 143 "S. Maria di Galeria" (in rosso si evidenzia il corso dei fossi Rosciolo e Fossetto)

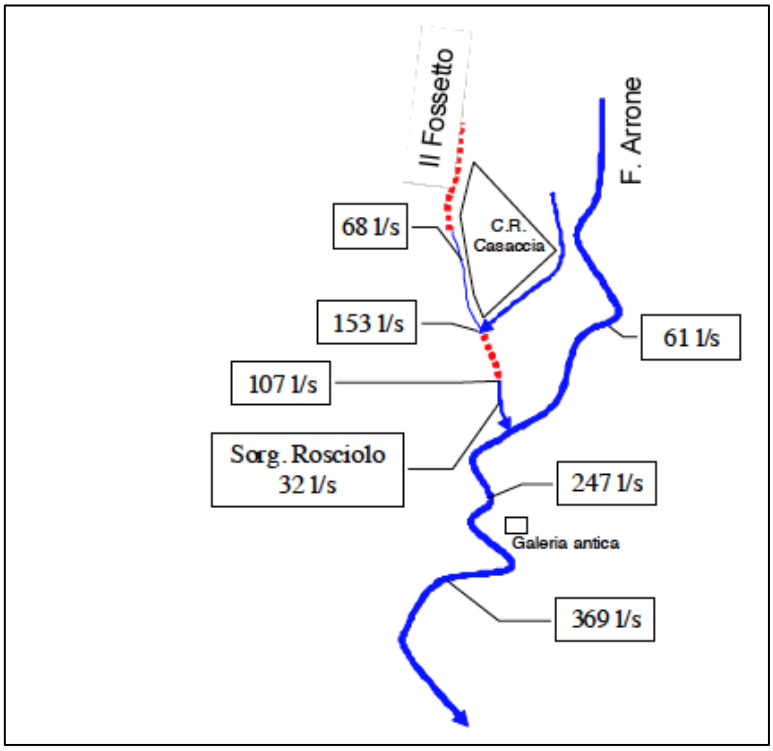


Figura 18. Schema idrologico delle misure di portata in alveo [14]. In blu i tratti drenanti, in rosso quelli che subiscono una riduzione della portata

Tabella 3. Portate del F. Arrone nel 1967 [15]

Località	*Portata (l/s)*
Incile del Lago	0
Mola Vecchia	1010
Ponte Valle Trave	906
Osteria Nuova	993
Incastri	1266

3.3 Circolazione idrica sotterranea del C.R. Casaccia

Come già accennato in precedenza, il materiale sedimentario (sedimenti marino-costieri) rappresenta il basamento di un grande sistema acquifero a carattere regionale, utilizzato per l'approvvigionamento idrico sia potabile che agricolo-industriale. L'acquifero basale a carattere regionale, di spessore dell'ordine dei 100-150 m, è contenuto nelle formazioni vulcaniche.

Esistono inoltre circolazioni superficiali di tipo locale, dovute a contrasti di permeabilità verticale, alimentate dalle precipitazioni di origine atmosferica, e possono avere carattere temporaneo o perenne in relazione alla capacità di immagazzinamento dei terreni interessati. Si tratta di falde acquifere di modesta capacità, ma che localmente possono dare un notevole contributo.

Le ultime fasi dell'attività vulcanica hanno dato luogo ad estese mineralizzazioni dei prodotti vulcanici da parte di fluidi idrotermali originatisi in profondità. Ciò ha comportato un aumento di temperatura nell'area pericalderica del Lago di Bracciano, tant'è che sono stati stimati a 1 km di profondità valori di temperatura tra i 100 e i 200 °C [1]. In particolare, il C.R. ENEA-Casaccia rientra nella isoterma di 200 °C (Figura 19).

Gli elementi guida per la schematizzazione della circolazione idrica profonda sono costituiti da:

- la presenza dell'orlo della caldera poco a NO dal Centro, dove la piezometrica raggiunge i 170 m s.l.m.;
- il livello del lago di Bracciano a 163 m s.l.m.;
- l'incisione del F. Arrone, emissario del Lago di Bracciano, che da quota 130 m arriva a 100 m alla confluenza con il fosso Fossetto a sud.

Questi elementi determinano, in corrispondenza del Centro, un livello della falda da 135 a 115 m s.l.m. e profondità da qualche metro a circa 30 m in relazione alla topografia del sito. Dalla consultazione dei dati di bibliografia e dai livelli statici misurati durante la campagna di indagine condotta nell'anno 2007-2008 è stato definito l'andamento delle piezometriche che interessano l'area del Centro (Figura 20). La direzione del flusso è principalmente NO-SE, nella parte settentrionale del Centro, e N-S nella zona più a valle.

Negli anni '60-'70 il livello statico della falda di base nell'area del C.R. ENEA-Casaccia era tra 127 e 134 m s.l.m. Negli anni 2007-2008, dal monitoraggio della rete dei piezometri ubicati nel Centro, si sono misurati livelli statici compresi tra 117 e 130 m s.l.m.

Nel settembre 2019 sono state effettuate misure del livello statico, con un freatimetro, nei piezometri PZ03s, PZ02p, PZ01p e PZCR2 (Tabella 4). Tali valori sono stati utilizzati al fine di valutare, tramite interpolazione lineare, il livello di falda presumibile nell'area di interesse per le perforazioni (Tabella 5). Tali valori sono perfettamente in linea con quanto riscontrato negli anni 2007-2008, attenendosi a valori del livello statico compresi tra 117 e 123 m s.l.m. (119,5 circa).

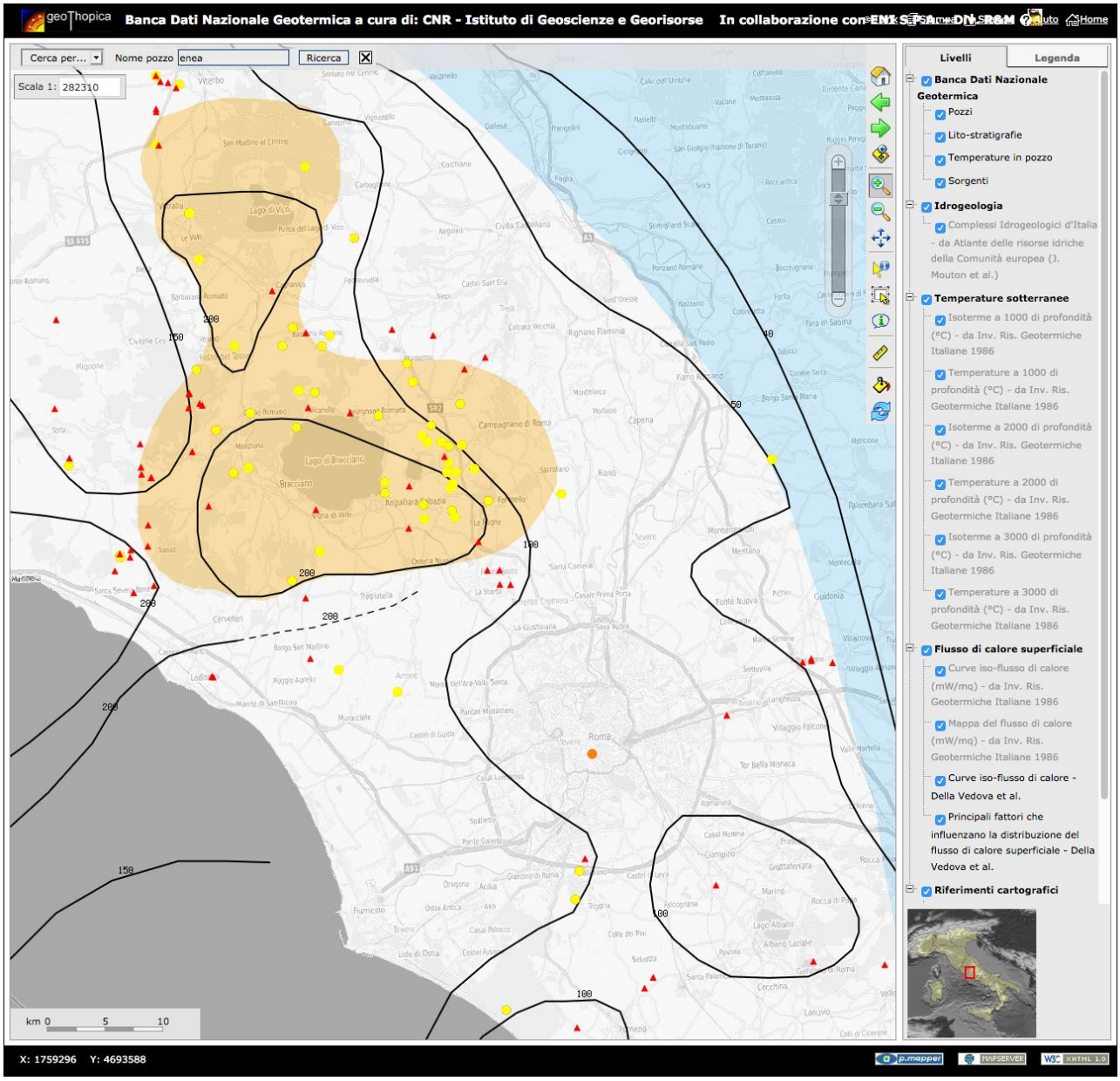


Figura 19. Andamento delle isoterme a 1000 m di profondità dal piano campagna

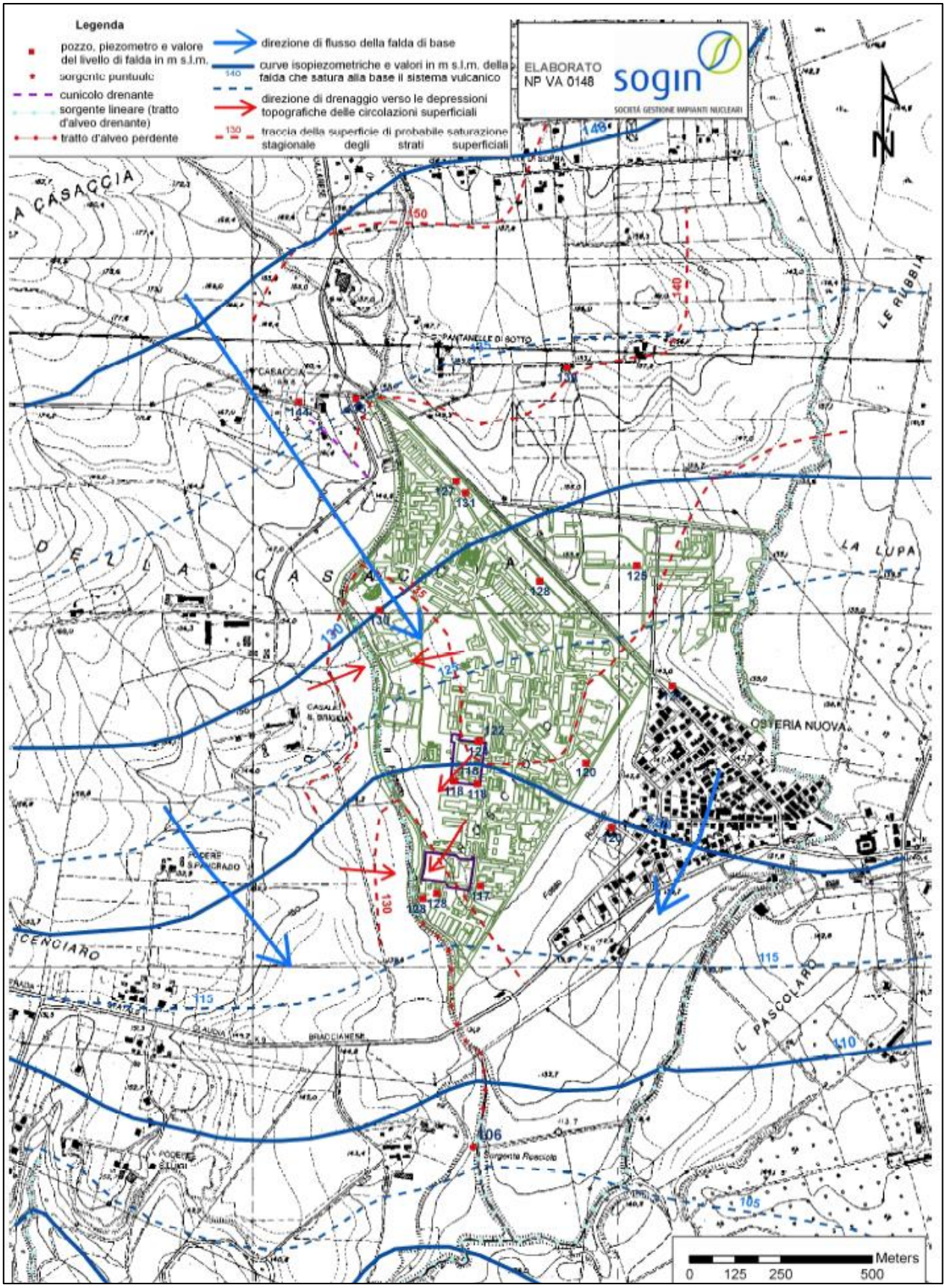


Figura 20. Andamento della piezometrica nel C.R. ENEA-Casaccia realizzata sulla base delle misure piezometriche effettuate nel periodo di indagine 2007-2008 (in blu la piezometrica della falda di base, in rosso la circolazione idrica superficiale presunta) [2].

Tabella 4. Valori misurati del livello statico nei piezometri (Settembre 2019)

	PZ03s	PZ02p	PZ01p	PZCR2
	142,45 m s.l.m.	143,8 m s.l.m.	145,67 m s.l.m.	140,26 m s.l.m.
Misura del livello statico nei piezometri dal p.c. 10/09/2019	24,51 m	25,77 m	21,81 m	20,23 m

Tabella 5. Valore presunto del livello della piezometrica nell'area di interesse

	POZZO 1	POZZO 2	POZZO 3	POZZO 4
	147,9 m s.l.m.	147,7 m s.l.m.	147,5 m s.l.m.	147,3 m s.l.m.
livello piezometrica presunta dal p.c.	-28,7 m	-28,4 m	-28,3 m	-27,9 m

4 Dimensionamento di massima di un impianto geotermico integrato con PdC

4.1 Introduzione

Per pompa di calore geotermica o GSHP (*Ground Source Heath Pump*) si intende una pompa di calore che utilizza la sorgente terreno per:
- la climatizzazione estiva ed invernale degli edifici;
- la produzione di acqua calda sanitaria (ACS);
- la produzione di caldo e/o freddo nei cicli di processo industriale ed alimentare.

In seguito alla crisi petrolifera dell'OPEC negli anni '70, l'opinione pubblica iniziò a concentrarsi su fonti energetiche alternative. Da lì la Svezia, la Svizzera, l'Austria e la Germania si interessarono a questa tecnologia. Inizialmente si diffusero i sistemi a circuito aperto, ovvero sfruttare il calore proveniente da acqua di falda o da corsi d'acqua superficiale quali i fiumi, o anche dai mari e dai laghi.
I sistemi a circuito chiuso, invece, trovarono le prime applicazioni in Germania e Svizzera negli anni '80.
Oggi, il settore termico riveste un ruolo importante nel raggiungimento degli obiettivi prefissati dall'UE; bisogna prevedere un cambiamento tecnologico deciso, che indirizzi la società verso soluzioni che favoriscano la penetrazione delle fonti rinnovabili a discapito delle fonti energetiche convenzionali.
La potenza totale installata riferita all'uso diretto del calore dal terreno in Italia è pari a 1372 TJ/a, mostrando un incremento nel quinquennio di riferimento (2010-2015) di 357 TJ/a; questo incremento è strettamente connesso all'utilizzo delle PdC (+274) per la climatizzazione degli ambienti e per la produzione di acqua calda sanitaria (ACS) ad uso civile. In tutto il mondo, l'uso diretto del calore, al 2016, è pari a 43.704 TJ (Figura 21) [16]. Tale metodo di approvvigionamento energetico è largamente utilizzato in alcuni Paesi, quali l'intero Canada, gran parte dell'America Latina, l'Algeria, il Sud Africa, l'intera India, il Pakistan, la Mongolia, la Spagna, e in gran parte dell'Europa (Figura 22).
In termini assoluti, nel Piano Nazionale Energia e Clima (PNIEC) [17] si prevede che i consumi da rinnovabili supereranno i 14,7 Mtep nel settore del riscaldamento e raffrescamento, legati principalmente all'incremento dell'energia rinnovabile fornita dalle PdC. In particolare, la tecnologia a PdC è fra quelle che garantiscono più prestazioni e maggiori prospettive di sviluppo. Secondo il Gruppo Pompe di Calore Assoclima, si potrà arrivare a un «incremento di energia pulita prodotta dalle pompe di calore da 3,5 a 6 MTep al 2030» (Figura 23). Come si vede dal grafico (fonte: Gestore Servizi Energetici (GSE) e Ricerca Sistema Energetico (RSE)), la tecnologia dimostra, rispetto ad altri sistemi, una traiettoria di crescita migliore. L'incremento dell'utilizzo delle PdC è giustificato dall'ampio potenziale di riduzione delle emissioni di CO_2 e

dai bassi costi di gestione. Come è noto, il PNEIC è uno strumento fondamentale che segna l'inizio di un importante cambiamento nella politica energetica del nostro Paese verso la decarbonizzazione del settore energetico. L'obiettivo è di realizzare una nuova politica energetica che assicuri la piena sostenibilità ambientale, sociale ed economica del territorio nazionale accompagnando tale transizione.

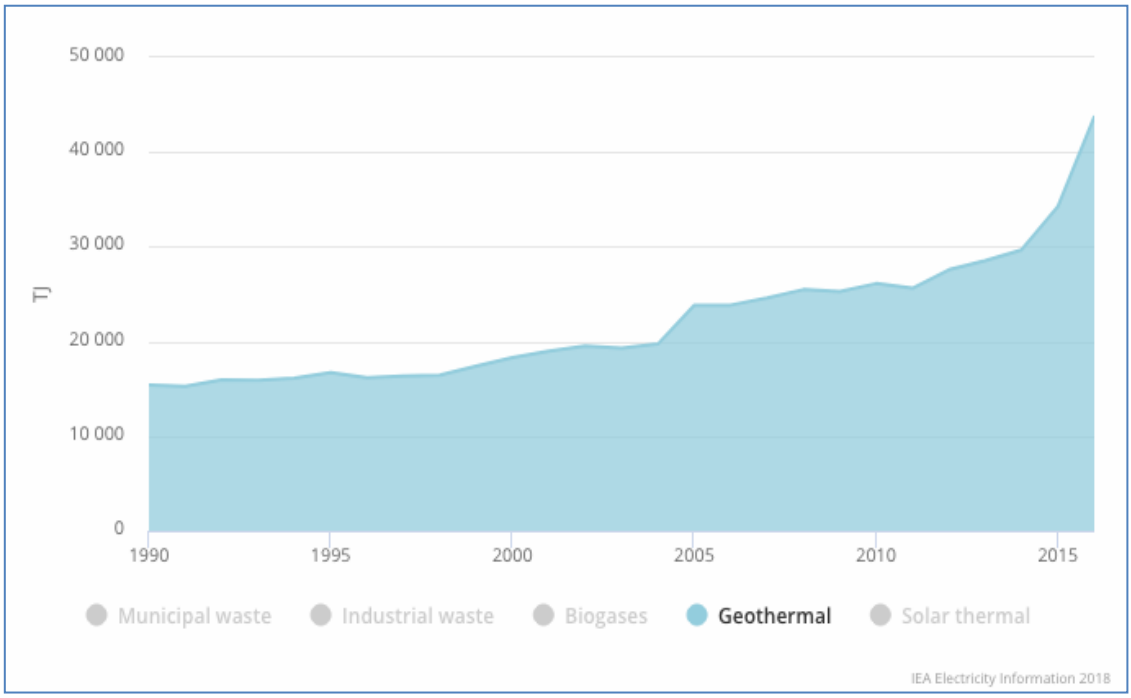


Figura 21. Uso diretto del calore nel mondo [16].

Figura 22. Ubicazione delle zone che producono "elettricità e uso diretto del calore", o solo "uso diretto del calore", o solo "produzione di elettricità" [16].

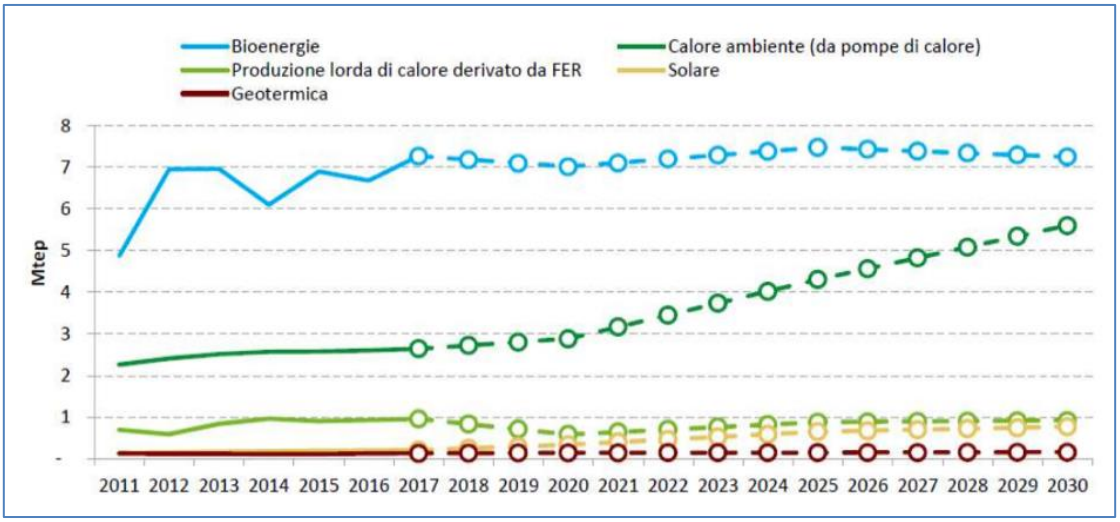


Figura 23. Traiettorie di crescita dell'energia da fonti rinnovabili al 2030 [18].

4.2 Principi di dimensionamento

Dimensionare un campo geosonde è un'operazione complessa, in quanto condizionerà il funzionamento dell'impianto per tutta la vita (circa 100 anni). Un sottodimensionamento dello scambiatore può produrre un abbassamento della resa della macchina, con un progressivo depauperamento termico del sottosuolo; un sovradimensionamento comporta un maggior dispendio economico, poiché la PdC consuma più energia elettrica. In particolare, il dimensionamento delle sonde geotermiche verticali è funzione di una serie di parametri, non tutti sempre facili da determinare a priori.

I fattori necessari per il dimensionamento possono essere divisi in due gruppi, quelli relativi al [19]:

- sottosuolo;
- impianto.

I parametri legati al <u>sottosuolo</u> sono:

- litologie presenti;
- conducibilità termica;
- capacità termica;
- diffusività;
- eventuale presenza di falde acquifere;
- materiale di cementazione del perforo;
- fluido termovettore;
- temperatura del terreno indisturbato.

I parametri legati all'<u>impianto</u> sono:

- temperature di lavoro all'evaporatore/condensatore della PdC;
- fabbisogno termico dell'edificio;
- potenze di picco in condizioni di progetto;
- ore di funzionamento degli impianti;
- giorni di funzionamento in regime invernale/estivo;
- potenza termica/elettrica effettiva della PdC;
- coefficiente di prestazione della PdC (COP).

Un altro parametro da considerare è la scelta della geometria della sonda e la configurazione.

Per impianti al di sotto dei 30 kW è possibile risalire al valore della potenza specifica di estrazione (W/m), al variare delle caratteristiche del terreno, tramite la tabella riportata nella normativa tedesca di riferimento VDI 4640 (Tabella 6) [20].

Questo parametro dipende essenzialmente dalla tipologia del terreno, dalla conducibilità termica, dal grado di fratturazione, dal valore di permeabilità e dalla presenza o meno della falda freatica (Tabella 7).

Tabella 6. Conducibilità termica e resa termica di diversi terreni [20]

Roccia	Conducibilità termica media λ [W/Km]	Resa [W/m]
Linee guida generali		
Sottosuoli sterili, sedimenti secchi ($\lambda < 1,5\ WK^{-1}m^{-1}$)		20
Normali sottosuoli rocciosi ($\lambda = 1,5 \div 3,0\ WK^{-1}m^{-1}$)		**50**
Rocce consolidate altamente conduttive ($\lambda > 3,0\ WK^{-1}m^{-1}$)		70
Rocce eruttive		
Graniti	3,5	80 – 90
Granodioriti	2,5	60 – 70
Gabbri	1,8	40 – 50
Basalti	1,7	40 – 50
Porfidi	1,9	40 – 50
Ossidiane	1,3	30 – 40
Pomici	0,4	20 – 30
Rocce sedimentarie		
Calcari	2,8	60 – 70
Arenarie	2,2	50 – 60
Travertini	2,4	50 – 60
Gesso	2,5	50 – 60
Ghiaia asciutta	0,4	20 – 40
Ghiaia bagnata	1,6 (1)	40 – 50
Sabbia asciutta	0,5	30 – 50
Sabbia bagnata	2,3	50 – 60
Limi e argille asciutti	0,6	30 – 50
Limi e argille bagnate	1,8	40 – 50
Rocce metamorfiche		
Gneiss	2,9	60 – 70
Marmo	2,2	50 – 60
Ardesia	2,4	50 – 60
Altri materiali		
Bentonite	0,7	
Cemento	1,6	
Aria secca	0,026	
Polistirolo espanso	0,03	
Quarzo	8	
Ferro	60	
Rame	400	
Diamante	2.500	

(1) la conducibilità termica della ghiaia satura dipende fortemente dalle caratteristiche della falda

Tabella 7. Esempi di conduttività termica (tra parentesi i valori tipici) e calore specifico volumetrico del sottosuolo alla T di 20°C [20]

Roccia	densità ρ 10^3 kg m^{-3}	conduttività termica λ W m^{-1} K^{-1}	calore specifico volumetrico S_{VC} MJ m^{-3} K^{-1}
Rocce magmatiche			
basalto	$2,6 \div 3,2$	$1,3 \div 2,3$ (1,7)	$2,3 \div 2,6$
diorite	$2,9 \div 3,0$	$2,0 \div 2,9$ (2,6)	2,9
gabbro	$2,8 \div 3,1$	$1,7 \div 2,5$ (1,9)	2,6
granito	$2,4 \div 3,0$	$2,1 \div 4,1$ (3,4)	$2,1 \div 3,0$
peridotite	3,0	$3,8 \div 5,3$ (4,0)	2,7
riolite	$\simeq 2,6$	$3,1 \div 3,4$ (3,3)	2,1
Rocce metamorfiche			
gneiss	$2,4 \div 2,7$	$1,9 \div 4,0$ (2,9)	$1,8 \div 2,4$
marmo	$2,5 \div 2,8$	$1,3 \div 3,1$ (2,1)	2,0
metaquarzite	$\simeq 2,7$	$\simeq 5,8$ (5,8)	2,1
micascisto	$\simeq 2,6$	$1,5 \div 3,1$ (2,0)	2,2
argilloscisto	2,7	$1,5 \div 2,6$ (2,1)	$2,2 \div 2,5$
Rocce sedimentarie			
calcare	$2,6 \div 2,7$	$2,5 \div 4,0$ (2,8)	$2,1 \div 2,4$
marna	$2,5 \div 2,6$	$1,5 \div 3,5$ (2,1)	$2,2 \div 2,3$
quarzite	$\simeq 2,7$	$3,6 \div 6,6$ (6,0)	$2,1 \div 2,2$
alite	$2,1 \div 2,2$	$5,3 \div 6,4$ (5,4)	1,2
arenaria	$2,2 \div 2,7$	$1,3 \div 5,1$ (2,3)	$1,6 \div 2,8$
antracite	–	$0,3 \div 0,6$ (0,3)	$1,3 \div 1,8$
siltite	$2,5 \div 2,6$	$1,1 \div 3,5$ (2,2)	$2,1 \div 2,4$
Terreni non consolidati			
ghiaia (asciutta)	$2,7 \div 2,8$	$0,4 \div 0,5$ (0,4)	$1,4 \div 1,6$
ghiaia (satura d'acqua)	$\simeq 2,7$	$\simeq 1,8$ (1,8)	$\simeq 2,4$
morena	–	$1,0 \div 2,5$ (2,0)	$1,5 \div 2,5$
sabbia (asciutta)	$2,6 \div 2,7$	$0,3 \div 0,8$ (0,4)	$1,3 \div 1,6$
sabbia (satura d'acqua)	$2,6 \div 2,7$	$1,7 \div 5,0$ (2,4)	$2,2 \div 2,9$
argilla (asciutta)	–	$0,4 \div 1,0$ (0,5)	$1,5 \div 1,6$
argilla (satura d'acqua)	–	$0,9 \div 2,3$ (1,7)	$1,6 \div 3,4$
torba	–	$0,2 \div 0,7$ (0,4)	$0,5 \div 3,8$
Altre sostanze			
bentonite	–	$0,5 \div 0,8$ (0,6)	$\simeq 3,9$
calcestruzzo	$\simeq 2,0$	$0,9 \div 2,0$ (1,6)	$\simeq 1,8$
ghiaccio (a −10°C)	0,919	2,32	1,87
plastica (PE)	–	0,39	–
aria (0 ÷20°C, secca)	0,0012	0,02	0,0012
acciaio	7,8	60	3,12
acqua (+10°C)	0.999	0,59	4,15

Per le grandi installazioni (> 30 kW) sono richiesti calcoli specifici usando metodi analitici e/o numerici [21]
Al crescere dei carichi ovviamente aumenterà la profondità e il numero dei fori. Le scelte impiantistiche dipendono dal tipo si scambiatore da porre nelle sonde, dalla miscela per cementare il foro, dal fluido termovettore, dalla disposizione delle sonde in sito e dal collegamento orizzontale alla PdC.
Per conoscere con certezza le proprietà termiche del sottosuolo e la resistenza termica della sonda geotermica è opportuno effettuare il *Ground Response Test* (GRT). La prova consiste nell'installazione di una

sonda geotermica nel terreno da indagare, che una volta collegata ad un impianto calibrato misurerà in continuo le temperature di ingresso e di uscita del fluido termovettore. Il test permette di ricavare informazioni sulla temperatura media indisturbata del terreno, sulle caratteristiche termofisiche del terreno e sulla stratigrafia del terreno stesso. Oltre a ciò, in fase di progettazione bisogna valutare anche la conducibilità del materiale di riempimento del foro, il cortocircuito termico, la resistenza termica associata al materiale che costituisce lo scambiatore, le caratteristiche del moto e le proprietà del fluido termovettore. Pertanto, definita la resa termica del pozzo nonché il calore estratto per metro lineare di sonda installata, si potranno definire con certezza i metri di sonda effettivamente da installare al fine di soddisfare la richiesta termica dell'utenza.
È importante ridurre al minimo la resistenza termica del foro (R_b). Ad esempio, considerando una sonda di lunghezza 100 m e resa termica 45 W/m, ovvero 4,5 kW; se la resistenza termica del pozzo è 0,14 m/KW, il calo della temperatura sarà di 6,3 °C (45*0,14) tra il rivestimento del foro e il fluido termovettore. Se R_b è 0,1 m/KW il calo sarà di 4,5 °C, permettendo così alla PdC di lavorare con un fluido di quasi 2 °C più caldo rispetto al primo caso. Diverse sono le strade a cui si ricorre per ottimizzare la resistenza termica, per esempio fornendo al fluido una velocità adeguata a produrre condizioni di moto turbolento, o assicurando una opportuna distanza tra il tubo di mandata e quello di ritorno all'interno del foro, al fine di limitare il fenomeno della cortocircuitazione termica.
A fronte di ciò, il numero delle sonde e la profondità di installazione dipendono essenzialmente dalla richiesta termica dell'utenza. Bisogna definire il carico di picco richiesto per il riscaldamento, ovvero la quantità di calore necessaria per soddisfare il fabbisogno termico giornaliero nella condizione più critica dell'anno; quest'ultimo dipenderà dall'ubicazione e dalla latitudine dell'utenza.
Nel caso del raffrescamento, naturalmente, la temperatura del terreno e del fluido vettore aumenta con il tempo, per via dello stoccaggio nel sottosuolo del calore prelevato dall'ambiente interno (lato - utenza). Bisogna che il sistema raggiunga un equilibrio, senza aumentare eccessivamente la temperatura nel terreno o nel fluido vettore. In ultima analisi valgono ancora le osservazioni poste dalla normativa di riferimento VDI, ovvero che la temperatura di ritorno del fluido termovettore in condizioni di carico base (media settimanale) non deve discostarsi più di 11 °C rispetto alla temperatura indisturbata del terreno e in condizioni di picco non deve superare i 17 °C. In molti sistemi il calore stoccato nel sottosuolo durante l'estate può essere estratto durante l'inverno. Pertanto, il calore non lo si considera come un rifiuto, ma come un bene che viene immagazzinato nel sottosuolo per poterlo estrarre nuovamente, magari in un inverno più rigido. Questa condizione costituisce una fonte di riscaldamento e di rafffrescamento geotermica sostenibile che utilizza i sistemi UTES (*Underground Thermal Energy Storage*).

4.3 PdC geotermica

Le pompe di calore sono macchine termiche che, compiendo lavoro, trasferiscono calore da un corpo a temperatura più bassa (terreno o acqua) ad uno a temperatura più alta (utenza). Il sottosuolo costituisce la sorgente termica per l'estrazione durante l'inverno e un serbatoio per il suo stoccaggio durante l'estate. Il dimensionamento di un sistema di scambio geotermico è un processo critico e complesso da cui dipende l'efficienza, la durabilità e la sostenibilità economica dell'intero sistema di climatizzazione.
L'intero impianto geotermico a bassa entalpia accoppiato a una PdC si presenta molto versatile, essendo applicabile in qualsiasi tipo di sottosuolo e in qualsiasi regione d'Italia.
La scelta dell'impianto più opportuno scaturisce da considerazioni preliminari, ovvero:
- aspetti geologici e idrogeologici del sottosuolo;
- superficie areale disponibile;
- sorgenti di potenziale calore nelle vicinanze;
- carichi termici estivi ed invernali.

Nella fase progettuale, dopo aver individuato la sorgente più adatta si passa al dimensionamento, stabilendo i parametri chiave più adatti alle dimensioni dell'impianto in modo tale da ottenere una prestazione ottimale al minimo costo (Figura 24).
In particolare si considera il fluido termovettore, ovvero quello che scorre all'interno delle sonde, che permette all'impianto di estrarre/cedere calore dal/al sottosuolo, la pompa di calore più idonea al

raggiungimento della temperatura interna richiesta e il sistema di distribuzione del calore all'interno dell'edificio.

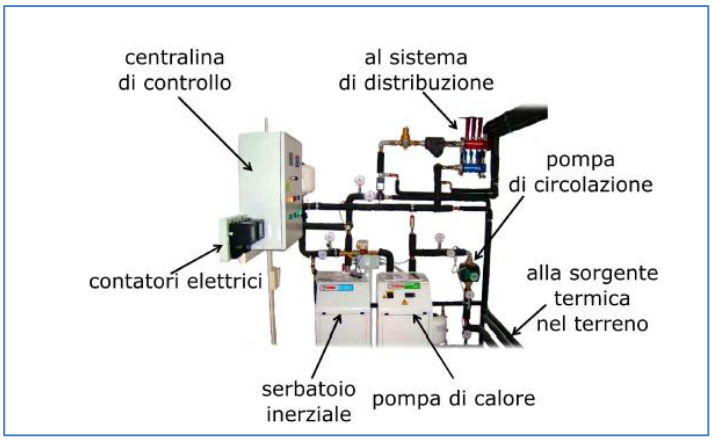


Figura 24. Vari dispositivi dell'impianto [22]

Usando acqua pura come fluido termovettore, l'evaporazione all'interno della PdC non avviene se il fluido in ingresso ha una temperatura al di sotto dei 5-6 °C. Quando si hanno temperature inferiori si ricorre all'anticongelante in quanto permette al liquido di evaporare anche a temperature più basse e assorbire sufficientemente calore dal terreno, facendo così fronte a tutti i carichi invernali richiesti. La pompa di calore è una macchina termodinamica a ciclo inverso che lavora tra 2 livelli termici, uno interfacciato con la sorgente fredda ed uno ad alta temperatura, il cosiddetto serbatoio caldo.
Rispetto agli impianti di riscaldamento convenzionali (PdC aria-aria), le PdC acqua-acqua offrono il vantaggio di sfruttare una risorsa termica (terreno o acqua) caratterizzata da una temperatura che rimane fissa e costante tutta la stagione; ciò determina un notevole risparmio in termini di consumi energetici.
Una PdC può essere così schematizzata (Figura 25):
Durante l'inverno, la PdC è costituita da due scambiatori di calore:
- l'evaporatore lato sorgente fredda (terreno);
- il condensatore, che cede calore all'ambiente da riscaldare;
- il compressore che porta il fluido dalla bassa alla alta pressione, comportando un consumo elettrico;
- la valvola di laminazione che permette di invertire il processo.

Durante l'estate, le componenti sono le stesse, ma si inverte il ciclo, in quanto il calore in eccesso nell'ambiente permette al fluido refrigerante di evaporare nell'evaporatore (lato - utenza) e tramite il condensatore (lato - terreno) di stoccarlo nel sottosuolo.

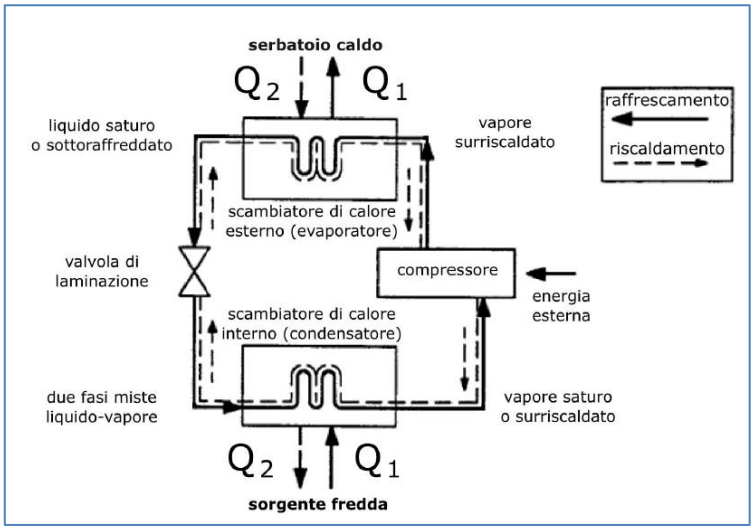


Figura 25. Schema di una PdC in regime invernale ed estivo

Il geotermico diventa conveniente quando il salto termico è il più contenuto possibile: si useranno quindi impianti di riscaldamento che funzionano con terminali a bassa temperatura (30°-40° C), rispetto a quelli tradizionali che richiedono invece temperature dell'ordine di 70 °C (radiatori). Le due possibili alternative sono o i sistemi diffusi (pannelli radianti), in cui la trasmissione del calore avviene per irraggiamento, o i sistemi concentrati (ventilconvettori), in cui la trasmissione del calore avviene per moto convettivo.

4.4 Impatto per i sistemi cloosed loop

I principali rischi di un sistema cloosed loop sono legati agli aspetti [23], [24], [25]:
- idrogeologici;
- termogeologici;
- chimici.

Per ciò che concerne gli aspetti idrogeologici, i principali rischi possono essere determinati o dalla perforazione di un sito contaminato, o la connessione di due falde indipendenti oppure la perforazione di una falda artesiana. Pertanto, durante la perforazione è opportuno installare un *casing* superficiale in acciaio almeno di pochi metri di lunghezza, ben cementato. La miscela deve avere una bassa permeabilità ed alta conducibilità termica e sigillante, al fine di fornire un ulteriore elemento di protezione contro l'eventuale trasporto di contaminanti.
L'interconnessione di più falde acquifere potrebbe comportare il cambiamento di chimismo delle stesse (es. acqua salina che fluisce in acqua dolce). Pertanto, risulta importante lo studio a monte sulla geologia e idrogeologia della zona prima di effettuare la perforazione. È necessario che il tetto dell'acquifero sia ben isolato ermeticamente dal *casing* temporaneo. Nel caso in cui si verifichi una perforazione della falda acquifera, la fuoriuscita di acqua incontrollata può ridurre significativamente le risorse idriche sotterranee, ciò può essere considerata un'estrazione illegale ai sensi della legislazione sulle risorse idriche.
Per quanto riguarda i rischi termogeologici, è ormai noto che quando si estrae calore da una sonda geotermica la temperatura della zona attorno diminuisce. È possibile che tra due sistemi *closed loop* vicini si verifichi il fenomeno di interferenza termica. Alcuni sistemi a sonde geotermiche possono operare a temperature sotto lo zero, creando così zone di terreno ghiacciato attorno alle sonde. Questo fattore aumenta la conducibilità termica del terreno ma può avere un impatto sulle strutture, sulla vegetazione, sulle comunità microbiologiche dei suoli, e sulle proprietà del suolo. In modalità di raffreddamento si dovrà considerare il rischio potenziale dovuto alla migrazione del vapore e all'essiccazione progressiva dei suoli.
In ultimo, il rischio chimico è dovuto all'eventuale utilizzo di sostanze chimiche potenzialmente inquinanti come fluido termovettore. Tale problema si verifica maggiormente nei sistemi ad espansione diretta, in quanto il fluido frigorigeno della PdC circola direttamente nel terreno. In genere, il fluido che si utilizza è una sostanza molto pericolosa a base di idrocarburi fluorurati. Per questo motivo oggi si preferisce l'utilizzo di fluidi non nocivi, come la CO_2. Nel caso di circuito chiuso si utilizzano anticongelanti a base di sali, glicoli o alcoli, del tutto innocui per l'ambiente perché biodegradabili.

5 Dimensionamento dell'impianto Casaccia

Tra le diverse configurazioni a circuito chiuso, per lo spazio a disposizione per lo scavo si è scelto di installare sonde geotermiche verticali (SGV) a diversa profondità. Come è noto, la temperatura al di sotto di una certa profondità ("zona neutra di omotermia", a circa 15-20 m dal piano campagna) rimane costante nel corso dell'anno alle nostre latitudini (Figura 26). Pertanto tramite l'installazione di scambiatori di calore verticali (SGV), lo scambio termico tra la sonda in polietilene e il terreno circostante avviene per fenomeni di trasmissione del calore per conduzione e convezione. Tali tubi vengono installati in fori trivellati e lo spazio restante anulare viene riempito con malta cementizia opportunatamente miscelata, al fine di assicurare con continuità gli scambi termici. Tutte le geosonde dovranno essere opportunatamente raccordate tramite trincee ed inviate al collettore, posto nelle immediate vicinanze della PdC. La configurazione scelta è tubi *double U* nei singoli pozzi, ovvero due tubi in polietilene da 32 mm di mandata e due tubi da 32 mm di ritorno (Figura 27).

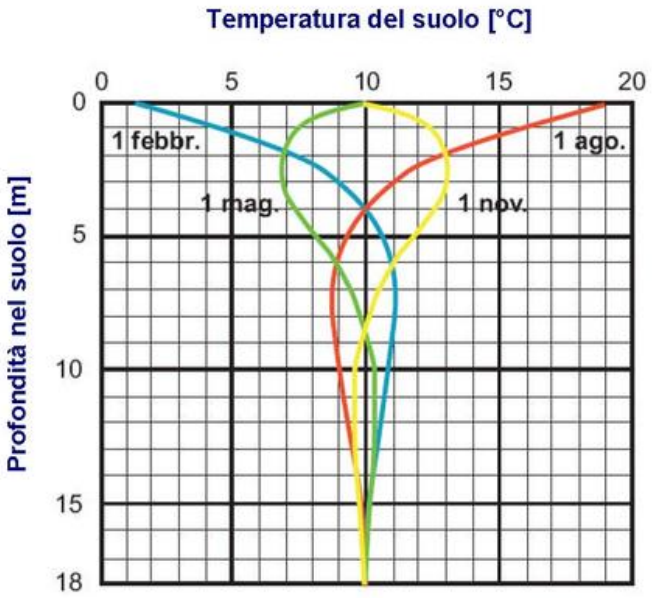


Figura 26. Andamento della temperatura del suolo in funzione della profondità [26]

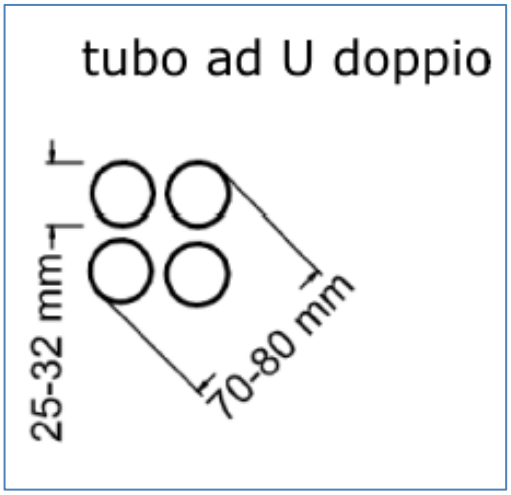


Figura 27. Tubo a *double U* in sezione [27]

Come già ampiamente descritto, sulla base delle evidenze geologico-stratigrafiche si è pensato di realizzare quattro pozzi a diversa profondità: 35 m, 50 m, 80 m e 100 m. Questa scelta è motivata anche perché nel terzo anno di attività i pozzi, monitorati costantemente tramite l'installazione di fibre ottiche, potranno fornire le variazioni di temperatura tra la stagione estiva ed invernale nell'ottica dello stoccaggio del calore durante l'estate. In particolare, si osserverà se lo *storage* del calore durante l'estate influirà, e in che misura, sull'apporto di calore fornito durante la stagione invernale.
Le formazioni che caratterizzano l'area di studio sono principalmente di origine vulcanica. Pertanto può essere assunto un valore di conducibilità termica media pari a 1,7 W/mK a cui corrisponde una resa termica del pozzo pari a circa 50 W per metro lineare di sonda installata. È chiaro che tali valori attribuiti potranno essere determinati con certezza solo dopo l'effettuazione del GRT. Dopo le evidenze e i risultati di tali prove sarà decisa la destinazione di tale calore, se dovrà asservire un'utenza oppure dovrà essere inviato direttamente in un serbatoio di accumulo, sistema ausiliario che interverrà nei periodi di richiesta da parte della PdC durante particolari condizioni stagionali.
Secondo questa premessa, si è proceduti a titolo di esempio simulando di dimensionare l'impianto per climatizzare una superficie di 140 m^2, ubicata al secondo piano dell'edificio F40 del Centro Casaccia. Il passo successivo è stato di determinare i fabbisogni termici richiesti dall'utenza per il riscaldamento ed il

raffrescamento. In particolare, l'area ricade nel comune di Roma, che rientra nella Zona Climatica D, caratterizzata da un valore di 1415 Gradi Giorno (GG). Per GG si intende la somma, estesa a tutti i giorni del periodo di riscaldamento convenzionale, delle sole differenze di temperature positive, fra la temperatura interna di progetto e quella esterna media giornaliera; quanto più alto è il valore dei GG tanto più il clima è rigido.
Il periodo dell'anno nel quale è consentito tenere in funzione gli impianti di riscaldamento e il numero massimo giornaliero di ore di accensione dipendono dal clima della località dove è ubicato l'edificio. Gli impianti termici destinati alla climatizzazione invernale degli ambienti devono essere condotti in modo che, durante il loro funzionamento, non vengano superati i valori massimi di temperatura fissati.
L'esercizio degli impianti termici è consentito con i seguenti limiti massimi relativi al periodo annuale di esercizio dell'impianto termico e alla durata giornaliera di attivazione. Per la Zona Climatica D l'esercizio degli impianti, in ambito residenziale, è di dodici ore giornaliere, per un periodo che va dal 1° novembre al 15 aprile. Al di fuori di tali periodi gli impianti termici possono essere attivati solo in presenza di situazioni climatiche che ne giustifichino l'esercizio e comunque con una durata giornaliera non superiore alla metà di quella consentita a pieno regime. È consentito il frazionamento dell'orario giornaliero di riscaldamento in due o più sezioni. La durata di attivazione degli impianti dovrà essere comunque compresa tra le ore 5 e le ore 23 di ciascun giorno. Nel caso specifico, considerando che l'utenza è un ufficio, nel periodo suddetto i giorni lavorativi sono 113. Il periodo di funzionamento considerato è di dieci ore, pertanto le ore di riscaldamento considerate all'anno saranno 1130. Il valore limite per il fabbisogno annuo di energia primaria nel periodo invernale per m^2 di superficie utile dell'edificio dipende dal fattore di forma (rapporto tra la superficie e il volume dell'ambiente (S/V)) e dalla zona climatica in cui ricade. Nel caso specifico, dalla consultazione dell'Allegato C del D.Lgs. 29/12/2006 n.311 riguardante le disposizioni correttive e integrative al D.Lgs. 19/8/2005 n. 192, recante attuazione della Direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia, considerando una superficie di 140 m^2 e un'altezza del soffitto pari a 2,7 m, per un volume pari a 378 m^3, , si evince che il valore limite per la climatizzazione invernale è pari 68 kWh/m^2 all'anno (Tabella 8).

Tabella 8. Valori limite per la climatizzazione invernale in kWh/m^2 a

TABELLA 1.3	EP$_i$ limite dal 1 gennaio 2010 Valori limite per la climatizzazione invernale espressi in kWh/m² anno									
S/V	Zona climatica									
	A	B		C		D		E		F
	<600 GG	601 GG	900 GG	901 GG	1400 GG	1401 GG	2100 GG	2101 GG	3000 GG	>3000 GG
≤0.2	8.5	8.5	12.8	12.8	21.3	21.3	34	34	46.8	46.8
≥0.9	36	36	48	48	68	68	88	88	116	116

Nei 113 giorni lavorativi (periodo della stagione invernale considerato) l'energia media da consumare al giorno per m^2 è:

$$\mathrm{Ed} = \frac{E}{D} = \frac{68\ kWh/m^2a}{113} = 0{,}60\ kWh/m^2$$

La quantità di energia termica annuale è definita come segue:

$$\mathrm{Et\ annuale} = \mathrm{S} * \mathrm{E} = 140\ m^2 * 68\frac{kWh}{m^2a} = 9520\ kWh/a$$

La potenza media può essere così definita:

$$Qm = Ed * \frac{S}{ore\ di\ funzionamento} = 0{,}60 * \frac{140}{10\ ore} = 8{,}4\ \text{kW}$$

La differenza di temperatura media, può essere così determinata:

$$\Delta tm = \frac{1415\ GG}{113\ giorni\ di\ riscaldamento} = 12{,}5\ °C$$

A questo punto, è possibile determinare la potenza nominale o di picco richiesta dall'utenza nella condizione più critica, come segue:

$$Pt\ nominale/picco = \frac{Et\ annuale\ (ti - tp)}{GG * ore\ funzionamento} = \frac{9520\frac{kWh}{a}(20\ °C - 0°C)}{1415 * 10\ ore} = 13{,}45\ KWt$$

dove t_i è la temperatura interna e $t_{progetto}$ è la temperatura di progetto. Per la città di Roma, la $t_{progetto}$, ovvero in condizioni critiche, sarà uguale a 0 (zona climatica D e GG 1415).
Inoltre è stata calcolata la potenza per le medie mensili e la potenza di picco per le medie mensili (Tabella 9). Le temperature medie mensili per la città di Roma sono riportate nella Tabella 10, conformi alla norma UNI 10349- 2016 riguardante i dati climatici per la climatizzazione degli edifici.

Tabella 9. Potenza per le medie mensili e potenza di picco mensile (kW) in inverno

Fabbisogno totale mensile inverno	T_m (°C)	Potenza per le medie mensili (kW)	Potenza di picco mensile (kW)
Novembre	12,6	4,98	0,007036
Dicembre	8,9	7,46	0,010555
Gennaio	7,6	8,34	0,011791
Febbraio	8,7	7,60	0,010745
Marzo	11,4	5,78	0,008178
Aprile (fino al 15)	11,7	5,58	0,007892

Tabella 10. Valori medi mensili della temperatura media giornaliera dell'aria esterna (UNI 10349)

(seguito del prospetto VI)

N°	Sigla Provincia	Località	Altitudine m	GEN. °C	FEB. °C	MAR. °C	APR. °C	MAG. °C	GIU. °C	LUG. °C	AGO. °C	SET. °C	OTT. °C	NOV. °C	DIC. °C
75	RI	Rieti	405	3,7	4,9	8,1	11,6	15,2	18,8	21,8	21,7	18,9	13,5	8,7	5,1
76	RM	Roma	20	7,6	8,7	11,4	14,7	18,5	22,9	25,7	25,3	22,4	17,4	12,6	8,9
77	RN	Rimini	5	3,1	4,9	8,5	12,4	16,5	20,8	23,4	22,7	19,9	15,0	9,6	5,3
78	RO	Rovigo	7	1,3	3,6	8,5	13,4	17,6	22,0	24,5	23,8	20,1	14,0	8,1	3,1
79	SA	Salerno	4	10,4	11,3	13,5	16,5	20,1	23,9	26,5	26,6	24,1	19,9	15,7	12,2
80	SI	Siena	322	4,8	5,7	9,1	12,4	16,3	21,0	24,0	23,7	20,2	14,6	9,8	6,0
81	SO	Sondrio	307	0,5	3,3	8,2	12,6	16,0	20,0	22,3	21,4	18,1	12,4	6,6	1,7
82	SP	La Spezia	3	6,7	7,3	10,1	13,4	16,7	20,9	23,8	23,7	21,2	16,4	11,9	8,3
83	SR	Siracusa	17	11,3	11,5	13,1	15,4	18,7	23,0	26,2	26,4	23,9	20,1	16,4	12,9
84	SS	Sassari	225	8,7	9,1	11,3	14,0	16,8	21,4	24,0	24,5	22,1	17,5	13,5	9,9
85	SV	Savona	4	6,6	8,5	11,4	14,6	18,1	22,2	24,9	24,6	21,9	16,9	11,9	8,2
86	TA	Taranto	15	9,2	9,7	11,3	14,5	18,5	23,0	25,9	25,8	23,0	18,7	14,4	10,9
87	TE	Teramo	265	5,1	5,9	9,0	12,8	16,8	21,4	24,0	23,6	20,4	15,1	10,4	6,6
88	TN	Trento	194	4,3	7,3	11,8	16,5	20,0	24,0	26,3	25,5	22,3	16,4	10,2	5,7
89	TO	Torino	239	0,4	3,2	8,2	12,7	16,7	21,1	23,3	22,6	18,8	12,6	6,8	2,0
90	TP	Trapani	3	11,0	11,5	13,2	15,8	19,2	23,3	25,8	26,2	24,0	19,9	15,8	12,4
91	TR	Terni	130	6,7	7,6	10,7	13,6	17,6	22,3	24,7	24,3	21,1	16,4	11,3	6,6
92	TS	Trieste	2	4,9	6,2	9,4	13,5	17,7	21,9	24,2	24,0	20,7	15,5	10,6	6,9
93	TV	Treviso	15	2,8	4,4	8,4	13,2	17,1	21,6	23,8	23,2	19,8	14,0	8,2	4,3
94	UD	Udine	113	3,5	5,0	8,6	13,3	17,3	21,1	23,3	23,1	19,8	14,2	8,7	4,8
95	VA	Varese	382	1,2	1,9	6,0	10,4	14,0	17,7	20,5	19,6	16,4	11,2	5,3	1,9
96	VB	Verbania	197	2,9	4,6	8,5	12,6	16,6	20,8	23,3	22,6	19,3	13,5	8,1	4,2
97	VC	Vercelli	130	0,2	2,9	7,7	12,5	17,2	21,7	23,8	22,8	18,7	12,7	6,5	1,8
98	VE	Venezia	1	3,3	4,8	8,6	13,2	17,3	21,3	23,6	23,4	20,4	14,9	9,5	5,0
99	VI	Vicenza	39	2,4	4,2	8,5	12,9	17,0	21,3	23,6	23,0	19,6	13,9	8,5	4,1
100	VR	Verona	59	2,4	4,9	9,3	13,7	17,4	21,7	23,8	23,6	20,2	14,7	8,5	4,3
101	VT	Viterbo	326	5,7	6,6	9,4	12,7	16,9	21,8	24,8	24,0	20,7	15,9	11,3	7,5

A questo punto, definiti i carichi termici annuali e di picco per le medie mensili richieste dall'utenza, è necessario procedere al dimensionamento delle sonde verticali. È stato utilizzato il software *"GeoHeatCal"* [8], sviluppato per il dimensionamento di sistemi di sonde geotermiche verticali abbinati a PdC, per il riscaldamento e il raffrescamento di utenze. Lo scopo sarà di determinare la lunghezza complessiva delle sonde da installare nel terreno al fine di soddisfare il fabbisogno termico e frigorifero così calcolato in precedenza. Il programma esegue il dimensionamento sulla base del metodo *"ASHRAE"*, ovvero a sorgente cilindrica, sviluppato da [28]; il quale è stato modificato con l'inserimento di un algoritmo basato sul metodo quasi-tridimensionale di [29]. Nelle equazioni si tiene conto di diversi parametri, quali: la geometria e la disposizione dello scambiatore e dei parametri costruttivi dello stesso. I parametri progettuali considerati sono:

- temperature del terreno indisturbato e del fluido in ingresso alla PdC sul lato sorgente;
- portata e proprietà del fluido (tipo, densità, viscosità, regime di flusso, conducibilità e diffusività termica);
- proprietà del suolo (conducibilità e diffusività);
- proprietà dei tubi scambiatori (numero per pozzo, diametro, disposizione, caratteristiche termiche del grout);
- caratteristiche del campo sonde (numero, distanza, disposizione, tipo di circuitazione);
- carichi termici e frigorigeni dei giorni di progetto e ore annue equivalenti a pieno carico.

Vengono definite le equazioni che permettono di calcolare rispettivamente la lunghezza complessiva delle sonde relativa al riscaldamento L_c e al raffrescamento L_f :

$$Lc = \frac{q_a\, R_a + \left(q_{pc} - W_c\right) * \left(R_p + FCP_{mc} * R_m + R_g * F_{sc}\right)}{T_s - \dfrac{T_{fin} + T_{fout}}{2} - T_p}$$

$$Lf = \frac{q_a\, R_a + \left(q_{pf} - W_f\right) * \left(R_p + FCP_{mf} * R_m + R_g * F_{sc}\right)}{T_s - \dfrac{T_{fin} + T_{fout}}{2} - T_p}$$

dove:

q_a = flusso termico medio annuale (W) scambiato dalle sonde con il terreno;
q_{pc} e q_{pf} = carichi di progetto (W) necessari rispettivamente per riscaldare e raffrescare;
FCP_{mc} e FCP_{mf} = fattore di carico parziale mensile durante il mese di progetto in riscaldamento ed in raffrescamento;
W_c e W_f = potenze elettriche (W) assorbite dal compressore della PdC /refrigeratore in condizione di carico di progetto;
T_s = temperatura del sottosuolo indisturbato;
T_p = temperatura di penalizzazione determinata dal disturbo termico reciproco di scambiatori presenti nel campo sonde;
T_{fin} e T_{fout} = temperature del fluido rispettivamente in ingresso e in uscita alla PdC dal lato sonde;
R_a = resistenza termica del terreno dovuta ad un impulso termico annuale;
R_m = resistenza termica del terreno dovuta ad un impulso termico mensile;
R_g = resistenza termica del terreno dovuta ad un impulso termico giornaliero;
R_p = resistenza termica del pozzo dovuta ad un impulso termico annuale;
F_{sc} = fattore di cortocircuito (-) dovuto all'interferenza termica tra lo stelo in andata e in ritorno.

Nelle due equazioni, si considera il processo di trasferimento del calore attraverso il terreno e il pozzo nella parte esterna e nella porzione interna del pozzo stesso, che comprende il materiale di riempimento, le sonde verticali e il fluido termovettore. Per questo motivo si considerano due tipi di resistenze termiche, una associata al terreno e l'altra al pozzo. Il carico termico medio annuale assorbito o ceduto dal terreno si calcola:

$$qa = \frac{q_{pc} * Cc * OEC_c + q_{pf} * Cf * OEC_f}{8760}$$

dove:
OEC_f e OEC_c = rappresentano le ore equivalenti del carico di picco per il riscaldamento e il raffrescamento;
8760 = ore in un anno.
Le ore equivalenti di picco rappresentano il numero delle ore di esercizio del sistema se questo fosse a carico massimo tutto l'anno. I valori di C_f e C_c corrispondono a:

$$Cf = \frac{EER + 1}{\mathrm{EER}} \qquad Cc = \frac{COP - 1}{\mathrm{COP}}$$

La resistenza termica del pozzo R_p viene determinata utilizzando il modello analitico quasi-tridimensionale di [29]. Tale metodo è in grado di stimare l'effetto del cortocircuito termico tra le sonde. Un altro parametro sensibile preso in considerazione nel metodo *ASHRAE* è la temperatura del fluido in ingresso e in uscita alla PdC. Tali valori dipendono dalla temperatura indisturbata del terreno e dalle caratteristiche della PdC. Gli scambiatori vanno dimensionati in modo da garantire il funzionamento ottimale della macchina. In modalità riscaldamento, per evitare l'utilizzo di soluzioni anticongelanti nelle sonde è necessario che la temperatura in ingresso alla PdC sia di almeno 3-4 °C, per scongiurare il rischio congelamento. La temperatura del terreno varia per effetto dell'estrazione/immissione dell'energia nel terreno. Se il calore estratto dal terreno in inverno viene compensato dal calore immesso durante l'estate, la temperatura media attorno allo scambiatore di calore cambierà poco e quindi l'efficienza delle sonde geotermiche non decadrà durante gli anni di funzionamento dell'impianto. Un fattore che incide sulla penalizzazione della temperatura T_p, presente nelle equazioni sopra scritte, nei pressi delle sonde è rappresentato dalla distanza tra le sonde stesse; per questo motivo, è stata definita una distanza accettabile tra le sonde almeno di 7-8 m.

5.1 Simulazione GeoHeatCal

Il modulo relativo alle sonde geotermiche verticali permette di considerare vari aspetti progettuali, quali:
- tipologia dello scambiatore (singola, *double U*),
- diametro dei tubi e del pozzo;
- conducibilità termica del terreno e del materiale di riempimento;
- tipo di tubi;
- tipo di fluido termovettore;
- caratteristiche del campo sonde (distanziamento, disposizione geometrica dei pozzi);
- periodo di calcolo della variazione termica nel terreno.

Oltre al dimensionamento dell'impianto, il programma permette di calcolare analiticamente i parametri termofisici del fluido termovettore, la resistenza termica del pozzo e l'incremento/diminuzione della temperatura media attorno alle sonde stesse.
Inizialmente, nella sezione specifica, sono stati inseriti i carichi termici e frigoriferi, richiesti dall'utenza, in corrispondenza del giorno di progetto; ovvero il giorno più freddo in inverno e più caldo in estate (Figura 28). La fascia oraria considerata è dalle 8:00 alle 20:00 per cinque giorni settimanali. È stata riportata la durata equivalente del carico di picco espressa in ore per il periodo invernale (708 h) ed estivo (476 h) e rappresenta il numero delle ore di funzionamento che servirebbero per soddisfare il fabbisogno termico totale se la pompa di calore lavorasse a pieno carico. Il fattore di carico mensile viene calcolato automaticamente, per ogni mese, sia in riscaldamento che in raffrescamento. Rappresenta il rapporto tra il fabbisogno termico mensile reale e il fabbisogno che si avrebbe se l'intero sistema lavorasse sempre a pieno carico. Viene inoltre individuato il fattore di carico mensile del mese più critico sia in riscaldamento che in raffrescamento.

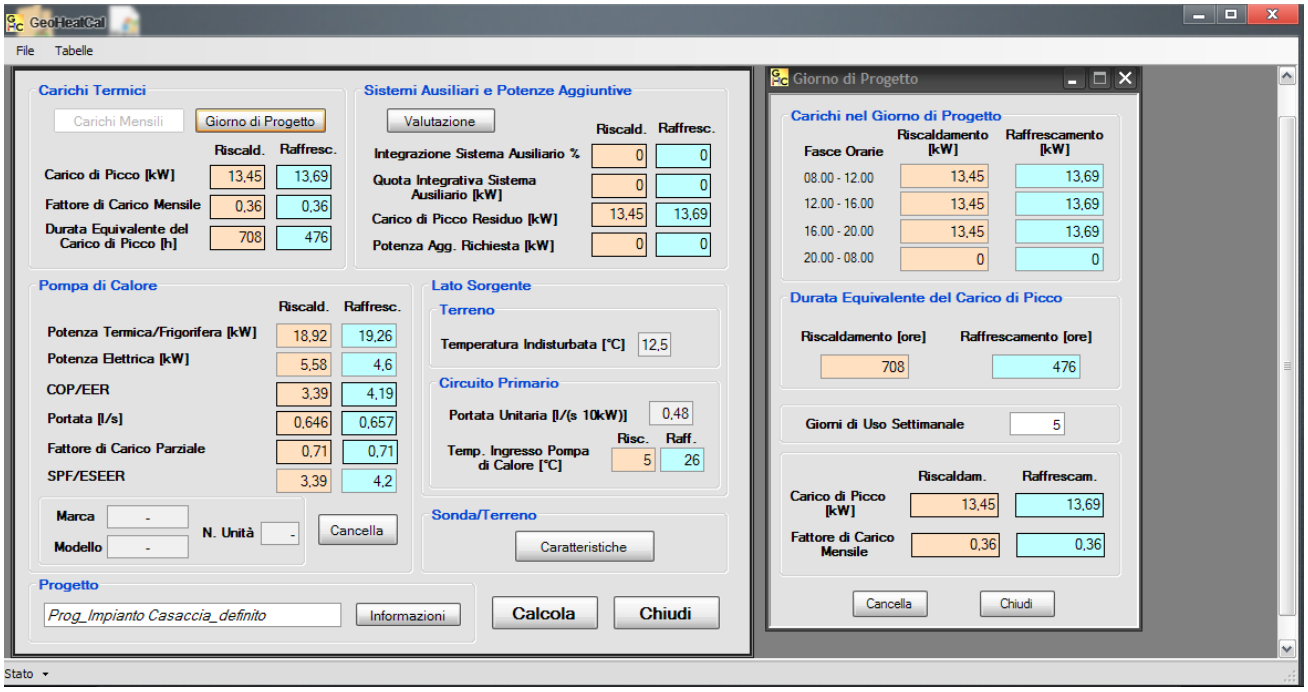


Figura 28. Carichi di picco invernali ed estivi

I dati relativi alla PdC sono stati estrapolati dalla scheda tecnica della PdC geotermica commerciale "AQUA BLDC- aqua inverter" prodotta dall'azienda Global System Integration (GSI). In particolare, è stata scelta la PdC associata ai terminali di utilizzo fancoil, sia per il funzionamento invernale che estivo (Tabella 11).
Nello specifico, in modalità di funzionamento invernale è stata scelta la PdC di potenza termica pari a 18,92 kW in quanto è in grado di soddisfare il carico di picco calcolato per l'utenza. La stessa, in modalità di funzionamento estivo fornisce al sistema una potenza frigorifera pari a 19,26 kW. Pertanto, nel software di simulazione, sono stati inseriti i dati relativi alla potenza termica, frigorifera ed elettrica della macchina prescelta. Il sistema fornisce il valore del coefficiente di prestazione sia in riscaldamento che in raffrescamento (COP/EER). Inoltre, fornisce il valore della portata (l/s) in funzione del carico di picco e della portata unitaria che rappresenta la portata del fluido che effettivamente scorre nel circuito primario (Figura 28).
Il fattore di picco parziale indica il rapporto tra il carico di picco e la potenza termica totale della PdC. Nella sezione lato sorgente sono stati inseriti diversi parametri, quali la temperatura indisturbata del terreno, assunta pari a 12,5°C, la portata unitaria del fluido termovettore (0,48 l/s) e la temperatura di ingresso nella PdC sia per il riscaldamento (6 °C) che per il raffrescamento (26 °C).
La sezione sonda/terreno consiste in tre schede:
- terreno;
- campo sonde;
- tubo + fluido.
Nella scheda terreno è stato inserito il valore della conducibilità termica del tufo assunta pari a 1,7 W/mK (Figura 29).
Nella scheda campo sonde è stata definita la disposizione dei quattro pozzi che costituiranno il campo sonde. In funzione del numero dei circuiti in serie e in parallelo indicato, il software è in grado di determinare le portate di circolazione del fluido termovettore in ciascuna sonda sia in riscaldamento che in raffrescamento (Figura 30). Inoltre, è stato possibile inserire il periodo di dimensionamento (10 anni), ovvero il tempo necessario affinché le temperature attorno alle sonde si stabilizzino. Nello specifico sono stati considerati due circuiti paralleli, ovvero uno di mandata e l'altro di ritorno che collegano ognuno delle quattro sonde al collettore. Il numero di sonde per circuito è pari a quattro, ovvero due di mandata e due di ritorno.
Nella scheda tubo-fluido sono state definite tutte le caratteristiche tecniche relative alla singola sonda.

Tabella 11. Scheda tecnica PdC geotermica "aqua inverter"(GSI). In rosso la PdC considerata

AQUA BLDC

[Versione INVERTER]

GSI High Performance System

Dati Tecnici (Geotermia) — *Technical Data (Geothermal)*

AQUA INVERTER	Mod	107		112		114		122		130		135		142	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
FUNZIONAMENTO: INVERNALE - B0/W35 Geo/Radiante / OPERATION: WINTER - B0/W35 Geo / Radiant Floor															
Potenza Termica / Thermal Power	kW	2,02	8,02	3,01	11,84	3,95	14,25	5,17	20,07	7,22	29,94	8,83	36,59	10,29	42,67
Portata acqua Imp. / Plant water flow	m3/h	0,35	1,38	0,52	2,04	1,23	2,45	1,72	3,45	2,47	5,15	3,02	6,29	3,52	7,34
P.A. Totale / Total Power Consumption	kW	0,34	1,61	0,54	2,34	0,73	3,04	1,02	4,33	1,37	6,31	1,60	7,37	1,97	9,03
COP		6,02	4,97	5,63	5,06	5,40	4,68	5,09	4,63	5,25	4,74	5,50	4,96	5,23	4,72
FUNZIONAMENTO: INVERNALE - B0/W45 Geo/FanCoil / OPERATION: WINTER - B0/W45 Geo/FanCoil															
Potenza Termica / Thermal Power	kW	1,75	7,23	2,68	10,80	3,54	13,22	4,73	18,92	6,59	28,17	8,02	34,29	9,39	40,17
Portata acqua Imp. / Plant water flow	m3/h	0,30	1,24	0,46	1,86	0,61	2,27	0,81	3,25	1,13	4,85	1,38	5,90	1,62	6,91
P.A. Totale / Total Power Consumption	kW	0,45	2,01	0,73	2,96	1,00	3,85	1,41	5,58	1,91	8,13	2,23	9,49	2,74	11,63
COP		3,87	3,60	3,67	3,65	3,54	3,44	3,35	3,39	3,45	3,46	3,59	3,61	3,43	3,45
FUNZIONAMENTO: INVERNALE - B0W55 Geo/Radiatori / OPERATION: WINTER - B0/W55 Geo/Radiators															
Potenza Termica / Thermal Power	kW	1,52	6,72	2,41	10,19	3,22	12,67	4,44	18,47	6,15	27,42	7,43	33,22	8,77	39,12
Portata acqua Imp. / Plant water flow	m3/h	0,26	1,16	0,41	1,75	0,55	2,18	0,76	3,18	1,06	4,72	1,28	5,71	1,51	6,73
P.A. Totale / Total Power Consumption	kW	0,60	2,52	0,99	3,79	1,37	4,92	1,99	7,27	2,69	10,59	3,14	12,37	3,85	15,15
COP		2,52	2,67	2,43	2,69	2,35	2,58	2,23	2,54	2,28	2,59	2,36	2,69	2,28	2,58
FUNZIONAMENTO: ESTIVE - B30W7 Geo/FanCoil / OPERATION: SUMMER - B30/W7 Geo/FanCoil															
Potenza Frigorifera / Cooling Power	kW	1,67	7,79	2,49	11,55	3,24	13,71	4,22	19,26	5,94	28,90	7,33	35,68	8,45	41,16
Portata acqua Imp. / Plant water flow	m3/h	0,29	1,34	0,43	1,99	0,56	2,36	0,73	3,31	1,02	4,97	1,26	6,14	1,45	7,08
P.A. Totale / Total Power Consumption	kW	0,41	1,72	0,66	2,47	0,89	3,23	1,24	4,60	1,67	6,70	1,95	7,83	2,39	9,59
EER		4,05	4,53	3,81	4,67	3,62	4,24	3,41	4,19	3,55	4,31	3,75	4,56	3,53	4,29
FUNZIONAMENTO: ESTIVE - B30W18 Geo/Radiante / OPERATION: SUMMER - B30/W18 Geo/Radiant Floor															
Potenza Frigorifera / Cooling Power	kW	1,86	9,76	2,84	14,54	3,68	17,42	4,80	24,46	6,75	36,70	8,33	45,31	9,61	52,26
Portata acqua Imp. / Plant water flow	m3/h	0,32	1,68	0,49	2,50	0,63	3,00	0,83	4,21	1,16	6,31	1,43	7,79	1,65	8,99
P.A. Totale / Total Power Consumption	kW	0,50	2,04	0,79	2,94	1,07	3,78	1,44	5,29	1,94	7,71	2,27	9,01	2,78	11,03
EER		3,70	4,79	3,60	4,94	3,44	4,61	3,34	4,62	3,47	4,76	3,67	5,03	3,46	4,74
DATI GENERALI / GENERAL DATA															
Refrigerante / Refrigerant		R410A													
Carica / Charge	Kg	1,20		1,75		2,30		3,20		3,70		4,20		4,70	
P. Max Assorbita / Max Power Absorbed [+]	kW	3,20		4,47		5,53		9,07		11,88		13,52		16,61	
C. Max Assorbita Monofase / Current Max Absorb.Single-phase [+]	A	14,66		20,47		25,35		n.d		n.d		n.d		n.d	
C. Max Assorbita Trifase/ Current Max Absorb. Three-phase [+]	A	6,34		8,27		10,73		16,33		21,50		23,99		28,81	
Classe Energetica / Energy Class		A++		A++		A++		A++		A++		A++		A++	
Circuiti frigoriferi / Refrigerant circuits	n°	1		1		1		1		1		1		1	
Gradini di parzializzazione / Staging steps	n°	Inverter		Inverter		Inverter		Inverter		Inverter		Inverter		Inverter	
Compressori / Compressor	n°	1		1		1		1		1		1		1	
Tensione alimentazione / Power supply	V/Hz/Ph	230/1/50 - 400/3/50						400/3/50							
Pressione sonora Lp / Sound pressure Lp*	dB(A)	43,20		46,40		46,40		47		47		48		49,1	
Lunghezza / Length L	mm	690		690		690		890		890		890		1090	
Profondità / Depth P	mm	720		720		720		900		900		900		1000	
Altezza / Height H	mm	1220		1220		1220		1220		1220		1220		1110	
Interasse ACS / DHW Wheelbase IACS	mm	85		85		85		85		85		85		140	
Interasse Imp / Plant Wheelbase IIMP	mm	85		85		85		85		85		85		150	
Interasse Geo / Geo Wheelbase IGEO	mm	85		85		85		85		85		85		150	
Interasse Sx / Left Distance ISX	mm	103		103		103		130		130		130		167	
Interasse 1 / 1 Wheelbase IM1	mm	115		115		115		175		175		175		140	
Interasse 2 / 2 Wheelbase IM2	mm	115		115		115		175		175		175		140	
Interasse Dx / Right Distance IDX	mm	103		103		103		152		152		152		154	
Peso / Weight	Kg	180		190		200		250		280		280		420	

[+]= Valori di dimensionamento linee elettriche e protezione magnetotermice differenziali

* Distanza misurata ad 1 metro in campo libero

[+] = Electricity dimensioning values and differential magnetothermic protection

** Measured distance to 1 meter in free field*

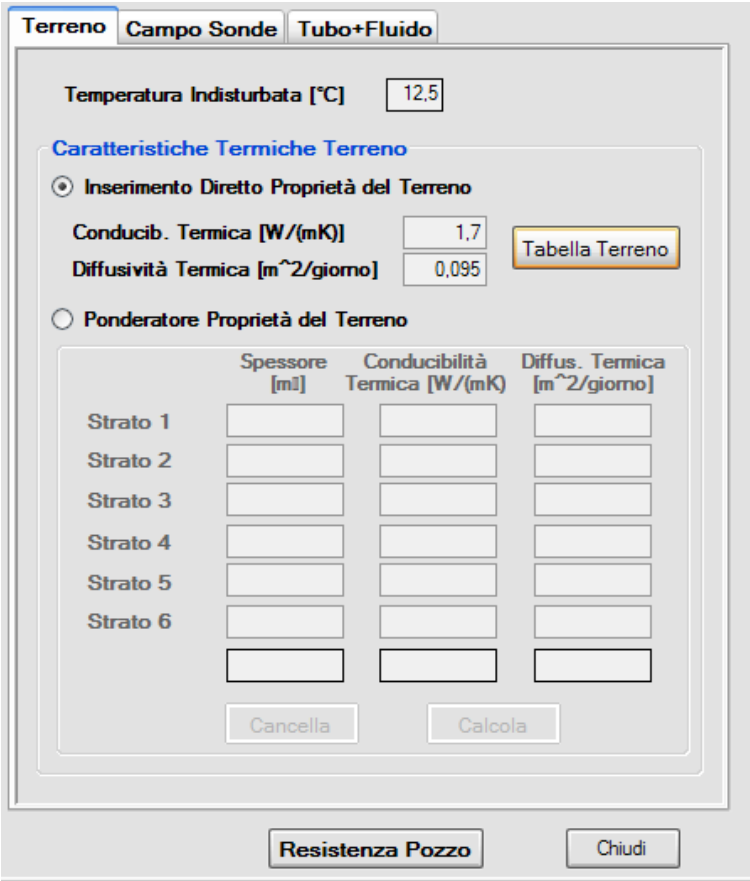


Figura 29. Scheda terreno

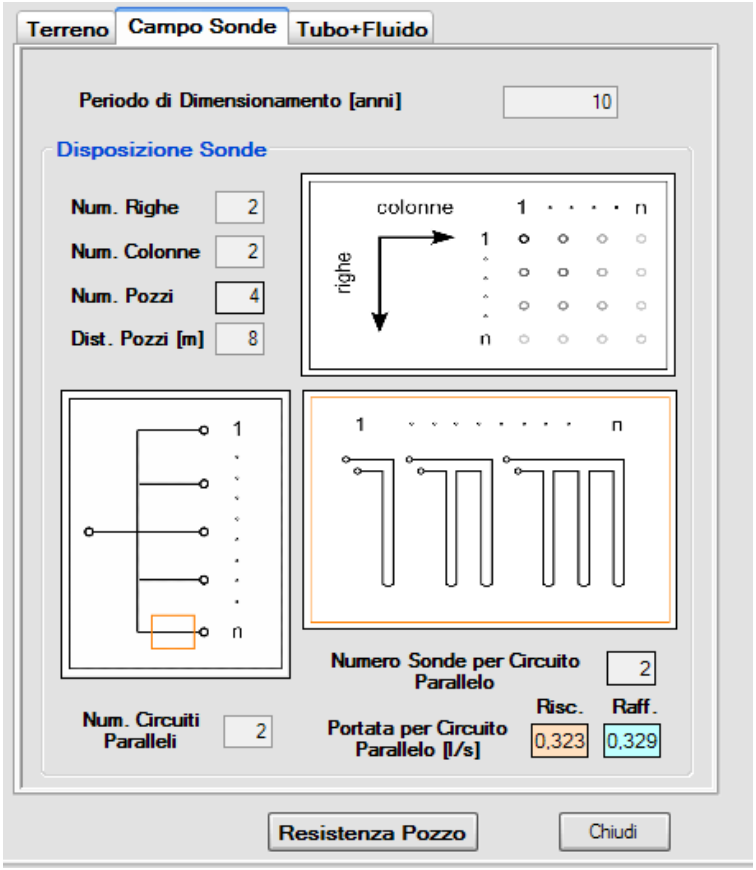


Figura 30. Scheda campo sonde

Il diametro nominale della sonda, in cui scorrerà il fluido termovettore, è pari a 32 mm. Il fluido termovettore sarà acqua senza l'aggiunta di anticongelanti (Figura 31).

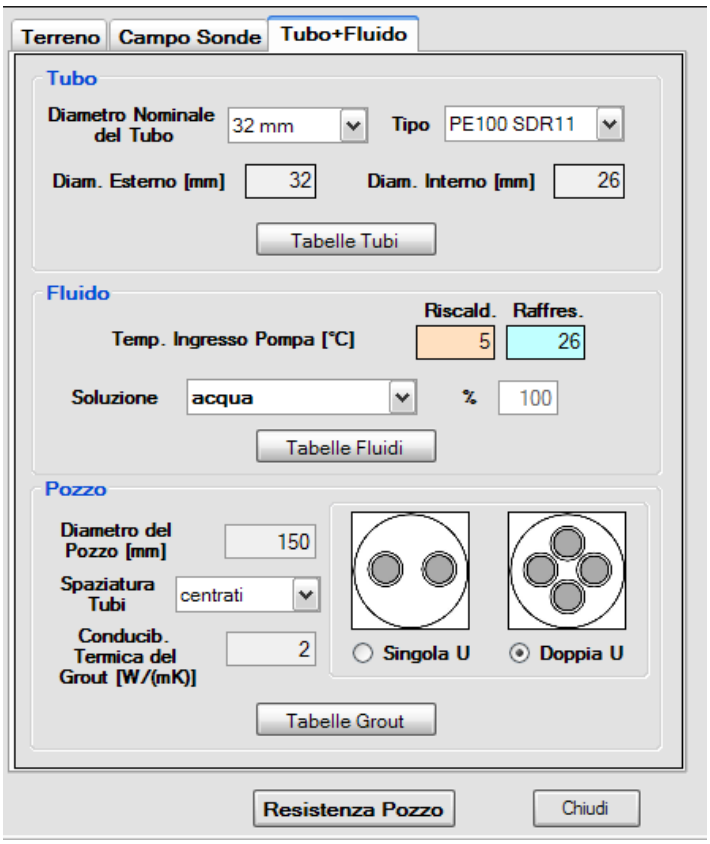


Figura 31. Scheda tubo-fluido

La conducibilità termica del Grout riportata (2,0 W/mK) è relativa al tipo di cemento che verrà utilizzato (Termoplast oppure FassaGEO 100).
La configurazione delle sonde scelta è la *double U*, ovvero due tubi in polietilene (diametro di 32 mm) di mandata e due di ritorno.
Alla fine della compilazione di tale scheda, è stato possibile consultare tutti i parametri riportati nella scheda resistenza pozzo. Sono riportate le grandezze termofisiche del fluido termovettore acqua (T, densità, conducibilità termica, calore specifico, viscosità dinamica, numero di Prandtl). Inoltre, sono riportate le grandezze relative alla portata per flusso parallelo, numero di Reynolds, regime di flusso e numero di Nusselt. Sono riportate anche le resistenze equivalenti del fluido e del tubo (Figura 32).
Dopo aver settato tutti i dati di input è stato possibile effettuare il dimensionamento dell'impianto (Figura 33). Il programma fornisce un risultato unico del dimensionamento della lunghezza delle sonde necessario a soddisfare il fabbisogno energetico richiesto dall'utenza. Tale valore corrisponde, pertanto, alla lunghezza totale di perforazione. Nel caso studio la lunghezza totale dei pozzi di perforazione è di 268,7, valore che rientra perfettamente nell'ipotesi di partenza, ovvero di considerare i quattro pozzi a diversa profondità per una lunghezza complessiva di 265 m (35 m, 50 m, 80 m e 100 m). È riportato anche il valore della resa termica delle sonde, espresso in W/m, che corrisponde al calore che le sonde riescono a prelevare dal terreno durante l'inverno e a renderlo disponibile all'evaporatore della PdC nelle condizioni di progetto. In raffrescamento, è il calore che viene prelevato dall'ambiente interno e stoccato nel sottosuolo tramite le sonde, in condizioni di progetto.

Soluzione

Soluzione	acqua	% 100

	Riscald.	Raffresc.
Temperatura [°C]	5	26
Densità [kg/m^3]	1000,14	996,47
Conducib. Termica [W/(mK)]	0,56871	0,60032
Calore Specifico [kJ/(kgK)]	4,20732	4,19806
Viscosità Dinam. [Pa s]	0,0015	0,00085
Numero di Prandtl	10,96	5,9
Temperatura di Congelamento [°C]	0	

Flusso

Port. per Circ. Parallelo [l/s]	0,323	0,329
Portata per Stelo [l/s]	0,161	0,164
Numero di Reynolds	5282,4	9379,9
Regime del Flusso	Transiz.	Transiz.
Numero di Nusselt	60,4411	76,3077

Resistenze Equivalenti

Resistenza del Fluido [mK/W]	0,00116	0,00087
Resistenza del Tubo [mK/W]	0,02146	0,02146

Figura 32. Scheda resistenza termica

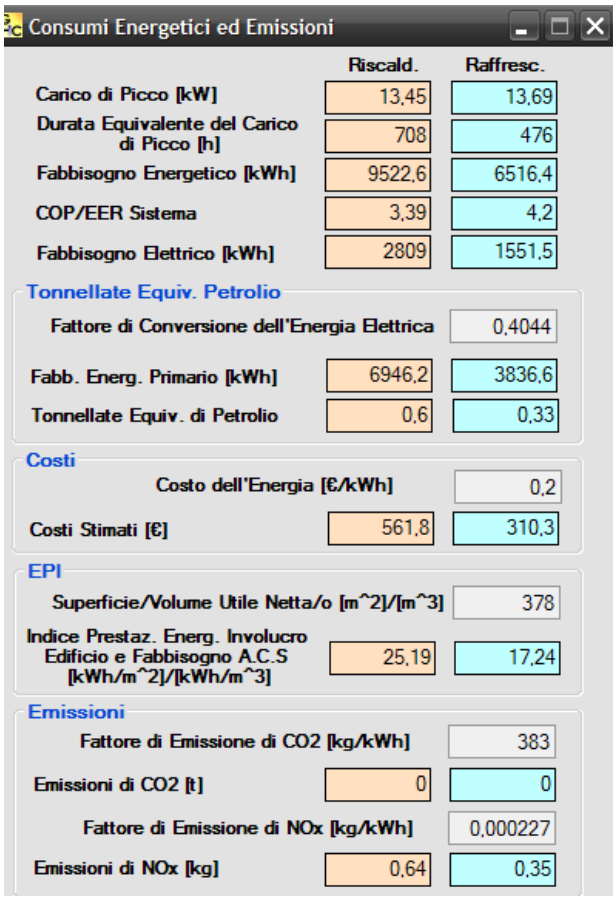
Lungh. Totale [m]	268,7	Resa Termica Sonde [W/m]	63,1
Lungh. Sing. Sonda [m]	67,2	Temp. Penaliz. Terreno [°C]	0,04
Numero Sonde	4	Temp. Congelamento [°C]	0

	Riscald.	Raffresc.
Temperatura Ingresso Pompa di Calore [°C]	5	26
Temperatura Uscita Pompa di Calore [°C]	1,51	32,17
ΔT Ingresso/Uscita Pompa di Calore [°C]	-3,49	6,17
Carico di Picco [kW]	13,45	13,69
Potenza Sistema Ausiliario [kW]	0	0
Percentuale Sistema Ausiliario [%]	0	0
Potenza Term. Effettiva Pompa di Calore [kW]	13,45	13,69
Potenza Term. Nominale Pompa di Calore [kW]	18,92	19,26
Fattore di Carico Parziale	0,71	0,71
Potenza Term. Prelevata/Riversata Terreno [kW]	9,48	16,96
Potenza Elett. Effettiva Pompa di Calore[kW]	3,97	3,27
Potenza Elett. Nominale Pompa di Calore [kW]	5,58	4,6
COP/EER Nominale Pompa di Calore	3,39	4,19
SPF/ESEER Pompa di Calore	3,39	4,2
Potenze Elettriche Addizionali [kW]	0	0
COP/EER Sistema	3,39	4,2
Portata Circuito Primario [l/s]	0,646	0,657
Portata per Sonda [l/s]	0,323	0,329
Regime di Flusso	Transiz.	Transiz.

Figura 33. Risultati dimensionamento impianto geotermico a sonde verticali

La temperatura di penalizzazione del terreno, invece, esprime il degrado medio termico (°C) del terreno dovuto all'esercizio del campo sonde, nella stagione invernale. In raffrescamento, invece, esprime l'innalzamento medio della temperatura del terreno indisturbato conseguentemente all'esercizio del campo geosonde. Sono riportati diversi parametri, sia per il riscaldamento che per il raffrescamento.
In particolare, nella stagione invernale:
- la temperatura di ingresso nella PdC è di 5°C e di 1,51 quella del fluido in uscita dalla stessa ed in ingresso nelle sonde;
- la potenza termica effettiva della PdC è di 13,45 kW;
- la potenza termica nominale della PdC è di 18,92 kW;
- la potenza termica prelevata dal terreno è di 9,48 kW_t;
- la potenza elettrica effettiva della PdC è di 3,97 kWe;
- la potenza elettrica nominale della PdC è di 5,58;
- il coefficiente di prestazione (COP) è di 3,39.
In particolare, nella stagione estiva:
- la temperatura di ingresso nella PdC è di 26°C e di 32,17 quella del fluido in uscita dalla stessa ed in ingresso nelle sonde;
- la potenza termica effettiva della PdC è di 13,69 kW;
- la potenza termica nominale della PdC è di 19,26 kW;
- la potenza termica riversata nel terreno è di 16,96 kW_t;
- la potenza elettrica effettiva della PdC è di 3,27 kW_e;
- la potenza elettrica nominale della PdC è di 4,6 kW_e;
- il coefficiente di prestazione (COP) è di 4,19.
Pertanto, è abbastanza evidente come la potenza termica fornita dal terreno consente alla PdC di raggiungere rendimenti molto elevati con consumi elettrici molto bassi da parte del compressore, sia nella fase di riscaldamento che in quella di raffrescamento.
Infine è stato possibile effettuare una prima valutazione dell'impatto energetico ed ambientale del sistema geotermico dimensionato. Pertanto, in funzione dei fabbisogni energetici e dei fattori di emissione di CO_2 e NO_x, il software permette di effettuare una stima di massima dei costi di gestione del sistema, del fabbisogno di energia primaria dell'edificio e delle emissioni inquinanti in atmosfera (Figura 34).
Si riporta una stima dei costi stagionali dovuti al consumo di energia elettrica per il riscaldamento/raffrescamento e le emissioni in atmosfera legate alle centrali di produzione elettrica. Inoltre, viene calcolato il fabbisogno di energia primaria dell'edificio, sia per il riscaldamento (9522,6 kWh) che per il raffrescamento (6516,4 kWh), in funzione del fabbisogno energetico dell'edificio, del fattore di conversione dell'energia elettrica e dell'efficienza della PdC. Viene riportato anche il valore dell'Indice di Prestazione Energetica (EPI) dell'edificio, che tiene conto del fabbisogno energetico dell'utenza e della produzione della acqua calda sanitaria (D.Lgs. 192/2005. Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia). Sulla base del fabbisogno energetico (kWh), sia in fase di riscaldamento che di raffrescamento, viene determinato il fabbisogno elettrico, inteso come il consumo elettrico della PdC, rispetto ai valori del COP/EER del sistema.
È stato inserito il fattore di conversione dell'energia, che indica il valore del rendimento di produzione dell'energia elettrica in Italia. Il fattore di conversione dell'energia è stato fissato pari a 0,4044 tep/kWh. L'inserimento di tale dato permette di calcolare in modo automatico il fabbisogno energetico primario (kWh) dell'edificio sulla base del fabbisogno energetico e dell'efficienza della PdC utilizzata e lo stesso in tonnellate equivalenti di petrolio (tep) sia in inverno che in estate. Per il costo dell'energia si è considerato un costo medio pari a 0,2 €/kWh. Il sistema, in seguito all'inserimento di tale dato, permette di avere una stima sui costi imputabili al consumo elettrico complessivo, da parte del compressore, sia in inverno (561,8 €) che in estate (310,3 €). In seguito, è stato inserito il valore del volume utile netto dell'ufficio, che ha permesso il calcolo dell'indice di prestazione energetico dell'involucro edilizio e del fabbisogno dell'acqua calda sanitaria (ACS) sia in inverno che in estate. Sono stati inseriti i valori dei fattori di emissione, rispettivamente della CO_2 (383 kg/kWh) e degli NO_x (0,000227 kg/kWh). Il sistema calcola automaticamente le emissioni di CO_2 (t) e di NO_x (kg), sia in inverno che in estate, rispetto all'impianto geotermico dimensionato. È interessante notare

che il sistema così concepito risulta ad impatto ambientale nullo in termini di emissioni di CO_2; pertanto le sonde geoscambio accoppiate alle PdC risultano un utile strumento per contribuire all'abbattimento delle emissioni climalteranti. È auspicabile nei prossimi anni, da parte degli Enti Preposti, una maggiore sensibilizzazione verso tali sistemi integrati, magari promuovendo una campagna di incentivazione efficace a livello nazionale.



Consumi Energetici ed Emissioni

	Riscald.	Raffresc.
Carico di Picco [kW]	13,45	13,69
Durata Equivalente del Carico di Picco [h]	708	476
Fabbisogno Energetico [kWh]	9522,6	6516,4
COP/EER Sistema	3,39	4,2
Fabbisogno Elettrico [kWh]	2809	1551,5
Tonnellate Equiv. Petrolio		
Fattore di Conversione dell'Energia Elettrica		0,4044
Fabb. Energ. Primario [kWh]	6946,2	3836,6
Tonnellate Equiv. di Petrolio	0,6	0,33
Costi		
Costo dell'Energia [€/kWh]		0,2
Costi Stimati [€]	561,8	310,3
EPI		
Superficie/Volume Utile Netta/o [m^2]/[m^3]		378
Indice Prestaz. Energ. Involucro Edificio e Fabbisogno A.C.S [kWh/m^2]/[kWh/m^3]	25,19	17,24
Emissioni		
Fattore di Emissione di CO2 [kg/kWh]		383
Emissioni di CO2 [t]	0	0
Fattore di Emissione di NOx [kg/kWh]		0,000227
Emissioni di NOx [kg]	0,64	0,35

Figura 34. Consumi energetici ed emissioni

5.2 Costo dell'impianto

La realizzazione dell'impianto, costituita da diverse attività, può essere così delineata:
- impianto cantiere;
- esecuzione del campo geosonde;
- effettuazione del GRT;
- collaudo delle sonde geotermiche,
- collegamenti orizzontali tramite l'effettuazione di trincee delle quattro sonde geotermiche a doppio tubo ad U.

Prima di effettuare le perforazioni occorre allestire il cantiere, pertanto bisognerà prevedere lo spostamento e il trasporto della strumentazione necessaria dalla sede al cantiere per tutta la durata delle lavorazioni, il trasporto dell'attrezzatura di perforazione e del test geotermico. Inoltre, è necessario che il personale impegnato nelle diverse attività sia specializzato e opportunatamente formato. Per questa attività preliminare, generalmente, il costo a corpo è intorno ai 2.000 €.

Successivamente, dovranno essere effettuate le perforazioni come segue:
- realizzazione di una perforazione a carotaggio continuo di 100 metri di profondità, in modo da poter effettivamente definire l'assetto litostratigrafico ed esattamente il livello piezometrico della falda nell'area scelta.

- realizzazione di altre tre perforazioni alle profondità di 35 m, 50 m e 80 m, da eseguire a distruzione di nucleo.

Questa fase, comprende anche la fornitura delle sonde geotermiche, del tipo 4 X 32 mm, testate e certificate, complete di peso zavorrato in acciaio. Le quattro sonde per ogni pozzo dovranno essere installate e cementate con miscele cementizie termicamente migliorate. È chiaro che la scelta del cemento da utilizzare è di estrema importanza in quanto deve assicurare un'alta trasmissione termica. La cementazione, scrupolosamente effettuata, dovrà assicurare la completa ed uniforme adesione tra la sonda e la parete interna del foro stesso, senza crepe e/o discontinuità.

In genere, il costo della perforazione a carotaggio continuo, l'installazione delle sonde e la cementazione delle stesse è intorno ai 9.500-10.000 €, se non insorgono imprevisti. Il costo invece delle tre perforazioni a distruzione di nucleo, l'installazione delle sonde e la cementazione delle stesse è nettamente inferiore, intorno ai 3.500-4.000 € complessivamente.

Successivamente, ad avvenuta maturazione del cemento, è necessario effettuare il "*Test di Risposta Termica*", ovvero il GRT, solo sul pozzo di 100 m. La finalità di tale test è di conoscere con certezza il valore di conducibilità termica media delle formazioni attraversate (W/mK), il valore di resistenza termica sonda geotermica/terreno (KW/m) e la temperatura del terreno indisturbato (°C). Il costo di tale test si aggira intorno ai 3.000 €.

In seguito, dovrà essere effettuato il collaudo del campo geosonde, che consiste nel test di pressione e di flusso sulle sonde. Il test di pressione verificherà la tenuta del circuito idraulico. Il test di flusso, invece, dovrà verificare il comportamento fluidodinamico del circuito idraulico installato e dovrà valutare la misura della caduta di pressione di ciascuna singola U della sonda a condizione di flusso costante. Le due tipologie di test, ognuno eseguito quattro volte in accordo alla norma UNI 11467:2012 e SIA 384/6:2010, hanno un costo complessivo che si aggira intorno ai 2.000 €.

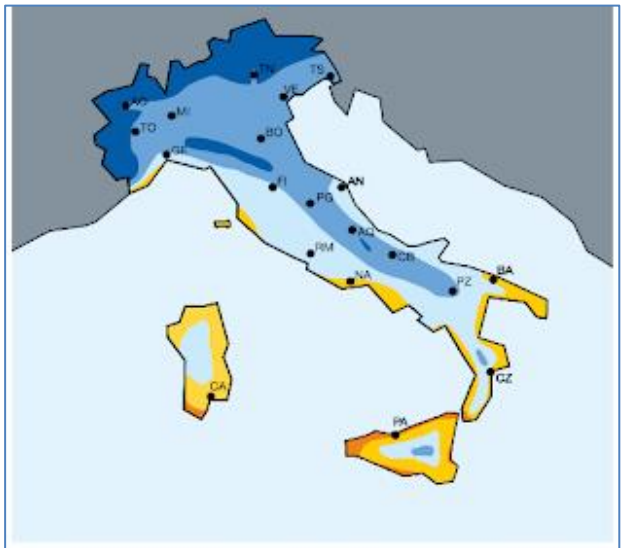
Verificato che le sonde geotermiche siano state correttamente installate, che non abbiano subito deformazioni particolari durante la messa in posa e che presentino una buona tenuta del circuito idraulico, si dovrà procedere con il raccordo di tali sonde fino al collettore. I circuiti primari paralleli sono due, ovvero un tubo di mandata e uno di uscita che collegheranno ogni singolo pozzo con il collettore. Il collettore a quattro circuiti dovrà essere ubicato non troppo lontano dalla PdC, in modo da poter gestire separatamente i pozzi. Oltre al collettore dovrà essere prevista l'installazione del degasatore, in prossimità della PdC, al fine di togliere l'eventuale presenza di aria nei tubi potenzialmente pericolosa per la PdC. Il costo di queste ultime attività è di circa 4.000 €. Pertanto, il costo complessivo dell'intero impianto si aggira sui 40.000 €.

5.3 Valutazione dell'investimento dell'impianto

Una valutazione economica di un impianto geotermico, in termini di costi e benefici, tiene conto di diverse variabili, quali:

- il fabbisogno di energia termica dell'utenza;
- l'utilizzo della PdC;
- il tipo di terreno a disposizione e l'opzione impiantistica scelta;
- il costo per l'eventuale sostituzione dei radiatori con un impianto di riscaldamento a bassa temperatura;
- il grado di isolamento termico dell'edificio.

Nel nostro caso l'utenza considerata ha una superficie di 140 m^2, ricade nella zona D e, in accordo al D.P.R. n. 412 del 1993 recante le "norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della legge 9 gennaio 1991, n. 10", possiamo assumere un discreto livello di isolamento (valore di trasmittanza "U"$\leq$ 0,36 W/mK) (Figura 35). L'utenza è provvista di un impianto di distribuzione del calore a ventilconvettori.



Schema indicativo dele zone climatiche secondo DPR 412/93

Zona A - U ≤ 0,62 W/m K
Zona B - U ≤ 0,48 W/m K
Zona C - U ≤ 0,40 W/m K
Zona D - U ≤ 0,36 W/m K
Zona E - U ≤ 0,34 W/m K
Zona F - U ≤ 0,33 W/m K

Zona Climatica	Trasmittanza termica U delle strutture opache verticali (W/m²K)	
	2015*	2019/2021**
A e B	0,45	0,43
C	0,38	0,34
D	0,34	0,29
E	0,30	0,26
F	0,28	0,24

Figura 35. Valori di trasmittanza in funzione delle zone climatiche (D.P.R. 412/93)

Per soddisfare interamente il fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento, l'impianto con sonde geotermiche verticali e PdC geotermica ha una potenza elettrica effettiva rispettivamente di 3,97 kW in inverno e 3,27 kW in estate. La profondità della perforazione complessiva è di 265 metri.
I costi di investimento per l'impianto geotermico, come visto nel precedente paragrafo, comprendono le perforazioni dei quattro pozzi, l'installazione e la messa in posa di sonde verticali e i test in pozzo, senza considerare i terminali di utilizzo e la PdC, in quanto l'utenza già ne dispone. La spesa di investimento iniziale ammonta a 40.000 €.
Dal confronto di bollette annuali relativamente al costo del riscaldamento e del raffrescamento di un'utenza di simile metratura, si evince che l'impianto geotermico, rispetto a un sistema tradizionale di riscaldamento con caldaia a metano e condizionatore elettrico per il raffrescamento, consente un risparmio annuo in bolletta pari al 50%, che sale fino al 70-80% se si confronta lo stesso con impianti di riscaldamento a gasolio e GPL.
Per calcolare il tempo di ritorno o di ammortamento, ovvero in quanti anni possiamo recuperare il costo iniziale di investimento dell'impianto, è necessario stimare:
- il risparmio annuo in bolletta (1.000 € per la climatizzazione con il geotermico rispetto a 2.000 € per il sistema tradizionale);
- il costo dell'impianto geotermico, o meglio il suo extra-costo rispetto a un impianto tradizionale (in questo caso è stato considerato un impianto con caldaia a metano e condizionatore elettrico).
L'investimento iniziale complessivo dell'impianto geotermico: 40.000 €. L'investimento complessivo di un impianto tradizionale è di 20.000 €.

Pertanto, l'extra-costo dell'impianto geotermico è di 20.000 €. Per dare un'idea sommaria, è possibile dire che il tempo di ritorno dell'investimento per un impianto geotermico sarà di circa 20 anni.
Bisogna tener conto che la vita media di un impianto geotermico è superiore rispetto a una caldaia a metano e un condizionatore elettrico. La pompa di calore ha una vita media di circa 15-20 anni, mentre le sonde geotermiche possono funzionare senza problemi anche per molti decenni. A questo bisogna aggiungere che gli impianti geotermici non necessitano di alcuna manutenzione, perché non dispongono di canne fumarie e bruciatori, pertanto all'investimento iniziale non si aggiungono, a differenza dei sistemi tradizionali, le spese di manutenzione.
Inoltre, il fatto che non ci sia più una caldaia che utilizza gasolio oppure metano scongiura il rischio legato ai pericolosi serbatoi installati. Infine, le componenti impiantistiche si adattano a qualsiasi tipo di edificio (abitazioni, uffici, edifici commerciali, hotel, scuole, piscine, capannoni); nessuna apparecchiatura viene installata al di fuori dell'edificio, ciò comporta un impatto visivo nullo.

6 Conclusioni

In questo primo anno di attività lo studio si è incentrato sulla scelta del sito dove ubicare il campo geosonde. Da uno studio preliminare, tramite la consultazione di dati reperiti in bibliografia e dalla consultazione di dati stratigrafici di pozzi effettuati nel 2008, nell'ambito di un'attività di monitoraggio di radionuclidi in falda acquifera commissionata da Sogin, è stato ricostruito l'assetto stratigrafico-litologico e idrogeologico dell'area del C.R. ENEA-Casaccia. Successivamente è stata individuata l'area in cui insisterà il sistema di approvvigionamento del calore dal terreno tramite sonde geotermiche verticali accoppiate a PdC acqua-acqua. In prima approssimazione, è stata condotta una simulazione dei carichi termici ipotizzando che la sorgente terreno dovesse soddisfare un'utenza di superficie pari a 140 m^2, ubicata nell'intorno del campo geosonde, ovvero in prossimità dell'edificio F40 del C.R. Casaccia. Tramite un software dedicato, "*GeoHeatCall*", è stato possibile dimensionare le sonde inserendo i valori dei carichi di picco sia in inverno che in estate. Inoltre, la precedente valutazione geologica dell'area ha permesso di estrapolare, in via approssimativa, il valore di conducibilità termica delle rocce presenti nell'area, costituite principalmente da materiale tufaceo, e pertanto di conseguenza avere indicazioni sul valore della resa termica del pozzo per metro lineare di sonda installata. In seguito, considerata la PdC geotermica commerciale prodotta da "*GSI*", sono stati definiti i valori della temperatura in ingresso alla PdC sia in estate che in inverno. Successivamente, è stato possibile definire il valore effettivo della potenza termica estratta durante l'inverno e stoccata durante l'estate. In ultimo, dai dati di input inseriti, il software ha elaborato anche dati relativi al consumo energetico e alle emissioni di CO_2 e NO_X. In conclusione, è stata condotta un'analisi economica dell'impianto e in via del tutto indicativa del tempo di ritorno dell'investimento iniziale. È chiaro che questo documento vuole fornire informazioni di massima sulla convenienza e fattibilità di un sistema combinato a PdC geotermica con sonde geotermiche verticali. Il secondo anno, in seguito a test effettuati direttamente nei pozzi e tramite il sistema di monitoraggio con fibre ottiche direttamente inserite all'interno delle sonde verticali, saranno effettivamente misurati le variazioni di temperatura e l'andamento areale nell'intorno del campo geosonde. In funzione di tali valori si potrà scegliere se destinare questa risorsa per asservire un'utenza oppure inviarla direttamente a un serbatoio di accumulo, in modo da soddisfare particolari esigenze. L'intento è di dimostrare la valenza effettiva di tale calore pulito, che risulta rinnovabile e sicuro nel tempo in quanto sfrutta il normale gradiente geotermico terrestre, disponibile in ogni parte della superficie terrestre. Come già detto, alle nostre latitudini oltre i 15 metri di profondità dal piano campagna la temperatura rimane fissa e costante tutto l'anno, ovviamente in condizioni di non anomalia termica. Si auspica che ci sia una forte sensibilizzazione da parte dei legislatori e dal mondo accademico verso tale risorsa, magari promuovendo la stessa tramite politiche incentivanti e autorizzative in termini di concessione. Al momento non vi è una normativa nazionale, e alcune Regioni italiane dispongono di proprie normative comunali; pertanto il sistema autorizzativo e legislativo risulta frammentato e poco chiaro [30], ostacolando in tal modo il decollo della risorsa geotermica. Le ragioni della mancata diffusione delle PdC geotermiche sono principalmente legate a barriere di tipo informativo ed economico. Le prime dipendono dall'insufficiente conoscenza di questo tipo di macchine, con particolare riguardo alle potenzialità operative,

alle prestazioni effettive in campo e al rischio temuto di possibili malfunzionamenti, per la presunta immaturità di una tecnologia ancora considerata emergente. Le seconde dipendono dall'incertezza sui costi energetici e da un costo di installazione relativamente elevato [17]. Bisogna però prendere atto che questo tipo di risorsa termica ha, almeno nel nostro Paese, potenzialità straordinarie in quanto può essere applicata su gran parte del nostro territorio, e potrebbe contribuire, in modo significativo, insieme ad altre fonti rinnovabili, a soddisfare la domanda termica nazionale.

7 Riferimenti bibliografici

[1] http://geothopica.igg.cnr.it/;

[2] relazione tecnica- Caratterizzazione idrogeologica e radiometrica del sito Casaccia propedeutica allo smantellamento dei serbatoi Waste-A e Waste-B. Elaborato NP VA 0148- Impianto Casaccia Opec;

[3] Unione Geotermica Italiana (UGI) - Stime di crescita della geotermia in Italia 2016-2030, con proiezioni al 2050- per un aggiornato manifesto della Geotermia italiana- il calore della terra. Risorsa ecocompatibile: ovunque, per tutti, sempre. Settembre 2017;

[4] P. Bird, Z. Liu, and W. K. Rucker, "Stresses that drive the plates from below: Definitions, computational path, model optimization, and error analysis", J. Geophys. Res., (2008)113(B11) B11406, doi:10.11029/12007JB005460;

[5] J. H. Davies and D. R. Davies, "Earth's surface heat flux", Solid Earth, (2010), 1, 5–24;

[6] R. Cataldi, F. Mongelli, P. Squarci, L. Taffi, C. Calore, "Geothermal ranking of Italian territory, Geothermics, Volume n. 24, Issue 1 (1995), pp.115-129;

[7] Bureau de Recherches Géologiques et Minières – BRGM;

[8] A. Baietto A., M. Pochettino e E.Salvatici E, "Progettazione di impianti geotermici- sonde verticali e pozzi d'acqua" con software Geo Heat Call, Editore Dario Flaccovio, Palermo, 2010;

[9] G.Buonasorte, M. G. Carboni e M. A. Conti, "Il substrato Plio-Pleistocenico delle vulcaniti sabatine: considerazioni stratigrafiche e paleoambientali". Bollettino della Societa Geologica Italiana, (1991) Volume n. 110, pp.35–40;

[10] D. De Rita, M. Di Filippo e C. Rosa, "Structural evolution of he Bracciano volcano-tectonic depression, Sabatini volcanic complex, Italy". Geological Society special publication n. 110 (1996), pp.225-236;

[11] F. Manca, S. Viaroli, R. Mazza, "Hydrogeology of the Sabatini Volcanic District (Central Italy)" Journal of maps, (2017) Volume 13, pp. 252-259;

[12] S. Viaroli, E. Cuoco, R. Mazza e D.Tedesco, "Dynamics of natural contamination by aluminium and iron rich colloids in the volcanic aquifers of Central Italy" . Environmental Science and Pollution Research, (2016) Volume n.23, pp. 19958–19977. doi:10.1007/s11356-016-7198-8;

[13] G. Capelli, L. Mastrorillo, R. Mazza, M. Petitta, T. Baldoni, F. Banzato et al., "Carta Idrogeologica del Territorio della Regione Lazio" (4 fogli, scala 1: 100.000), (2012);

[14] M. Dall'Aglio e G.P. Giannotti "Studio idrogeologico ed idrogeochimico preliminare del bacino del F. Arrone, ai fini di una eventuale immissione di affluenti radioattivi". Not. CNEN, 10, Roma, 1964;

[15] L. Lombardi e G.P. Giannotti, "Idrogeologia della zona Sud – Est del Lago di Bracciano"; Boll. Soc. Geol. It. (1969), Volume n.88, pp. 107 – 121;

[16] https://www.iea.org/;

[17] Ministero dello Sviluppo Economico, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare e Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, "Proposta di piano nazionale integrato per l'energia e il clima (31/12/2018);

[18] https://www.gse.it/, http://www.rse-web.it/home.page;

[19] S.Basta e F. Minchio, "Geotermia e pompe di calore - Guida pratica agli impianti di climatizzazione", (2007), pp.354, Editore S. Basta, Verona;

[20] VDI 4640-1 (2000) "Thermal use of the underground, Fundamentals, approvals, environmental aspects", Verein Deutsher Ingenieure" D.Dusseldof;

[21] J. Claesson e P.Eskilson, " Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes", Tesi di dottorato, Department of Mathematical Physics, (1987) University of Lund, Sweden;

[22] F. Tinti, "Geotermia per la climatizzazione - Applicazioni, tecnologia- analisi costi-benefici" (2009), pp.209, Editore Dario Flaccovio;
[23] D. Banks, "An Introduction of Thermogeology Ground Source Heating and Cooling", Oxford Blackwell Publishing. D. (2008);
[24] L. Rybach, "Regulatory framework for geothermal in Europe – with special reference to Germany, France, Hungary, Romania, and Switzerland", Geothermal training programme, 2003;
[25] B. Sanner, "Guidelines, standars, certification and legal permits for ground source heat pumps in the european union", 9th International IEA Heat Pump Conference, 2008;
[26]www.robur.it;
[27] Egec, "Geothermal Heat pumps - Ground source Heat pumps"(2009),
[28] S. P. Kavanaugh e K. Rafferty, "Ground-Source Heat Pumps: Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings," American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Chiba, 1997;
[29] H. D. Zeng, N.R. Diao e Z.H. Fang, "Efficiency of vertical geothermal heat exchangers in ground source heat pump systems", J. Therm Sci, 12(1), (2003), pp. 77-81;
[30] N. Raniero, "Aspetti legislativi e progettuali inerenti alla realizzazione degli impianti geotermici" Tesi di laurea,Facoltà di Ingegneria, Corso di laurea in Ingegneria Civile, Dipartimento IMAGE, Università degli studi di Padova (2008-2009).

8 Acronimi

Sogin- Società Gestione Impianti Nucleari;
PdC - Pompa di calore;
HiL - Hardware in the Loop;
C.R.Casaccia- Centro Ricerche Casaccia;
CVS - Complesso Vulcanico Sabatino;
ACS – acqua calda sanitaria;
GSE – Gestore Servizi Energetici;
RSE – Ricerca Sistema Elettrico;
R_b – resistenza termica del foro
DEM – Modelli Digitale di Elevazioni;
TGS – Tufo Granulare Stratificato;
ET- Materiale Eterogeneo;
TGLB – Tufo Granulare con Lapilli e Bombe;
TGC – Tufo Granulare con Cenere Grossolana;
GSHP – Ground Source Heat Pump;
GRT – Ground Response Test;
UTES – Underground Thermal Energy Storage;
SGV – Sonda geotermica verticale;
GG – Gradi Giorno;
GSI – Global System Integration.