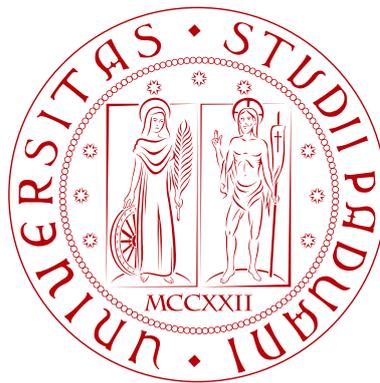


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

SCUOLA DI INGEGNERIA

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (DICEA)

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile



VALUTAZIONE DEL POTENZIALE DI SCAMBIO GEOTERMICO
RELATIVO AL TERRITORIO DELL' ALTA PIANURA VICENTINA

RELATORE:

Chiar.mo Prof. Ing. Andrea Rinaldo

CORRELATORI:

Ing. Giulia Passadore

Dr. Geol. Silvia Bertoldo

Dr. Geol. Andrea Sottani

LAUREANDO: Elisa Stella, 1057349

ANNO ACCADEMICO 2013 - 2014

L'ingegnere: quel personaggio
che fa bene, con schemi
semplici, cose complesse.

Luigi D'Alpaos

Premessa

Negli ultimi anni si sono sviluppate ricerche mirate allo studio dello sfruttamento delle energie rinnovabili e in particolare si è registrato un certo interesse per l'energia geotermica.

Il presente studio fornisce una valutazione preliminare dell'idoneità allo scambio geotermico per sistemi a bassa entalpia nel territorio dell'alta pianura di Vicenza.

La zona di interesse si estende a partire dalle pendici prealpine fino alla fascia delle risorgive, comprendendo i sistemi infravallivi delle valli del Chiampo e dell'Agno-Guà che lo delimitano a ovest, e il Fiume Brenta, che segna il confine ad est.

Al fine dello studio dei parametri che influiscono sulle proprietà termiche del sottosuolo, sono state condotte delle attività sperimentali ad integrazione delle informazioni già disponibili e della rete di monitoraggio già attiva nella zona.

Sono state eseguite misure in situ dei livelli e delle temperature di falda, al fine di approfondire le conoscenze all'interno del dominio. In particolare, per le temperature si sono eseguiti dei log verticali per valutarne l'andamento al crescere della profondità. Tali attività sono state condotte su un'area di circa 2000 km², attraverso misure effettuate su circa 200 punti.

In un secondo momento si sono elaborati i dati raccolti anche attraverso interpolazione mediante kriging ottenendo la ricostruzione dell'andamento dei deflussi sotterranei e della distribuzione delle temperature nel sottosuolo.

Lo studio del potenziale geotermico è stato quindi valutato considerando il gradiente geotermico, definito in base alla differenza di temperatura tra lo strato superficiale e quello profondo, ma anche la conduttività termica (λ) e la velocità della falda (v_f).

Si è valutata la distribuzione spaziale di questi fattori e le valutazioni sono state completate con la verifica delle attuali regolamentazioni circa le zone da tutelare, in cui sono presenti restrizioni ambientali ed idrogeologiche

che possono interferire con la progettazione di impianti di geoscambio.

Il presente studio rappresenta un primo approccio per la valutazione delle potenzialità geotermiche del territorio può essere utilizzato come contributo per la pianificazione territoriale in merito a queste tematiche.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare tutti coloro che hanno contribuito alla realizzazione della mia tesi. Innanzitutto il Prof. Andrea Rinaldo, il quale ha dimostrato fiducia ed interesse nel lavoro svolto. Ringrazio, poi, l'Ing. Giulia Passadore, che è stata un punto di appoggio di fondamentale importanza, con il suo atteggiamento motivante è stata un valido e solido sostegno per dubbi e incertezze.

Intendo ringraziare, inoltre, tutti i collaboratori di Sinergeo, in particolare: il Dr. Geol. Andrea, per aver reso possibile il lavoro svolto; la Dr.ssa Geol. Silvia Bertoldo, per avermi spronata a crescere a livello formativo e per avermi costantemente seguito nello sviluppo del presente elaborato; l'Ing. Luca Rigato, per essere stato, assieme a me, membro ufficiale del team "Quelli del pozzo"; il Dr. Geol. Emanuele, per aver egregiamente sostituito Luca nel team nei suoi primi giorni di lavoro e per aver permesso il recupero del lavoro perso durante un "incidente di percorso" (a tal proposito, una nota di merito va al Dr. Geol. Matteo Dal Zovo, che ha messo a disposizione il suo ingegno al fine di limitare il danno fatto).

Una dedica particolare va ai miei genitori: i loro sacrifici, la loro costanza e il loro affetto mi hanno accompagnata nella realizzazione dei miei obiettivi, insegnandomi ad avere coraggio nelle mie scelte.

Infine, un ringraziamento speciale va ai miei amici e ai miei compagni di università, in particolar modo: Carolina, con lei sono stati cinque anni di sogni, progetti, ansie ma soprattutto risate; Daniele, per la sua semplicità e leggerezza; Enrico, per aver fornito a me e Carolina numerosi spunti creativi.

Indice

1	Inquadramento normativo	1
1.1	Normativa europea	1
1.2	Normativa nazionale e regionale	3
1.2.1	Concessione di derivazione delle acque pubbliche	5
1.2.2	Autorizzazioni allo scarico	7
1.2.3	Regolamentazione provinciale	9
1.3	Classificazione delle risorse geotermiche	9
1.3.1	Competenze	12
1.3.2	Esclusioni	12
2	Geotermia a bassa entalpia	15
2.1	Generalità	15
2.2	Utilizzazione delle risorse geotermiche	16
2.3	Effetti sull'ambiente	18
2.4	Impianti geotermici	19
2.4.1	Impianti a circuito chiuso	21
2.4.2	Impianti a circuito aperto	21
3	Inquadramento territoriale	23
3.1	Inquadramento geografico	23
3.2	Inquadramento climatico	23
3.3	Inquadramento geologico	28
3.3.1	Generalità geologiche del bacino del sistema Agno- Chiampo-Guà	28
3.3.2	Generalità geologiche della pianura compresa tra i fiumi Astico e Brenta	32
3.4	Inquadramento idrogeologico	32
3.4.1	Acquifero indifferenziato e freaticimetria	33
3.4.2	La zona delle risorgive	35

4	Cenni teorici sulle proprietà termiche del terreno	39
4.1	Generalità	39
4.2	Proprietà che influenzano il comportamento termico del sistema sottosuolo-sonda	40
4.3	Il profilo di temperatura nel terreno	40
4.4	Meccanismi di trasmissione del calore nel suolo	42
4.4.1	Conduzione	42
4.4.2	Convezione	43
4.4.3	Radiazione	44
4.4.4	Conduttività, capacità e diffusività del calore	44
5	Dati utilizzati e attività sperimentali	47
5.1	Generalità	47
5.2	Misure di livello e di temperatura della falda	49
5.2.1	Recupero, verifica e cernita dei dati	49
5.2.2	Attività sperimentali	51
5.2.3	Attività di monitoraggio	52
5.3	Valori di conducibilità idraulica	56
5.3.1	Recupero, verifica e cernita dei dati	56
5.3.2	Prove di portata: cenni teorici e modalità di esecuzione	56
5.4	Misure dei parametri idrochimici	66
5.4.1	Recupero, verifica e cernita dei dati	67
5.4.2	Attività sperimentali	68
5.5	Dati di conduttività termica	69
6	Cartografia tematica	73
6.1	Premesse	73
6.2	Gradiente termico	74
6.2.1	Distribuzione della temperatura profonda	74
6.2.2	Mappa del gradiente di temperatura	76
6.3	Velocità di falda	76
6.3.1	Freatimetria e gradiente idraulico	79
6.3.2	Elaborazione della conducibilità idraulica	82
6.3.3	Mappa della velocità di falda	83
6.4	Mappa della conducibilità termica	83
6.5	Flusso termico	85

7	Idoneità al geoscambio	89
7.1	Potenziale di scambio geotermico	89
7.2	Aree di salvaguardia	91
7.3	La carta di idoneità al geoscambio	91
A	Analisi dei parametri idro-chimici	95
	Bibliografia	98

Elenco delle figure

1.1	Tutela dei corpi idrici sotterranei, territori comunali con acquiferi confinati pregiati da sottoporre a tutela (Indirizzi di Piano - Regione Veneto)	8
1.2	Zonizzazione del territorio vicentino per la realizzazione degli impianti a circuito chiuso	10
1.3	Classificazione delle Risorse Geotermiche - quadro riassuntivo.	13
2.1	Diagramma con l'utilizzazione dei fluidi geotermici (Lindal, 1973, mod)	17
3.1	Ubicazione del dominio oggetto di studio (in rosso).	24
3.2	Comuni afferenti all'area di interesse.	25
3.3	Distribuzione delle stazioni metereologiche ARPAV nella Provincia di Vicenza.	26
3.4	Mappa delle isoterme medie annuali nel territorio della provincia di Vicenza.	27
3.5	Andamento delle medie di precipitazione e temperatura delle stazioni ARPAV nel territorio vicentino, ricavate nel ventennio 1994-2014.	28
3.6	Il bacino dell'Agno-Guà, da R. Fabiani, 1939, parzialmente modificato (Antonelli, 1990).	29
3.7	Carta geolitologica del sistema Agno-Chiampo-Guà (semplificata da Carta Geolitologica d'Italia alla scala 1:100.000, Foglio n.49 Verona) (Antonelli, 1993).	30
3.8	Curva granulometrica cumulativa (R.Antonelli, 1990).	31
3.9	Modello idrogeologico dell'alta e media pianura Veneta (A.Dal Prà, 1985).	33
3.10	Carta idrogeologica dell' alta pianura Veneta, particolare tra Astico e Brenta (Passadore, Università degli Studi di Paodva, 2010).	34

3.11	Schema dei rapporti idraulici tra falda acquifera e fiume (A. Dal Prà, 1995).	35
3.12	Disposizione dei piezometri per il monitoraggio della falda lungo il Brenta.	36
3.13	Grafici dei monitoraggi dei livelli di falda in corrispondenza del Brenta.	37
3.14	Ambiente caratteristico di risorgiva.	38
4.1	Andamento della temperatura del suolo in funzione del tempo e al variare della profondità.	41
5.1	Distribuzione della rete piezometrica utilizzata per le misure freaticometriche e di temperatura.	50
5.2	Esempio di organizzazione del database nelle relative monografie (dipartimento ICEA, Università degli Studi di Padova).	51
5.3	Freatimetro utilizzato nelle uscite di misura freaticometrica e di temperatura.	53
5.4	Distribuzione nel territorio vicentino delle stazioni di monitoraggio.	54
5.5	Dispositivi automatici. (a)Diver; (b) teletrasmissa.	54
5.6	Esempi di monitoraggio del livello e di temperatura delle acque sotterranee in diverse zone.	55
5.7	Distribuzione spaziale dei siti in cui sono definiti i valori di conducibilità del primo acquifero.	57
5.8	Esempio di grafico portata/abbassamento generato da una prova SDT.	61
5.9	Componenti dell'abbassamento totale di un pozzo in pompaggio alla portata Q (da: D.K. TODD - GROUNDWATER HYDROLOGY).	62
5.10	Esempio di interpretazione dei dati basato su sovrapposizione dei dati di prova con la curva di Theis.	66
5.11	Distribuzione dei punti campionati a marzo 2014.	68
5.12	Bailer utilizzato per i campionamenti, ove non presente rubinetto.	69
5.13	Distribuzione delle stratigrafie considerate per la valutazione della conducibilità termica.	70
5.14	Esempio di rappresentazione stratigrafica.	71
6.1	Mappe di temperatura per profondità superiori a dieci metri.	75

6.2	Distribuzione dei punti utilizzati per l'elaborazione del gradiente termico.	77
6.3	Mappa della distribuzione del gradiente termico: variazione di temperatura ogni 100 m.	78
6.4	Carte freaticometriche elaborate a partire dai dati ottenuti dalle attività sperimentali.	80
6.5	Monitoraggio dei livelli di falda: localizzazione dei livelli relativi alle tre campagne freaticometriche.	80
6.6	Distribuzione spaziale del gradiente idraulico relativo al mese di agosto 2013.	81
6.7	Distribuzione spaziale della conducibilità idraulica del livello acquifero freatico elaborata a partire dai valori ottenuti dalle prove di pompaggio.	82
6.8	Carta tematica della velocità di falda in m/g.	84
6.9	Carta tematica della conduttività termica (W/mK).	87
6.10	Carta tematica del flusso termico (W/m ²).	88
7.1	Carta della capacità al geoscambio.	90
7.2	Individuazione dei comuni da sottoporre a tutela ai fini dei prelievi idropotabili e ubicazione delle prese acquedottistiche.	92
7.3	Carta di idoneità al geoscambio.	93
A.1	Diagramma di Piper: percentuale dei parametri idro-chimici.	96
A.2	Mappe di distribuzione dei parametri idrochimici.	97

Elenco delle tabelle

5.1	Tabella esempio sull'organizzazione del database stratigrafico.	70
6.1	Caratteristiche di conducibilità idraulica dei terreni (da Casagrande e Fadum, 1940).	83
6.2	Caratteristiche termometriche dei terreni (VDI,2010).	86
7.1	Profondità delle falde sa sottoporre a tutela nella provincia di Vicenza (Art. 121 D.Lgs. 3/04/2006 n. 152).	92

Capitolo 1

Inquadramento normativo

1.1 Normativa europea

La legislazione dell'Unione Europea relativa all'energia si è basata per anni sulle aree di influenza relative al mercato interno. A seguito di uno specifico titolo nel Trattato di Lisbona, entrato in vigore dal 1 Dicembre 2009, l'energia è diventata un'area di competenza condivisa tra le istituzioni UE e gli stati membri. Le linee guida che delineano la politica adottata dall'UE in merito a tale tematica vengono citate nell'Articolo 194 del Trattato di Funzionamento dell'Unione Europea:

“Nel quadro dell'instaurazione o del funzionamento del mercato interno e tenendo conto dell'esigenza di preservare e migliorare l'ambiente, la politica dell'Unione nel settore dell'energia è intesa, in uno spirito di solidarietà tra Stati Membri, a:

- garantire il funzionamento del mercato dell'energia,
- garantire la sicurezza dell'approvvigionamento energetico nell'Unione,
- promuovere il risparmio energetico, l'efficienza energetica e lo sviluppo di energie nuove e rinnovabili,
- promuovere l'interconnessione delle reti energetiche.”

Tale disposizione autorizza, dunque, i decisori UE a legiferare su alcuni aspetti che possono direttamente o indirettamente influenzare la geotermia a bassa entalpia.

Di seguito vengono percorse le principali norme UE rilevanti per la geotermia a bassa entalpia:

- **Direttiva 2009/28/EC** sulla promozione dell'energia da fonti rinnovabili;
- **Rifusione Direttiva 2010/31/EU** sulla prestazione energetica degli edifici;
- **Direttiva 2012/27/EU** sull'efficienza energetica;
- **Rifusione Direttiva 2009/125/EC** relativa all'istituzione di un quadro per l'elaborazione di specifiche per la progettazione ecocompatibile dei prodotti connessi all'energia;
- **Rifusione Direttiva 2010/30/EC** in merito al consumo di energia e di altre risorse dei prodotti connessi all'energia, mediante l'etichettatura e informazioni uniformi relative ai prodotti;
- **Direttiva 2002/91/CE** sul rendimento energetico dell'edilizia;
- **Direttiva 2000/60/EC** che istituisce un quadro per l'azione comunitaria in materia di acque;
- **Direttiva 2006/118/EC** sulla protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento e dal deterioramento.

Dai dati pubblicati dallo European Renewable Energy Council (EREC) la diffusione della tecnologia è direttamente proporzionale agli incentivi che vengono forniti dal Paese per l'installazione dell'impianto di geoscambio. Si osserva infatti che in Italia le installazioni sono circa un terzo rispetto agli impianti in Austria, che prevede incentivi a fondo perduto, o in Svezia, che impone severe tassazioni per l'utilizzo di combustibili fossili negli impianti di riscaldamento.

A titolo di esempio vengono delineati a seguire gli elementi salienti della normativa svizzera e tedesca nell'ambito della regolamentazione delle pompe di calore per le sonde geotermiche.

Normativa svizzera La Svizzera è uno dei paesi maggiormente utilizzatori di impianti di geoscambio. La legge che disciplina l'utilizzazione della risorsa geotermica porge l'attenzione sull'influenza che un impianto di geoscambio può comportare sull'immediato intorno della zona di perforazione: connessione tra i diversi livelli di falda e la contaminazione tra acque di alta qualità con acque di qualità inferiore, soprattutto in caso di prelievo

a scopi potabili. Il territorio viene diviso in zone di protezione sulla base delle quali si stabilisce dove è possibile o meno l'installazione di un impianto geotermico.

Normativa tedesca La direttiva tedesca VDI 4640 di fatto è la più importante a livello europeo in merito alla regolamentazione dell'installazione di impianti di geoscambio. Essa infatti viene assunta come riferimento standard in molti paesi europei, che ne adottano le principali linee guida. Tale direttiva fornisce i principi e le disposizioni in merito alle tecnologie da utilizzare per la costruzione degli impianti geotermici, fornendo inoltre i suggerimenti per la scelta del tipo di sistema da installare. Vengono anche indicati i parametri idraulici e idrochimici che devono caratterizzare le acque nel caso di circuito aperto. Si pone, inoltre, particolare attenzione agli aspetti ambientali. Di fatto la direttiva VDI rappresenta lo *stato dell'arte* per quanto riguarda la tecnologia d'installazione degli impianti di geoscambio.

1.2 Normativa nazionale e regionale

Allo stato attuale non vi sono leggi in Italia che trattano l'argomento nello specifico. Pertanto la normativa vigente assegna le competenze in merito alla regolamentazione per quanto riguarda l'installazione di sonde geotermiche alle singole Regioni nell'ambito della difesa del suolo e tutela delle acque. Di fatto, solo alcune Regioni o Province hanno stabilito direttive in merito.

Le norme che si applicano ai sistemi di geoscambio fanno riferimento a due ambiti: lo sfruttamento delle acque pubbliche e la disciplina degli scarichi.

I principali riferimenti normativi statali vengono di seguito elencati:

- **R.D. n.1443 del 29/07/1927** *Norme di carattere legislativo per disciplinare la ricerca e la coltivazione delle miniere nel regno.*
- **R.D. n.1775 del 11/12/1933** *Norme sulle derivazioni e sulle utilizzazioni delle acque pubbliche.*
- **D.P.R. n.395 del 27/05/1991** *Approvazione del regolamento di attuazione della legge 9 dicembre 1986, recante disciplina della ricerca e della coltivazione delle risorse geotermiche.*

- **D.P.R. n.485 del 18/04/1994** *Regolamento recante la disciplina dei procedimenti di rilascio di permesso di ricerca e concessione di coltivazione delle risorse geotermiche di interesse nazionale.*
- **D.Lgs. n.152 del 03/04/2006** *Norme in materia ambientale.*
- **D.Lgs. n.22 del 11/02/2010** *Riassetto della normativa in materia di ricerca e coltivazione delle risorse geotermiche, a norma dell'articolo 27, comma 28, della legge 23 luglio 2009, n. 99.*
- **D.Lgs. n.28 del 03/03/2011** *Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE.*

Per quanto riguarda nello specifico la normativa regionale a cui fare riferimento, per il Veneto si richiamano:

- **L.R. n.40 del 10/10/1989** *Disciplina della ricerca, coltivazione e utilizzo delle acque minerali e termali.*
- **D.C.R.V. n.107 del 05/11/2009** *Piano di tutela delle acque e successive modificazioni.*
- **D.G.R. n.985 del 18/06/2013** *Ricerca e sfruttamento delle risorse geotermiche nel territorio della Regione Veneto.*

A seguito della realizzazione del progetto regionale STRIGE, la Regione ha emanato il **D.G.R.V. n. 985 del 18 giugno 2013: Presa d'atto dello studio per la realizzazione degli utilizzi delle risorse geotermiche nella Regione Veneto mediante prelievi di acqua (STRIGE) affidato ad ARPAV e adozione di prime indicazioni operative per l'applicazione della normativa vigente.** In particolare, le indicazioni operative sono presenti nell'**Allegato A** della suddetta delibera; *Ricerca e sfruttamento delle risorse geotermiche nel territorio della Regione Veneto. Prime indicazioni operative per l'applicazione della normativa vigente.* In tale allegato sono delineati i principali riferimenti normativi, le generali definizioni della materia trattata, competenze, esclusioni e procedure, al fine di dare una generale linea guida per l'installazione di sonde geotermiche.

1.2.1 Concessione di derivazione delle acque pubbliche

L'ente competente per la presentazione della concessione delle acque sotterranee è la Regione Veneto. La concessione prevede un disciplinare con clausole e condizioni di emungimento il quale si articola nei seguenti elementi:

- dati del concessionario;
- quantità di acqua da derivare;
- portata massima istantanea;
- uso a cui è destinata la risorsa idrica;
- localizzazione della presa;
- descrizione dell'opera di emungimento ed eventualmente di restituzione;
- termini per l'esercizio di lavoro;
- la durata della concessione;
- modalità e termini per il rinnovo;
- importo del canone annuo;
- indicazione sui contatori;
- prescrizioni generali.

La normativa regionale è rappresentata dal Piano di Tutela delle Acque, emanato nel 2007 e successivamente modificato, integrato dai seguenti decreti:

- **D.G.R.V. n.4453 del 29/12/2004** *Piano di Tutela delle Acque (D.Lgs. 152/1999). Misure per il raggiungimento degli obiettivi di qualità dei corpi idrici significativi (pubblicata sul BURV 1 marzo 2005, n.23).*
- **D.G.R.V. n.2267 del 24/07/2007** *Norme da porre in regime di salvaguardia: disposizioni di cui agli artt. 12, 13, 25, 31, 40, 41, 42, 43, 44 e 45 delle norme tecniche di attuazione del Piano di Tutela delle Acque.*

- **D.C.R.V. n.107 del 5/11/2009** *Piano di Tutela delle Acque.*
- **D.G.R.V. n.80 del 27/01/2011** *Norme tecniche di attuazione del Piano di Tutela delle Acque. Linee guida applicative.*
- **D.G.R.V. n.1580 del 4/10/2011** *D.Lgs. 152/2006 - DCR 107/2009 - Piano di Tutela delle Acque. Modifica degli artt. 11 e 40 delle Norme Tecniche di Attuazione.*
- **D.G.R.V. n.842 del 15/05/2012** *Piano di Tutela delle Acque, D.C.R. n.107 del 5/11/2009, modifica e approvazione del testo integrato delle Norme Tecniche di Attuazione del Piano di Tutela delle Acque (Dgr n. 141/CR del 13/12/2011).*

Tale Piano ha la finalità di garantire:

- la protezione ed il miglioramento dello stato degli ecosistemi acquatici, nonché di quelli terrestri e delle zone umide che da questi dipendono;
- un utilizzo idrico sostenibile fondato sulla protezione a lungo termine delle risorse idriche disponibili;
- una maggiore protezione dell'ambiente acquatico che ne consenta il miglioramento anche attraverso l'adozione di misure specifiche;
- il blocco e la graduale riduzione dell'inquinamento delle acque sotterranee;
- un fattivo contributo alla mitigazione degli effetti delle inondazioni e della siccità;

Alle direttive suddette, in materia di concessioni di derivazione delle acque pubbliche, si devono aggiungere ulteriori accorgimenti, da valutarsi in base alle seguenti disposizioni:

- **R.D. n.1775 del 11/12/1933** *Testo unico delle disposizioni di legge sulle acque e sugli impianti elettrici.*
- **Legge n.464 del 4/08/1984** *Obbligo di informazione al Servizio Geologico.*
- **D.Lgs n.132 del 27/01/1992** *Attuazione della direttiva 80/68/CEE concernente la protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento provocato da certe sostanze pericolose.*

- **D.Lgs n. 275 del 12/07/1993** *Riordino in materia di concessione di acque pubbliche.*
- **Legge n.36 del 5/01/1994** *Disposizioni in materia di risorse idriche.*
- **D.Lgs n.258 del 18/08/2000** *Disposizioni correttive e integrative del DL 11/5/89 n.152 in materia di tutela delle acque dall'inquinamento a norma dell'art. 1, comma 4, della L. 24/04/98/ n. 128.*
- **D.G.R.V. 17/09/2004** *Autorizzazione alla ricerca di acque sotterranee mediante la terebrazione di un pozzo e richiesta di concessione di derivazione d'acqua.*
- **D.Lgs. n.152 del 3/04/2006** *Norme in materia ambientale*

Per quanto riguarda i vincoli normativi sulle possibilità di emungimento dell'acqua di falda, le Norme Tecniche di Attuazione del PTA individuano le istanze che possono essere assentite.

Nello specifico, l'articolo 40 stabilisce che sia nei comuni di primaria tutela (allegato D) che nelle restanti porzioni di territorio regionale possono essere assentite le istanze di: *“derivazione di acque sotterranee per usi geotermici o di scambio termico, con esclusione dei territori dei comuni di cui alle Tabelle 3.21, 3.22, 3.23, 3.24 e 3.25 del paragrafo 3.6.3 degli indirizzi di Piano”*. Per quanto riguarda il territorio dell'alta pianura vicentina tutti i comuni sono considerati di primaria tutela. Le aree ad esclusione della concessione di derivazione sono quelle indicate in Figura 1.1.

1.2.2 Autorizzazioni allo scarico

La gestione delle acque a valle dell'utilizzo di una pompa di calore ad acqua di falda è regolamentata da:

- art. 103 del D.Lgs. 152/2006 nel caso di scarico sul suolo; in ambito regionale la norma di riferimento è l'art. 30, comma1, lettera e, del PTA;
- art. 104, comma 2 del D.Lgs. 152/2006 nel caso di scarico nel sottosuolo e nelle acque sotterranee; in ambito regionale la norma di riferimento è l'art. 31, comma 2, del PTA;



Figura 1.1: Tutela dei corpi idrici sotterranei, territori comunali con acquiferi confinati pregiati da sottoporre a tutela (Indirizzi di Piano - Regione Veneto)

- art. 105 del D.Lgs. 152/2006 nel caso di scarico in acque superficiali.

1.2.3 Regolamentazione provinciale

A seguito del Consiglio Provinciale, nella seduta del 31 maggio 2011, ha approvato il Regolamento provinciale sulle sonde geotermiche, in vigore dal 6 luglio 2011: *Regolamento per la realizzazione di impianti di scambio termico con sonde geotermiche a circuito chiuso (S.G.C.C.) orizzontali e verticali*. Tale Regolamento nasce dalla direttiva del PTA che prevede che i sistemi di scambio termico con il suolo che non prevedano movimentazione di acqua di falda siano soggetti ad autorizzazione da parte della Provincia. Gli aspetti oggetto di regolamentazione sono, in linea di massima:

- la localizzazione dell'impianto;
- le condizioni per l'autorizzazione;
- le modalità di realizzazione e di gestione.

Tra gli allegati presenti si menziona la zonizzazione del territorio provinciale che definisce gli ambiti della Provincia dove è possibile realizzare gli impianti a circuito chiuso, oggetto del Regolamento in questione, e dove non sia possibile l'installazione (Figura 1.2).

Si osserva, inoltre, che non sono presenti indicazioni per quanto riguarda i sistemi a circuito aperto.

1.3 Classificazione delle risorse geotermiche

Facendo riferimento all'Allegato A del Dgr n. 985 del 18 giugno 2013 si definisce "risorsa geotermica" *l'energia termica derivante dal calore terrestre estraibile mediante fluidi geotermici*.

Sulla base di quanto disposto dal D.Lgs n. 28 del 03/03/2011 l'energia geotermica, ovvero energia immagazzinata sotto forma di calore nella crosta terrestre senza alcun limite di temperatura (e quindi ubiquitaria), è considerata sempre energia da fonte rinnovabile.

Sulla base di quanto disposto dal D.Lgs. 22/2010 e dal D.P.R. 395/1991 rientrano tra le risorse geotermiche, quelle che comportano l'estrazione di fluidi geotermici con temperatura, misurata allo strato, maggiore di 15° C e connesse con la realizzazione di un progetto geotermico. Tali risorse sono

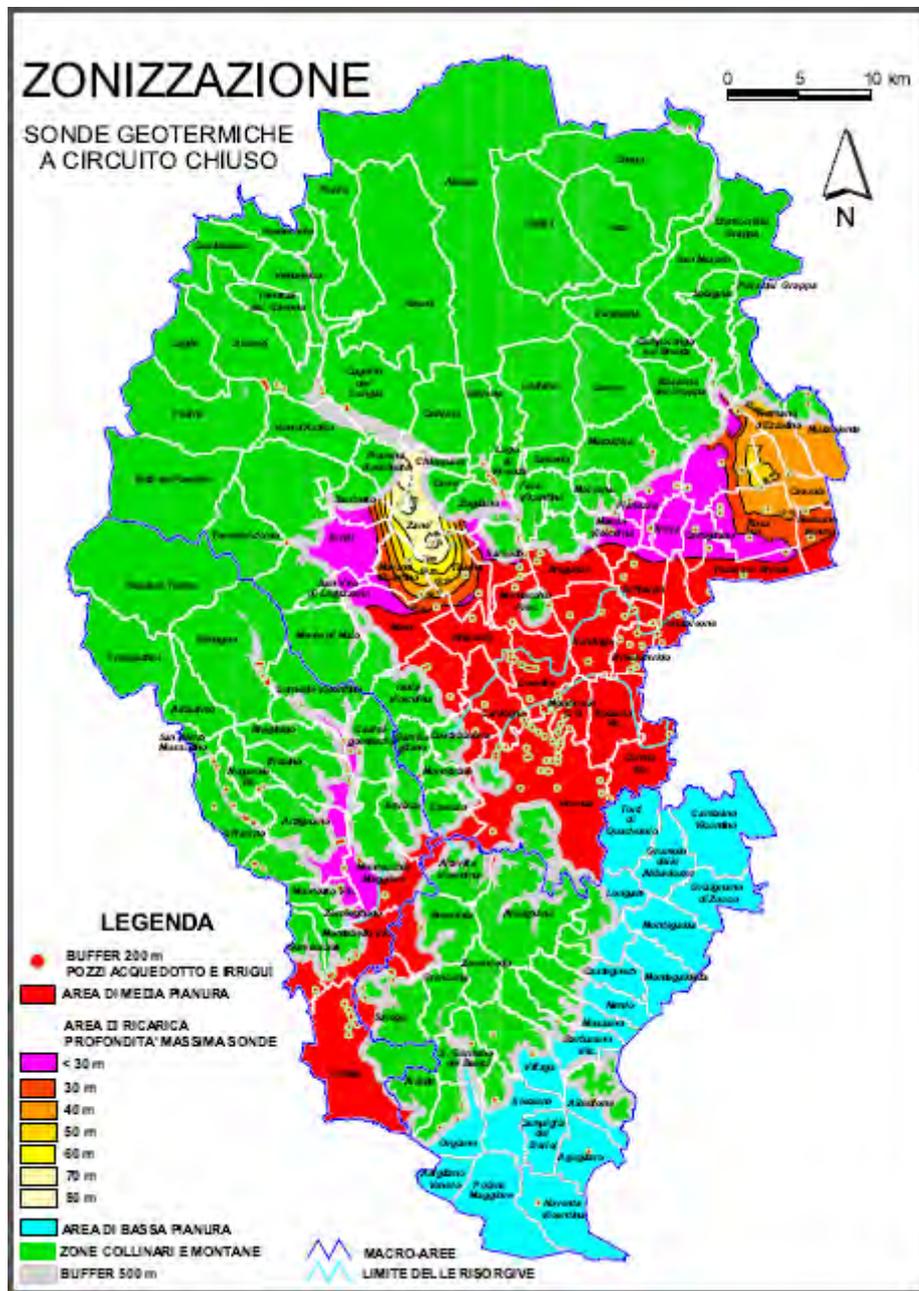


Figura 1.2: Zonizzazione del territorio vicentino per la realizzazione degli impianti a circuito chiuso

classificate sotto il profilo amministrativo in base alla potenzialità termica e alle modalità di reperimento.

In particolare:

1. sono **piccole utilizzazioni locali di calore geotermico** quelle per le quali sono soddisfatte congiuntamente le seguenti condizioni:

- consentono la realizzazione di impianti di potenza inferiore a 2 MW termici, ottenibili dal fluido geotermico alla temperatura convenzionale dei reflui di 15° C;
- sono ottenute mediante l'esecuzione di pozzi di profondità fino a 400 metri per ricerca, estrazione e utilizzazione di fluidi geotermici o acque calde, comprese quelle sgorganti da sorgenti per potenza termica complessiva non superiore a 2.000 kW termici, anche per eventuale produzione di energia elettrica con impianti a ciclo binario ad emissione nulla.

Sono altresì piccole utilizzazioni locali di calore geotermico le **sonde geotermiche** che scambiano calore con il sottosuolo senza effettuare il prelievo e la reimmissione nel sottosuolo di acque calde o fluidi geotermici.

2. sono **risorse geotermiche di interesse locale** quelle non classificabili come piccole utilizzazioni locali di calore geotermico né come risorse geotermiche di interesse nazionale. In particolare sono quelle a media entalpia (temperatura del fluido reperito compresa tra 90 e 150° C) o bassa entalpia (temperatura del fluido reperito inferiore a 90° C), o quelle economicamente utilizzabili per la realizzazione di un progetto geotermico, riferito all'insieme degli impianti nell'ambito del titolo di legittimazione, di potenza inferiore a 20 MW ottenibili dal solo fluido geotermico alla temperatura convenzionale dei reflui di 15° C.

3. sono **risorse geotermiche di interesse nazionale**

- le risorse geotermiche ad alta entalpia (temperatura del fluido reperito superiore a 150° C);
- le risorse geotermiche economicamente utilizzabili per la realizzazione di un progetto geotermico, riferito all'insieme degli impianti nell'ambito del titolo di legittimazione, tale da assicurare

una potenza erogabile complessiva di almeno 20 MW termici, alla temperatura convenzionale dei reflui di 15° C;

- le risorse geotermiche economicamente utilizzabili rinvenute in aree marine;
- i fluidi geotermici a media ed alta entalpia finalizzati alla sperimentazione, su tutto il territorio nazionale, di impianti pilota di produzione di energia elettrica con reiniezione del fluido geotermico nelle stesse formazioni di provenienza e comunque con emissioni nulle.

Il più comune criterio di classificazione delle risorse geotermiche si basa dunque sull'entalpia dei fluidi che trasferiscono il calore dalle rocce calde profonde alla superficie. L'entalpia, che può essere considerata più o meno proporzionale alla temperatura, è usata, pertanto, per esprimere il contenuto termico (energia termica) dei fluidi, e dà un'idea approssimativa del loro valore.

1.3.1 Competenze

Il D.Lgs. 22/2010 conferisce alle Regioni territorialmente competenti le funzioni amministrative riguardanti le risorse geotermiche d'interesse nazionale e locale, se non rinvenute nel mare territoriale e nella piattaforma continentale italiana, nonché le piccole utilizzazioni locali. Per le risorse geotermiche rinvenute nel mare territoriale e nella piattaforma continentale italiana e per gli impianti pilota l'autorità competente è il Ministero dello Sviluppo Economico di concerto con il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare. Nella Figura 1.3 vengono sintetizzati i criteri sopra descritti per la classificazione delle risorse geotermiche di competenza regionale.

1.3.2 Esclusioni

La vigente normativa distingue nettamente la categoria delle risorse geotermiche da quella delle acque termali che, ai sensi della L.R. 40/89, sono: "quelle che vengono utilizzate unicamente per usi terapeutici" e che possiedono una propria disciplina. Parimenti non sono risorse geotermiche le acque sotterranee caratterizzate da una temperatura pari o inferiore a 15° C, ancorché utilizzate mediante prelievo per processi di scambio termico o simili.

**RISORSE GEOTERMICHE
DI COMPETENZA REGIONALE**

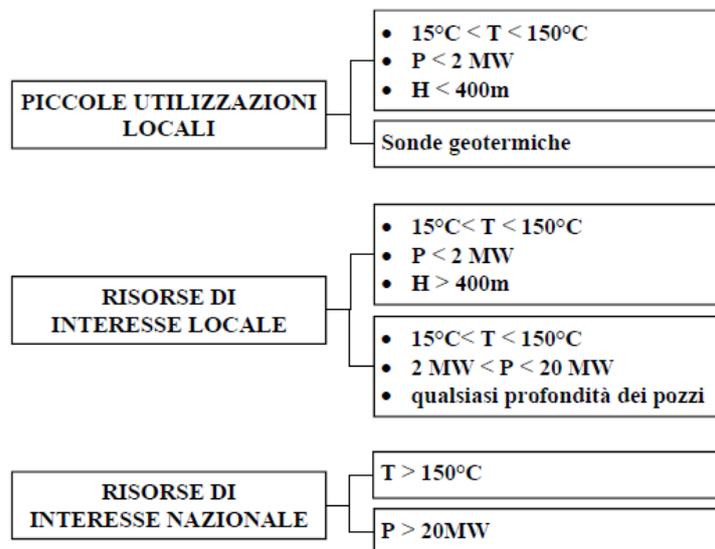


Figura 1.3: Classificazione delle Risorse Geotermiche - quadro riassuntivo.

Capitolo 2

Geotermia a bassa entalpia

2.1 Generalità

La Terra, intesa come sorgente di energia geotermica, si può considerare una fonte a disponibilità illimitata. Il flusso termico che la caratterizza è di fatto insito della sua stessa struttura. Si può generalmente considerare, come verrà spiegato più in dettaglio nei prossimi capitoli, che la temperatura, ad una certa profondità rispetto al piano campagna, si mantenga costante nel tempo, senza risentire delle variazioni climatiche stagionali, e cresca all'aumentare della profondità. In tale contesto, facendo riferimento nello specifico alla situazione climatica del territorio vicentino, che verrà descritta nel prossimo capitolo, si può affermare che la risorsa geotermica risulta un'ottima sorgente energetica. La differenza di temperatura tra il sottosuolo e l'ambiente esterno si può, infatti, considerare come il motore che favorisce lo scambio geotermico: la temperatura in profondità, valutata a circa 100 m dal piano campagna per le finalità del presente studio, risulta, in genere, più fredda della temperatura estiva media che si riscontra in superficie; in inverno si appura una situazione contraria. Si intuiscono allora le maggiori potenzialità di tali sistemi rispetto agli usuali sistemi di riscaldamento/refrigeramento che sfruttano l'aria esterna, i quali risultano molto meno efficienti. Le caratteristiche della risorsa geotermica sopra menzionate contribuiscono in maniera determinante all'efficienza dei sistemi di geoscambio, in quanto hanno il beneficio di un minor consumo, qualificandone i vantaggi economici.

Un sistema geotermico può essere schematicamente definito come un *sistema acqueo convettivo che, in uno spazio confinato della parte superiore della crosta terrestre, trasporta il calore da una sorgente termica al luogo,*

generalmente la superficie, dove il calore stesso è assorbito, disperso o utilizzato (Hochstein, 1990). Un sistema geotermico è formato fondamentalmente da tre elementi: la *sorgente di calore*, il *serbatoio* ed il *fluido*. La sorgente di calore, nel nostro caso, è il normale calore della Terra (in alcune situazioni, in cui si sfruttano alte temperature, si preleva il calore da intrusioni magmatiche). Il serbatoio è costituito dal complesso di strati naturali nei quali i fluidi possono circolare assorbendo calore. Infine il fluido costituisce il mezzo di trasporto del calore. Le leggi che regolano la convezione dei fluidi sono alla base del meccanismo dei sistemi geotermici. La convezione si attiva in seguito al riscaldamento ed alla conseguente espansione termica del fluido in un campo gravitazionale; il calore alla base del sistema di circolazione è l'energia che alimenta e muove il sistema. Il fluido caldo e di minor densità tende a salire e ad essere sostituito dal fluido più freddo e di densità maggiore, proveniente dai margini del sistema. La convezione, per sua natura, tende a far aumentare la temperatura delle parti alte del sistema, mentre la temperatura delle parti inferiori diminuisce (White, 1973).

Importante elemento da considerare nello sviluppo dei sistemi geotermici è la sua “sostenibilità” ambientale. Una definizione *per produzione sostenibile da singolo sistema geotermico* è quella offerta dall' *Orkustofnun Working Group* nel 2001: “*Per ciascun sistema geotermico, e per ciascuna modalità di produzione, esiste un certo livello di produzione massima di energia, al di sotto del quale è possibile mantenere costante la produzione di energia dal sistema per un lungo periodo (100 - 300 anni)*”. In sostanza si deve assicurare che l'impianto collegato a terreno, comporti il raggiungimento di un equilibrio termodinamico sul lungo periodo, assestando il livello di temperatura del terreno su un valore accettabile e compatibile dal punto di vista ambientale; inoltre è necessario che, una volta terminato il funzionamento dell'impianto, il terreno ritorni alle condizioni pregresse.

2.2 Utilizzazione delle risorse geotermiche

Le risorse geotermiche possono essere adatte a numerose tipologie di impiego. Come mostra il diagramma di Lindal (1973), illustrato in Figura 2.1, che mette in correlazione le temperature alle rispettive utilizzazioni. Tale rappresentazione evidenzia che la temperatura dei fluidi costituiva il principale fattore limitante la possibile utilizzazione.

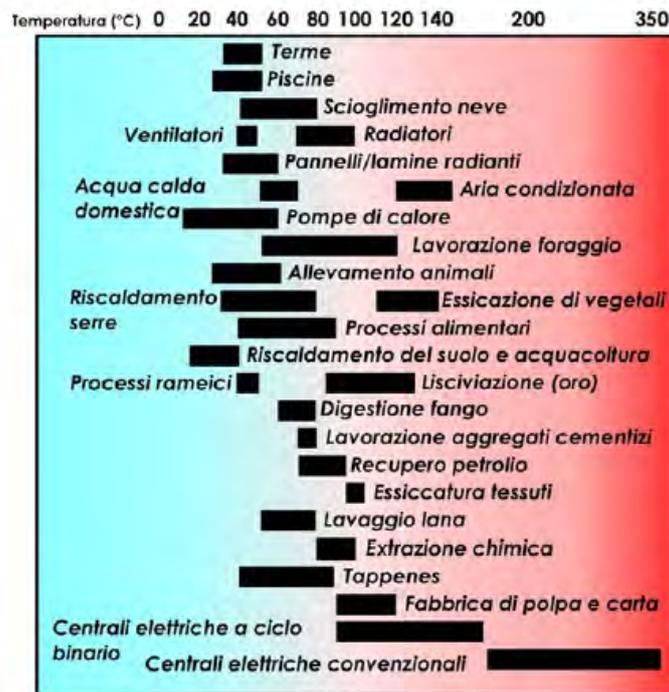


Figura 2.1: Diagramma con l'utilizzazione dei fluidi geotermici (Lindal, 1973, mod)

L'utilizzazione diretta del calore è la forma di sfruttamento dell'energia geotermica più antica, più diversificata e versatile e più comune.

Il condizionamento di ambienti (riscaldamento e raffreddamento) con l'energia geotermica si è diffuso notevolmente a partire dagli anni '80, a seguito dell'introduzione nel mercato e della diffusione delle pompe di calore. I diversi sistemi di pompe di calore disponibili permettono di estrarre ed utilizzare economicamente il calore contenuto in corpi a bassa temperatura, come terreno, acquiferi poco profondi, masse d'acqua superficiali, ecc.

Gli usi agricoli dei fluidi geotermici comprendono le coltivazioni a cielo aperto ed il riscaldamento di serre. L'acqua calda può essere usata nelle coltivazioni a cielo aperto per irrigare e/o riscaldare il terreno.* La miglior soluzione sembra quindi quella di combinare il riscaldamento del terreno e l'irrigazione. L'utilizzazione più comune dell'energia geotermica in agricoltura è, comunque, il riscaldamento di serre, che è stato sviluppato su larga scala in molti paesi.

*Il maggior problema dell'irrigazione con acqua calda sta nel fatto che, per ottenere una variazione utile della temperatura del terreno, è necessaria una quantità talmente grande di acqua, a temperatura sufficientemente bassa da non danneggiare le piante, che il terreno ne può essere allagato.

L'acquacoltura, vale a dire l'allevamento controllato di forme di vita acquatiche, in questi ultimi tempi si è diffuso notevolmente in campo mondiale, a seguito dell'ampliamento del mercato. Il controllo della temperatura di crescita per le specie acquatiche è molto più importante che per le specie terrestri.

2.3 Effetti sull'ambiente

La geotermia a bassa entalpia, intesa come fonte energetica rinnovabile, si serve di tecnologie a basso impatto ambientale. Di fatto, non esiste alcuna forma di energia utilizzabile dall'uomo che non abbia alcun impatto, diretto o indiretto, sull'ambiente. Il rischio ambientale che potenzialmente può risultare dai sistemi di geoscambio, è strettamente collegato all'impatto riscontrabile nelle acque sotterranee: potrebbero verificarsi variazioni eccessive della temperatura a causa di uno sovrasfruttamento (per mancanza di verifiche e di pianificazione); inoltre si deve porre attenzione al rischio di messa in comunicazione di acquiferi posti a diverse profondità e caratterizzati da qualità e potenzialità differenti. La valutazione degli impatti va effettuata anche in ragione del fatto che sul territorio nazionale le acque sotterranee sono storicamente destinate soprattutto all'approvvigionamento potabile che, in base alle normative vigenti, riveste carattere di priorità.

Va valutato quindi l'impatto che le fasi di installazione possono comportare. Il primo effetto avvertibile sull'ambiente è quello prodotto dalla perforazione, sia dei pozzi sperimentali eseguiti per le valutazioni preliminari di fattibilità del progetto sia dei pozzi di produzione finale. Anche in fase di utilizzazione c'è il potenziale rischio di contaminazione da parte dei fluidi geotermici (soprattutto per quanto riguarda i sistemi a circuito chiuso).

Per minimizzare gli effetti sull'ambiente di tali impianti, occorre adoperare alcuni accorgimenti:

- per le piccole utenze, la perturbazione termica indotta diventa trascurabile già a distanza di pochi metri dall'impianto; i grandi impianti possono minimizzare questo effetto con una corretta progettazione; è opportuno prevedere un monitoraggio delle temperature del sottosuolo per seguire nel tempo il fenomeno (già previsto da molti regolamenti autorizzativi);

- la perforazione eseguita da operatori specializzati ed a valle di uno studio geologico appropriato del sito interessato dall'impianto, può garantire il ripristino delle condizioni geologiche ed idrogeologiche locali precedenti alla realizzazione dell'impianto;
- le possibilità di perdita del fluido termovettore da parte di una sonda geotermica realizzata a regola d'arte sono bassissime (aspettativa di servizio 70-100 anni) e gli effetti di una eventuale dispersione sono minimi in impianti dotati degli opportuni accorgimenti tecnici (già previsti da molti regolamenti autorizzativi).

Entrando nello specifico, la situazione nel territorio vicentino risulta particolarmente delicata, in quanto l'approvvigionamento idrico potabile è strettamente collegato alle risorse idriche sotterranee. Si deve porre, quindi, la massima attenzione, pianificando e controllando le installazioni, appoggiandosi ad una conoscenza di base del contesto ambientale. Per questo è essenziale ricorrere a una descrizione dettagliata a livello locale delle diverse potenzialità. Di fatto, la valutazione territoriale della potenzialità geotermica, abbinata a studi di dettaglio e a ulteriori ricerche relative agli effetti di tali impianti, permette di controllare i possibili pericoli di sovrautilizzo e/o il danneggiamento della risorsa idrica.

Per concludere, si vuole ricordare che *lo sviluppo sostenibile è uno sviluppo che soddisfa i bisogni del presente senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare i propri* (G.H. Brundtland, WCED 1987).

2.4 Impianti geotermici

La funzione di un impianto geotermico è quella di produrre acqua (o aria) calda o fredda a seconda dei casi. Si compone, principalmente, di tre elementi:

- il sistema di captazione del calore;
- la pompa di calore;
- il sistema di distribuzione.

Il *sistema di captazione del calore* è costituito da tubazioni inserite nel sottosuolo, con lo scopo di assorbire e trasportare il calore. I principi di funzionamento si possono sostanzialmente dividere in due:

- tubazione che mette in circolazione un fluido termovettore, in grado di accumulare e trasportare calore. Tale sistema è proprio degli impianti geotermici a circuito chiuso, o closed-loop;
- una tubazione che preleva l'acqua di falda accoppiata a una eventuale reimmissione oppure a uno scarico in recettore superficiale. Tale funzionamento è tipico dei sistemi a circuito aperto o open-loop.

La *pompa di calore* è classicamente definita come un'installazione che, operando con continuità, preleva calore da una sorgente a temperatura più bassa, e lo rende disponibile per utilizzo esterno ad una temperatura mediamente superiore. Le pompe di calore di norma sono reversibili e funzionano in ciclo estivo come condizionatori; inizialmente erano delle macchine frigorifere progettate per applicazioni in raffrescamento in cui semplicemente veniva introdotta, tramite una valvola, la possibilità di invertire il ciclo. Ci sono diverse classificazioni delle pompe di calore: in base al tipo di ciclo termodinamico, sulla base del tipo di alimentazione oppure a seconda della sorgente termica. Si può comunque delineare un funzionamento generale. Essa infatti assorbe calore proveniente dal fluido nelle sonde, facendolo evaporare in un evaporatore. Un compressore successivamente ne innalza la temperatura. Infine tale calore viene ceduto all'ambiente d'utilizzo attraverso un condensatore, che è collegato all'impianto di distribuzione. In un impianto geotermico domestico, la pompa di calore è in grado di portare la temperatura dell'acqua dagli 8 - 12° C del fluido vettore ai circa 35 - 40° C dell'acqua che circola nei pannelli radianti dell'impianto di distribuzione. In estate, invece, la temperatura dell'acqua di climatizzazione può essere fino a 8 - 10° C più bassa di quella ambiente. In tale contesto va detto che il consumo di energia è relativamente basso rispetto all'energia prodotta: la geotermia fornisce il 75% di energia per le installazioni, mentre il restante 25% è assicurato dall'elettricità consumata dalla pompa di calore. Il rendimento di una pompa di calore, infatti, è dato dal cosiddetto *coefficiente di prestazione (COP)* che è definito come il rapporto tra l'energia utile e l'energia in ingresso, ovvero come rapporto fra potenza termica e potenza elettrica. Per le moderne pompe si ha almeno un COP di 4 o 5.

Per quanto riguarda il *sistema di distribuzione*, esso è costituito dall'impianto di accumulo e distribuzione, che, per le abitazioni, può essere un impianto a pavimento, a pannelli radianti, ecc.

2.4.1 Impianti a circuito chiuso

Quando si parla genericamente di impianti geotermici di riscaldamento e raffrescamento, senza ulteriori precisazioni, ci si riferisce ad impianti in cui lo scambio con il sottosuolo avviene con sistemi di scambio termico realizzati per gli impianti closed-loop, orizzontali e verticali.

Per quanto riguarda i collettori orizzontali, i tubi vengono interrati fino a 3 m di profondità, caratteristica che determina per questi impianti una forte influenza delle condizioni climatiche superficiali, inoltre altra caratteristica per cui si sta abbandonando il loro impiego è la necessità di ampi spazi per l'installazione. Il circuito chiuso viene propriamente definito in quanto non comporta il prelievo di acqua. Nelle tubazioni scorre un fluido termovettore che accumula e trasporta il calore. Il sistema di tubazioni inserite nel sottosuolo viene identificato con il termine di "sonde geotermiche". Nel caso di sonde verticali, la profondità raggiunta dalle sonde varia, in base soprattutto al tipo di suolo; solitamente si può stimare un range di variazione della profondità di installazione tra i 70 e i 150 metri.

I parametri principali che condizionano il flusso termico scambiato fra la sonda e il sottosuolo sono, evidentemente, il numero e la lunghezza delle sonde, la profondità di installazione, la distanza dei tubi.

2.4.2 Impianti a circuito aperto

I sistemi a circuito aperto usano come fluido conduttore di calore l'acqua presente nel sottosuolo. A differenza del terreno, queste sorgenti non sono disponibili ovunque e sono soggette a vincoli, limitazioni e divieti di carattere normativo, come già menzionato nel capitolo precedente.

In Italia proprio l'aspetto burocratico e amministrativo rappresenta il principale ostacolo per la realizzazione di tali impianti.

La maggior parte degli impianti open-loop realizzati utilizza uno o più pozzi. Sostanzialmente l'acqua viene emunta da un pozzo (detto pozzo di estrazione o di produzione), quindi viene scaricata con modalità diverse:

- mediante re-immissione in falda, attraverso un pozzo cosiddetto di iniezione;
- attraverso uno scarico in superficie (corso d'acqua superficiale);

- nello stesso pozzo di estrazione, nella modalità “standing column” (che minimizza la quantità di acqua scaricata nell’ambiente), prelevando al fondo del pozzo e reiniettando nella parte superficiale dell’acquifero.

In una preliminare valutazione circa la fattibilità di questo tipo di impianti, sono da valutare fattori tra i quali:

- la qualità dell’acqua e le sue caratteristiche chimiche, onde evitare possibili problemi di corrosione e occlusione degli impianti;
- le caratteristiche idrogeologiche, e quindi un’adeguata permeabilità del sottosuolo. In via del tutto generale la portata richiesta nello scambiatore primario acqua di falda-refrigerante è compresa fra 0.036 l/s/kW e 0.054 l/s/kW; questo, in casi particolarmente importanti sotto il profilo del fabbisogno energetico, può implicare notevoli quantità di acqua, dell’ordine delle decine di litri al secondo;
- lo scarico dell’acqua utilizzata, che deve rispettare le limitazioni imposte dai regolamenti locali, come evidenziato nel capitolo precedente.

Nei casi in cui la risorsa idrica sia particolarmente disponibile o nei casi di acquiferi a trasmissività idraulica elevata questi sistemi rappresentano, ove non sussistano particolari vincoli, un’ottima alternativa ai sistemi a circuito chiuso. In molti di questi casi la soluzione del “circuito aperto” è certamente più conveniente ed efficiente rispetto alla soluzione “circuito chiuso”.

Capitolo 3

Inquadramento territoriale

3.1 Inquadramento geografico

Il territorio di interesse si estende dalle pendici prealpine vicentine, fino alla linea delle risorgive. A ovest è delimitato dalla Valle del Chiampo, mentre a est è chiuso dall'alveo del Fiume Brenta. In particolare, il dominio comprende l'alta pianura vicentina posta a est dei Monti Lessini e il territorio infravallivo delle Valli dell'Agno-Guà e del Chiampo poste nel settore nord ovest della provincia (Figura 3.1). L'estensione totale del dominio è pari a circa 2000 Km².

I comuni afferenti all'area di interesse sono circa una settantina (Figura 3.2). Il territorio è caratterizzato, dal punto di vista economico-produttivo, dalla presenza di alcuni importanti centri, i quali si sono sviluppati anche grazie alla presenza di numerose risorse distribuite nel territorio.

Il territorio, sostanzialmente pianeggiante, è caratterizzato da pendenze decrescenti da nord-ovest verso sud-est inferiori all'1,5%. La zona è attraversata da alcuni corsi d'acqua il cui bacino idrografico è particolarmente esteso; tra questi, il fiume Astico con un bacino tributario a monte dello sbarramento di Meda di 556 km²; il Leogra-Timonchio con un bacino di 105 km²; il fiume Brenta con un bacino tributario a monte di Bassano di 1567 km² e l'Agno-Chiampo-Guà con un bacino di circa 200 km².

3.2 Inquadramento climatico

In generale si può affermare che il territorio in esame ha un andamento climatico semicontinentale, con inverni piuttosto freddi e umidi ed estati calde e afose.



Figura 3.1: Ubicazione del dominio oggetto di studio (in rosso).

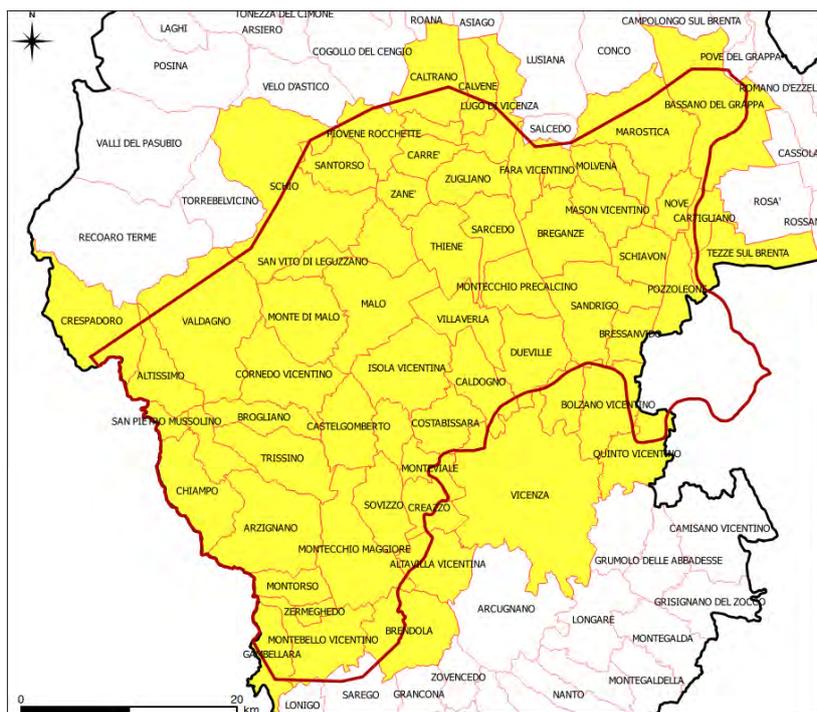


Figura 3.2: Comuni afferenti all'area di interesse.

I dati climatici sono raccolti attraverso 30 stazioni agrometeorologiche installate e gestite da ARPA Veneto.

Nonostante il dominio comprenda l'alta pianura del vicentino, al fine di una maggiore rappresentatività delle informazioni, sono state considerate tutte le stazioni presenti nel territorio della Vicenza, come si vede nella Figura 3.3.

La serie storica comprende un periodo di monitoraggio pari a vent'anni (1994-2014) e l'andamento delle precipitazioni e delle temperature dell'aria è stato valutato considerando i valori mensili, ottenendo un grafico dei valori medi del territorio (Figura 3.5 a pagina 28).

Dal grafico, si vede che la temperatura media dell'aria raggiunge dei minimi in corrispondenza di fine dicembre - inizio gennaio. I massimi dei mesi estivi, invece, raggiungono medie superiori ai 20° C. Si osserva, inoltre, maggiore piovosità nelle stagioni primaverile ed autunnale.

Dall'analisi della distribuzione spaziale delle temperature medie annuali per ogni stazione (Figura 3.4), si vede che le temperature più fredde raggiungono circa i 3° C e si riscontrano a ridosso dei rilievi, dove le minime invernali di media scendono al di sotto dello zero. Si ha un graduale aumento di temperatura procedendo verso la parte meridionale della provincia, dove si registrano medie annuali di 14.5° C.

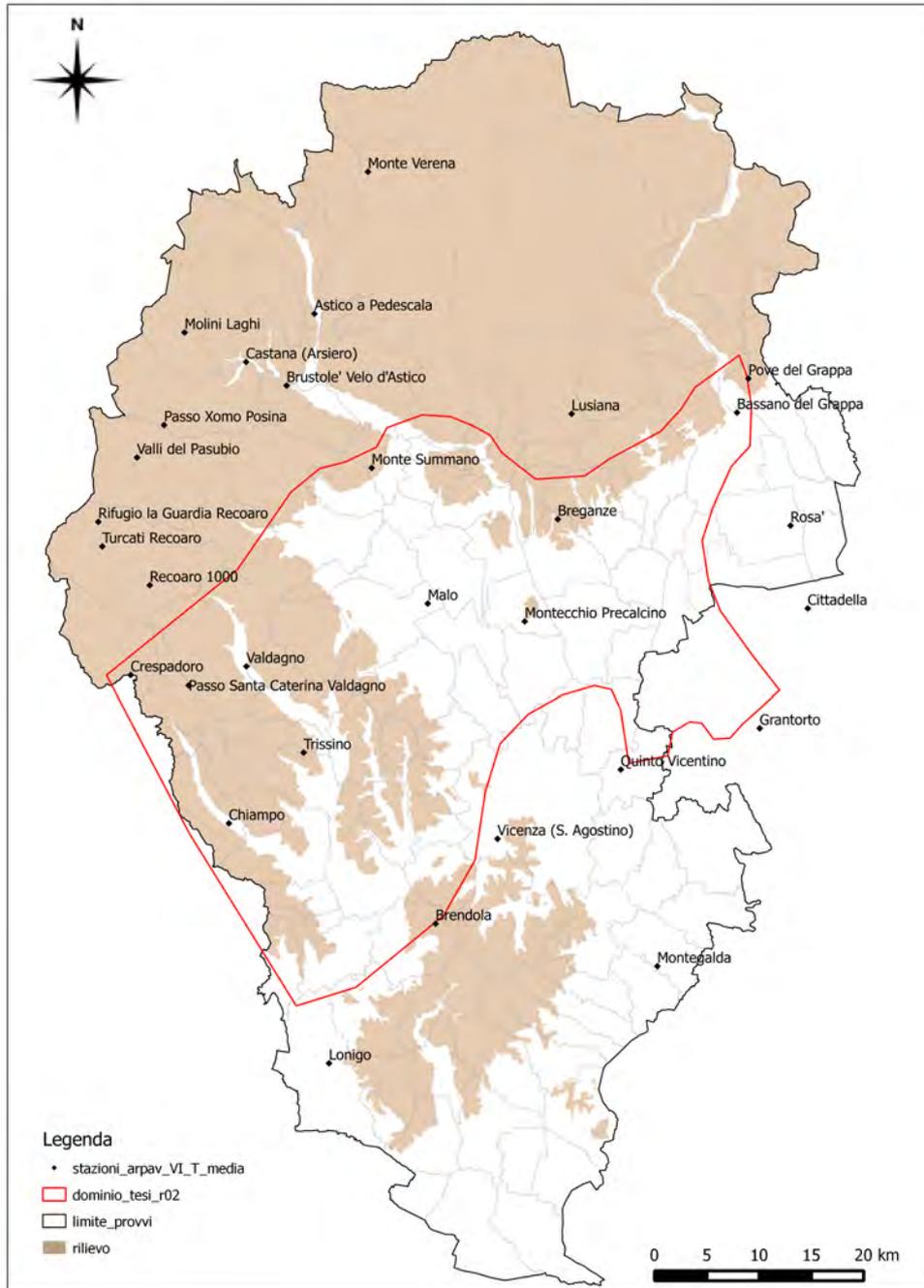


Figura 3.3: Distribuzione delle stazioni metereologiche ARPAV nella Provincia di Vicenza.

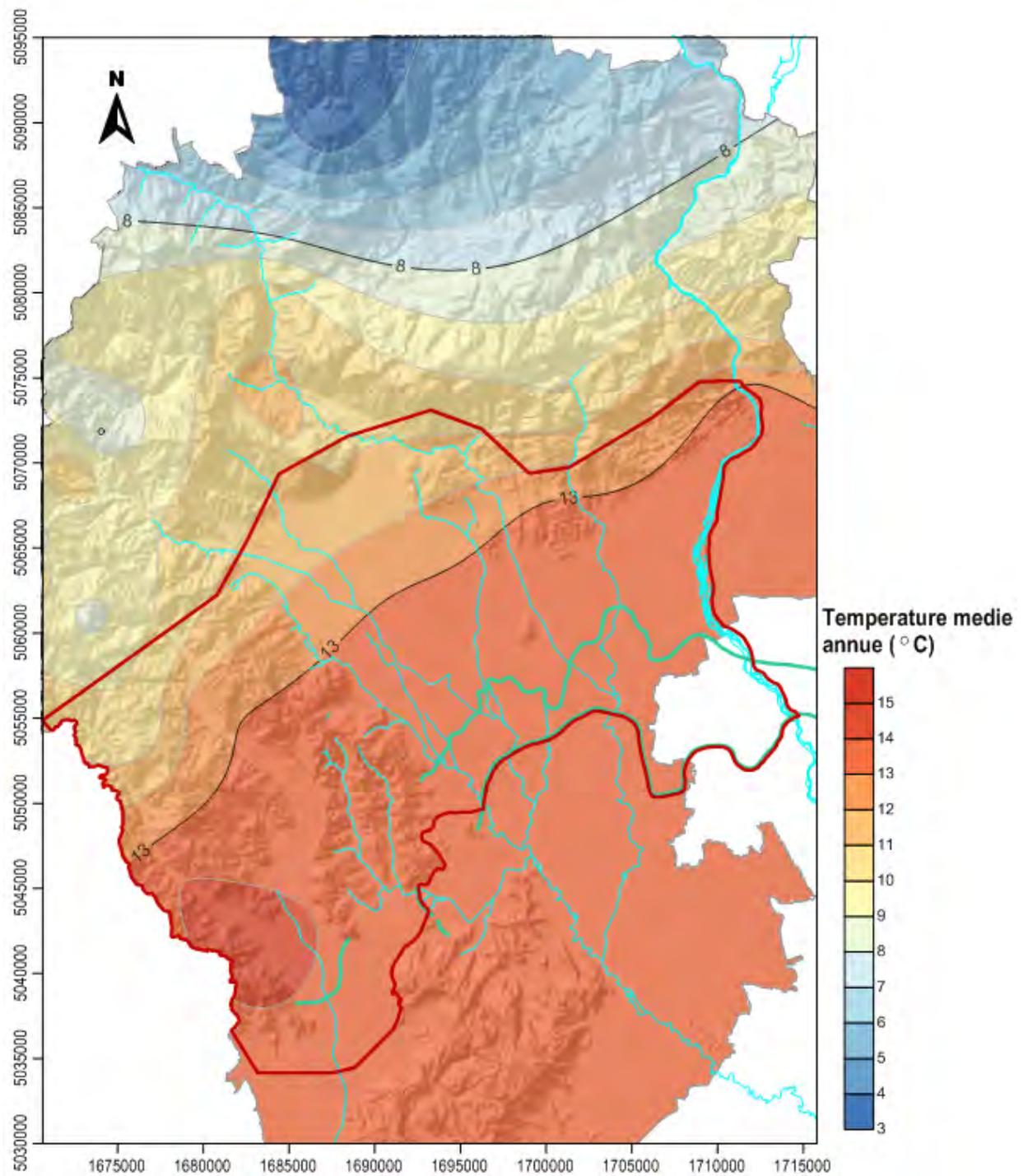


Figura 3.4: Mappa delle isoterme medie annuali nel territorio della provincia di Vicenza.

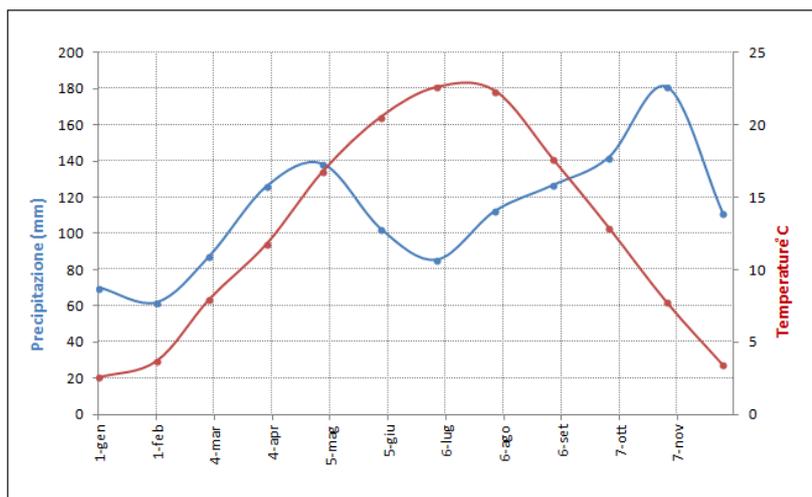


Figura 3.5: Andamento delle medie di precipitazione e temperatura delle stazioni ARPAV nel territorio vicentino, ricavate nel ventennio 1994-2014.

3.3 Inquadramento geologico

La formazione della Pianura Padano-Veneta, come quella dell'intera penisola italiana, è legata all'intensa attività orogenetica alpina. L'attuale aspetto è dovuto all'azione dei ghiacciai durante le quattro fasi della glaciazione quaternaria e delle relative fasi interglaciali (da 100.000 a 10.000 anni fa). Per quanto riguarda il dominio di interesse, nel proseguo della trattazione e ai fini della caratterizzazione geologica, si distinguono due diverse aree: il bacino dell'Agno-Chiampo-Guà e la pianura tra l'Astico e il Brenta.

3.3.1 Generalità geologiche del bacino del sistema Agno-Chiampo-Guà

Le formazioni che caratterizzano la zona del sistema Agno-Chiampo-Guà sono in parte di origine sedimentaria ed in parte di origine eruttiva. Le principali cime settentrionali di coronamento sono costituite da calcari dolomitici e Dolomia Principale, come il M. Obonte, C. Campogrosso, M. Plische e M. Baffelan (Figura 3.6).

Le alluvioni di fondovalle costituiscono l'unità idrogeologica principale per tutto il territorio (Figura 3.7).

Il materasso alluvionale è costituito da (R. Antonelli, 1990):

- lo *strato superficiale insaturo* formato dallo spessore delle alluvioni che risulta variabile e diversificato, in cui gli apporti di materiale dalle valli laterali contribuiscono a rendere ancora più eterogeneo il quadro

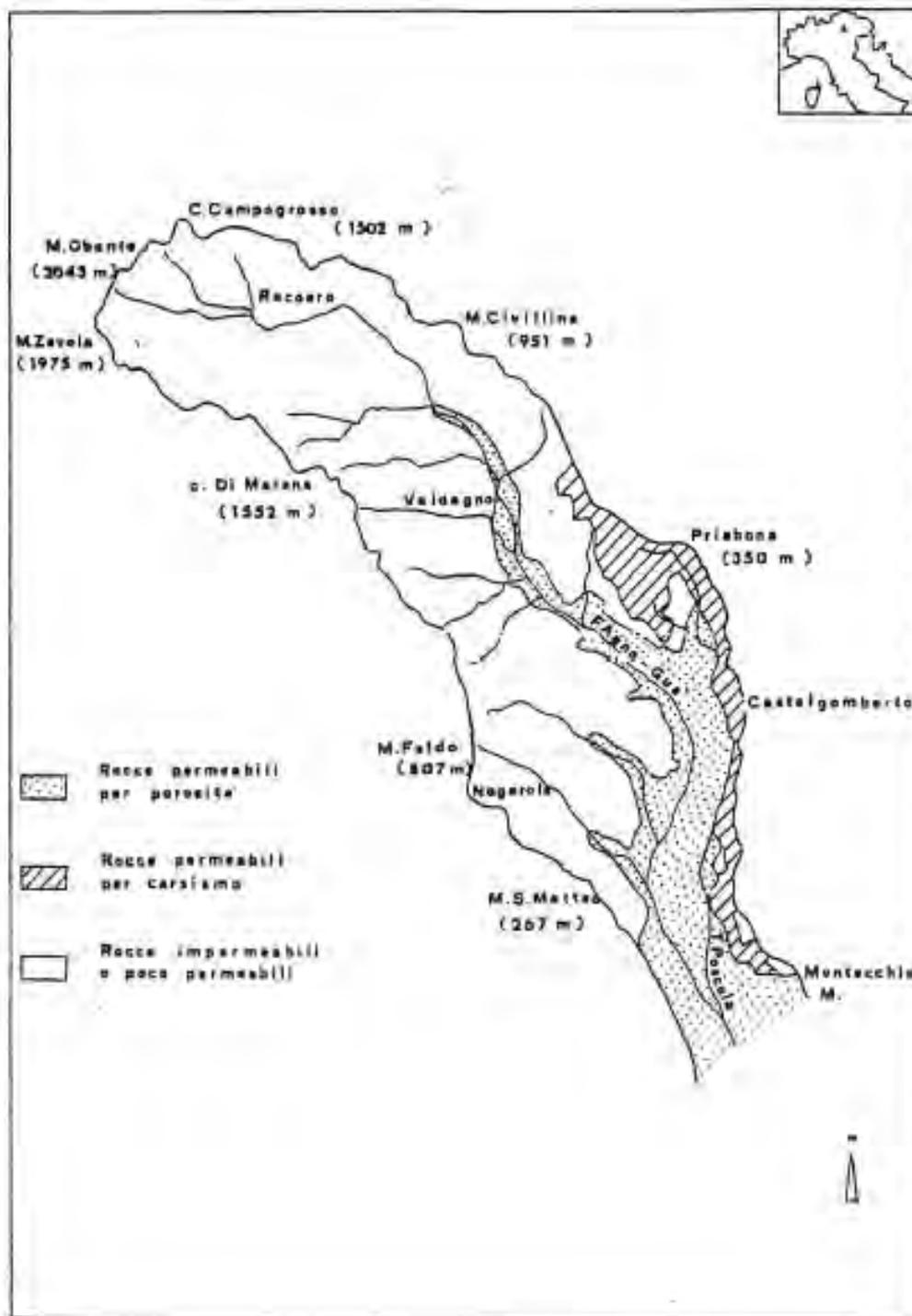


Figura 3.6: Il bacino dell'Agno-Guà, da R. Fabiani, 1939, parzialmente modificato (Antonelli, 1990).

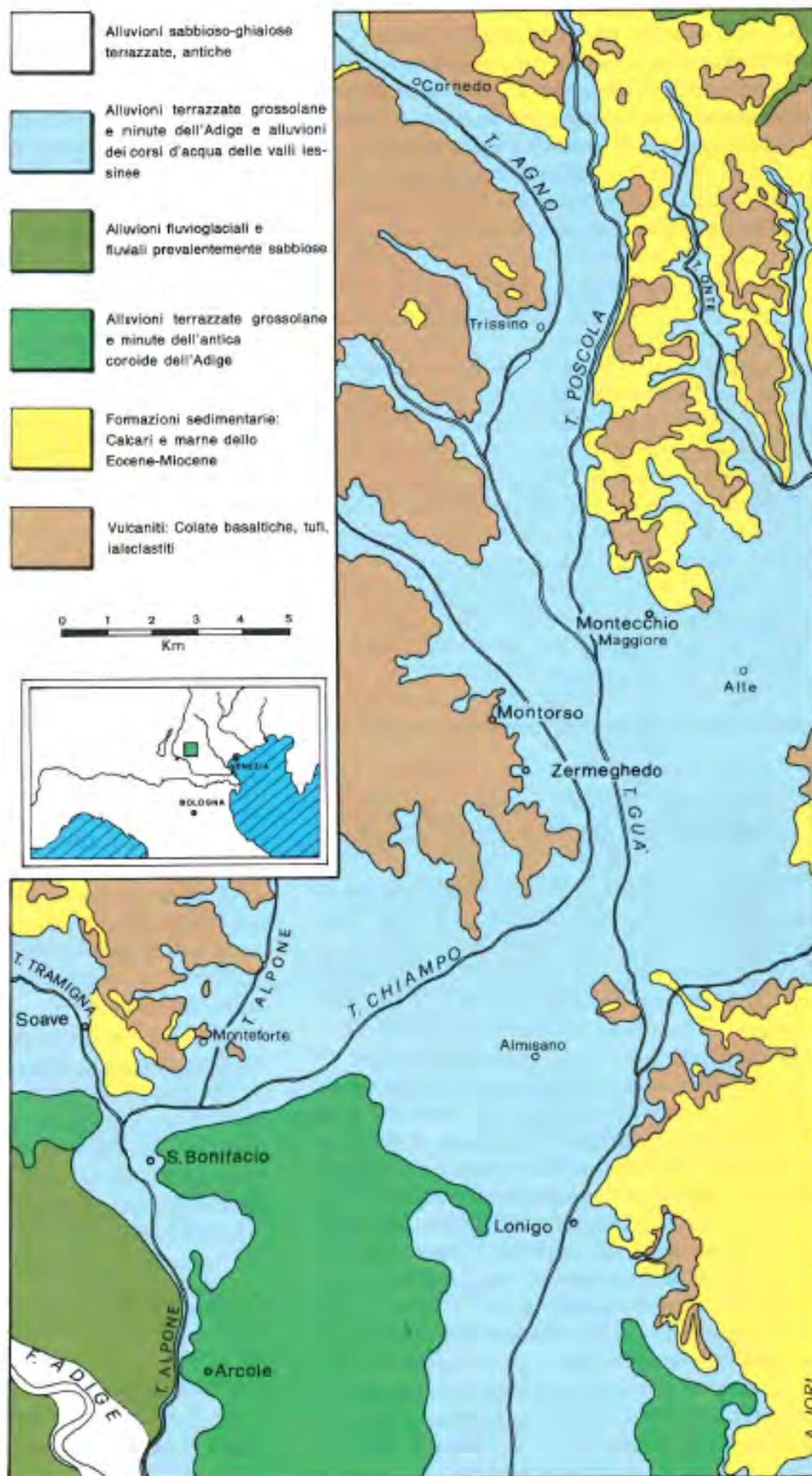


Figura 3.7: Carta geolitologica del sistema Agno-Chiampo-Guà (semplificata da Carta Geolitologica d'Italia alla scala 1:100.000, Foglio n.49 Verona) (Antonelli, 1993).

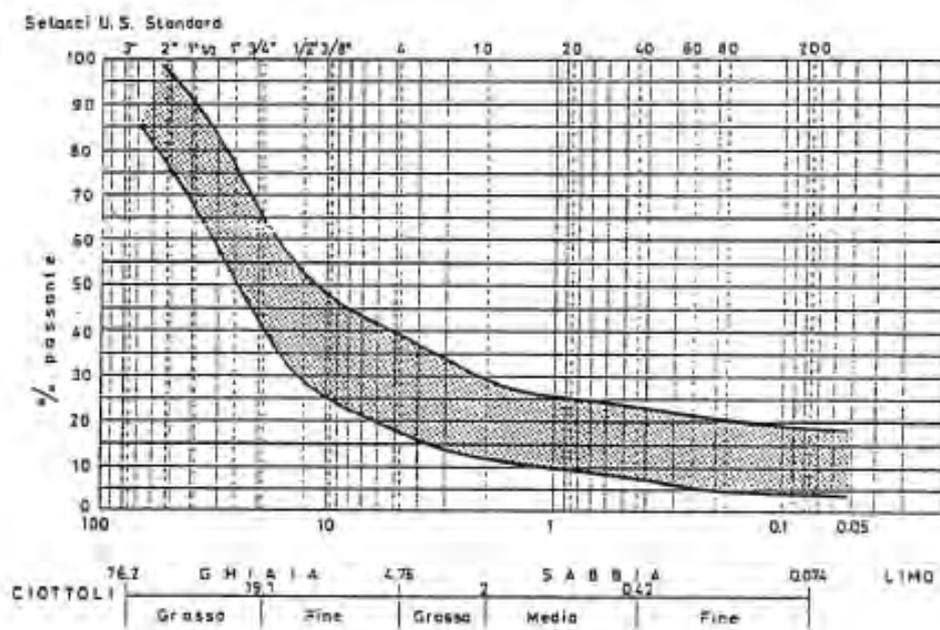


Figura 3.8: Curva granulometrica cumulativa (R.Antonelli, 1990).

stratigrafico. Tale strato è caratterizzato prevalentemente da moti di filtrazione verticali. Si rileva un'abbondante presenza di materiale fine, con aumento di percentuale da nord a sud, tra i materiali più grossolani. In definitiva si può affermare la caratteristica di un'estrema caoticità dei depositi e la loro elevata classificazione, che si può prevalentemente ripartire come segue: limi e argille con una percentuale compresa tra 4 e 17 %, sabbia tra 12 e 35 % e infine ghiaia tra 60 e 85 % (Figura 3.8).

- lo *strato profondo saturo* è, invece, caratterizzato da moti di filtrazione prevalentemente orizzontali. Su gran parte dell'area considerata, lo spessore della copertura alluvionale è superiore al centinaio di metri. Si denota la presenza di un substrato roccioso delineato da facies argillosa. La coltre dei materiali alluvionali per gran parte dell'area investigata, e almeno fino all'altezza della congiungente Montecchio Maggiore - Montorso Vicentino, pur potendo presentare localmente caratteri di elevata disomogeneità, costituisce un corpo unitario poroso e discretamente permeabile, delimitato al letto e lateralmente da condizioni di confine che, nel complesso, si possono definire nette. Procedendo verso sud, in direzione Montebello Vicentino e verso est, in direzione Alte Ceccato, si individua nettamente una fascia di

transizione nella quale i livelli argillosi e limosi acquistano progressivamente continuità longitudinale e trasversale (R. Antonelli, 1993). Su questa fascia di territorio si segnala la presenza delle *risorgive*, di cui si parlerà nel prossimo paragrafo, che confermano l'esaurimento dell'acquifero indifferenziato più superficiale.

3.3.2 Generalità geologiche della pianura compresa tra i fiumi Astico e Brenta

Anche qui il territorio è caratterizzato dalla presenza di un materasso alluvionale formato da depositi quaternari. La zona è caratterizzata da ammassi caotici di ciottoli e blocchi immersi in abbondante matrice limoso-sabbiosa. Per quanto riguarda la parte meridionale dell'Astico, si segnala la presenza di basse colline costituite in prevalenza da rocce eruttive di natura basaltica. Lungo la fascia a ridosso del versante montuoso, l'acquifero freatico poggia quasi direttamente sopra il substrato roccioso.

3.4 Inquadramento idrogeologico

Caratteristica principale dell'area di interesse è la rilevante presenza d'acqua sotterranea, che ha contribuito ad uno sviluppo sociale ed economico notevole. Tale peculiarità è da attribuire alla combinazione tra le caratteristiche geologiche descritte nella sezione precedente, e gli stretti rapporti che sussistono tra acque superficiali e acque sotterranee, che rendono possibili efficaci ricariche degli acquiferi esistenti. Le conoidi alluvionali dei diversi fiumi, interagendo tra loro nel corso del tempo, hanno sviluppato la conformazione attuale in cui il materasso indifferenziato si estende dalla base dei rilievi fino alla delimitazione formata dalla linea delle risorgive, che segna, come già detto, la comparsa di lenti limoso-argillose. Per tutto questo settore nei depositi ghiaiosi risiede l'esteso acquifero freatico indifferenziato che, in corrispondenza della linea delle risorgive, inizia a differenziarsi in falde sovrapposte. In definitiva si possono distinguere tre zone (Figura 3.9):

- la *zona di ricarica* che interessa i depositi alluvionali del quaternario;
- la *fascia delle risorgive* in cui si ha la naturale fuoriuscita dell'acqua. Qui si segna il passaggio tra acquifero indifferenziato e la comparsa delle lenti limoso-argillose;

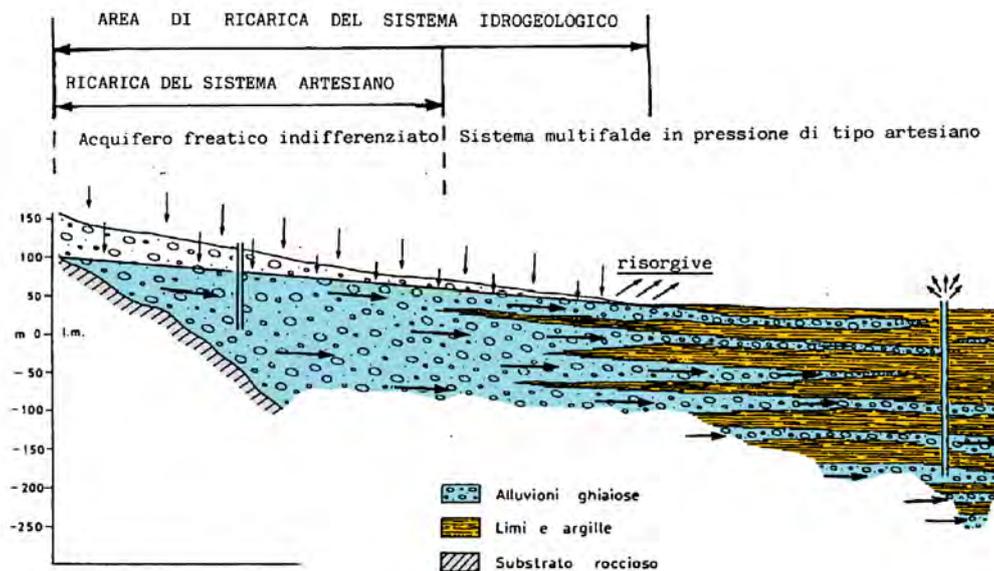


Figura 3.9: Modello idrogeologico dell'alta e media pianura Veneta (A.Dal Prà, 1985).

- la *zona di accumulo* caratterizzata dalla presenza di più falde sovrapposte.

Per quanto riguarda il presente elaborato, le zone di interesse sono le prime due.

3.4.1 Acquifero indifferenziato e freaticometria

La zona di ricarica è caratterizzata dalla presenza di un'unica falda a superficie libera che regola, da un punto di vista idraulico, le variazioni delle riserve idriche profonde verso sud. Le acque sotterranee di tale acquifero sono localmente utilizzate principalmente a scopo potabile, industriale e irriguo. Per l'elaborazione del presente studio sono state condotte diverse campagne freaticometriche, accompagnate da misure di temperatura, di cui verrà trattato in dettaglio nei capitoli successivi. Dalle elaborazioni freaticometriche si può notare che la profondità della superficie dell'acquifero varia da zona a zona, mostrando i valori maggiori al limite settentrionale e quelli minori al limite meridionale, in accordo con la stratigrafia del territorio. Come riferimento, anche al fine di un confronto con i dati rilevati, si è considerata la freaticometria elaborata nell'ambito del progetto per la messa a punto del modello di flusso della risorsa idrica sotterranea nell'alto vicentino (Figura 3.10, Passadore 2010).

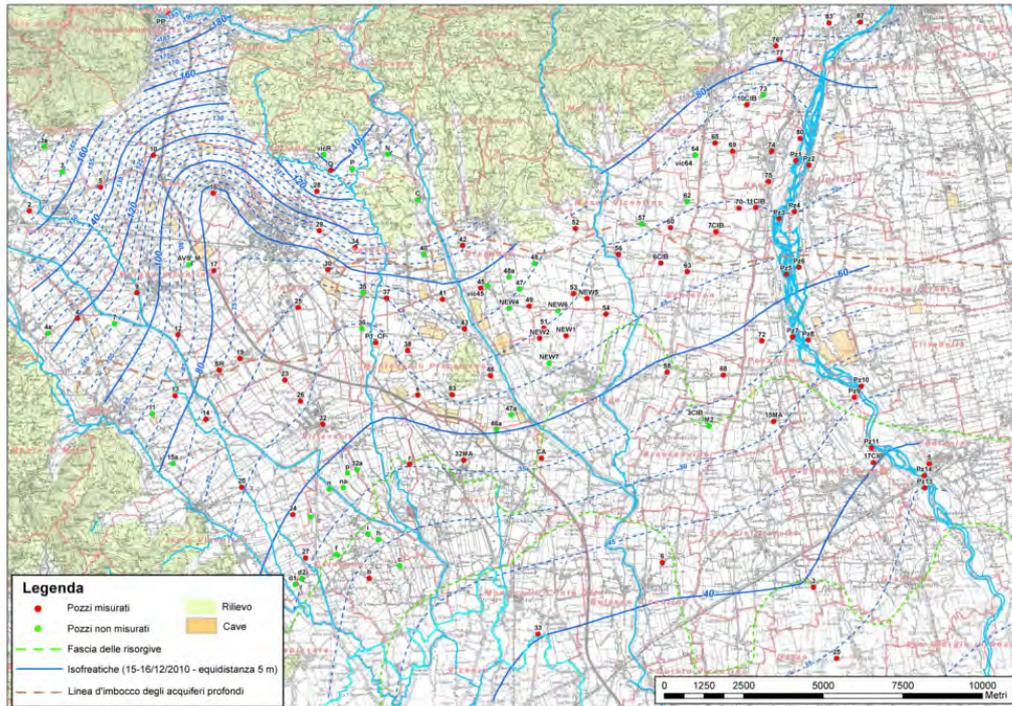


Figura 3.10: Carta idrogeologica dell' alta pianura Veneta, particolare tra Astico e Brenta (Passadore, Università degli Studi di Paodva, 2010).

Si vede come nella parte settentrionale dell'area, lungo la fascia immediatamente a ridosso dei rilievi, la morfologia della superficie freatica risulti determinata dall'andamento del tetto delle formazioni rocciose; più a valle invece, è la situazione stratigrafica dei materiali alluvionali che influisce in maniera determinante (A. Dal Prà, 1972).

Vanno inoltre segnalati i rapporti tra i corsi d'acqua e la tavola d'acqua: ad esempio si osserva il particolare rapporto del fiume Brenta con l'acquifero indifferenziato. Dall'andamento delle isofreatiche, come l'influenza del Brenta sia determinante nella caratterizzazione idrografica degli acquiferi. In particolare è evidente l'alimentazione da parte del corso d'acqua, nel tratto compreso all'incirca tra lo sbocco in pianura e la zona di Fontaniva, stimando in questo tratto una portata di dispersione di circa 10-12 m³/s. La dispersione avviene sostanzialmente in tutto il tratto interessato dall'acquifero indifferenziato nel settore di alta pianura (Figura 3.11).

Le stazioni di misura in continuo del livello di falda installate nel territorio permettono di formulare alcune considerazioni in merito alle sue oscillazioni. La superficie freatica, infatti, oscilla nel tempo in funzione delle fasi di piena e di magra della falda. Le escursioni, in generale, dipendono dalle variazioni del regime dei fattori di alimentazione della stessa: dispersioni

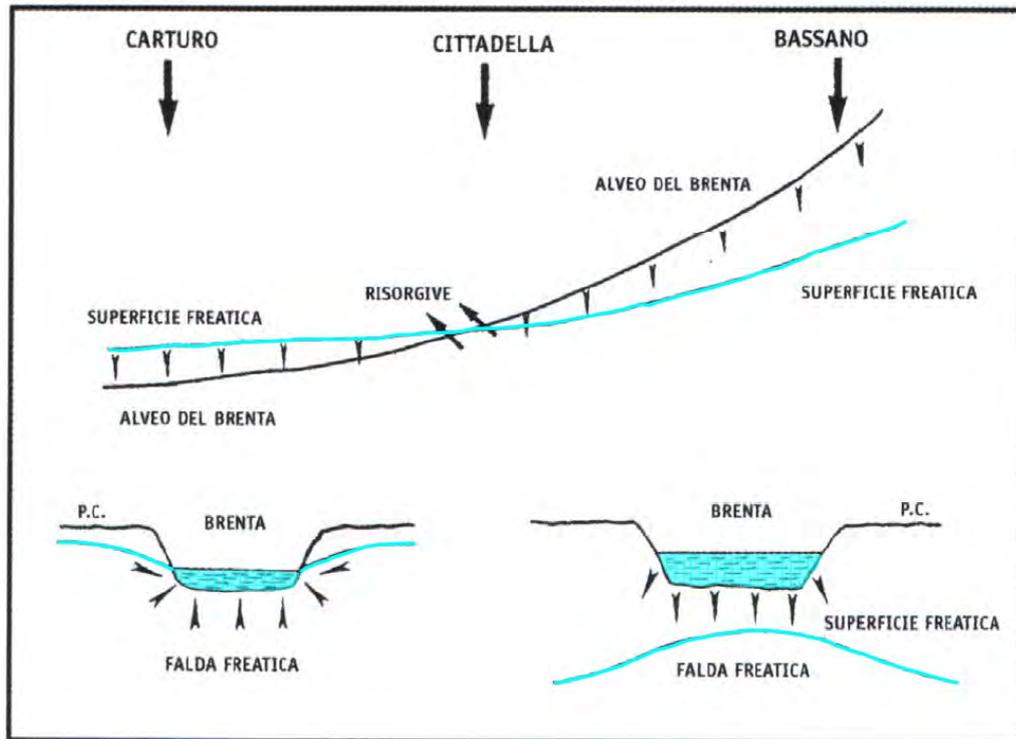


Figura 3.11: Schema dei rapporti idraulici tra falda acquifera e fiume (A. Dal Prà, 1995).

dei fiumi, irrigazione, infiltrazioni degli afflussi meteorici.

A titolo di esempio, si riportano di seguito i grafici comparativi dei livelli di falda misurati in alcuni piezometri posti lungo il Brenta (Figura 3.12). In questi grafici si evidenzia quanto già detto in merito agli andamenti delle iso-freatiche e alla dispersione del Brenta, inoltre si nota il contributo dato dagli apporti meteorici misurati nella stazione ARPAV di Rosà (Figura 3.13). Si puntualizza che i livelli del Fiume Brenta sono misurati in corrispondenza del monte di Cartigliano, subito a monte dei piezometri indicati.

3.4.2 La zona delle risorgive

Le risorgive corrispondono ad un affioramento della falda e rappresentano una caratteristica particolare del versante alpino della Pianura Padana; si estendono dal Piemonte al Friuli e si distribuiscono entro una fascia che si sviluppa in maniera pressoché parallela ai piedi dei rilievi. Le risorgive, oltre ad essere elementi naturali di particolare valenza ambientale, alimentano una serie di corsi d'acqua, primo fra tutti, nel vicentino, si menziona il Fiume Bacchiglione. Esse costituiscono, inoltre, un'importante fonte idrica, di elevata qualità, utilizzata sia a scopo irriguo che potabile; sono circondate

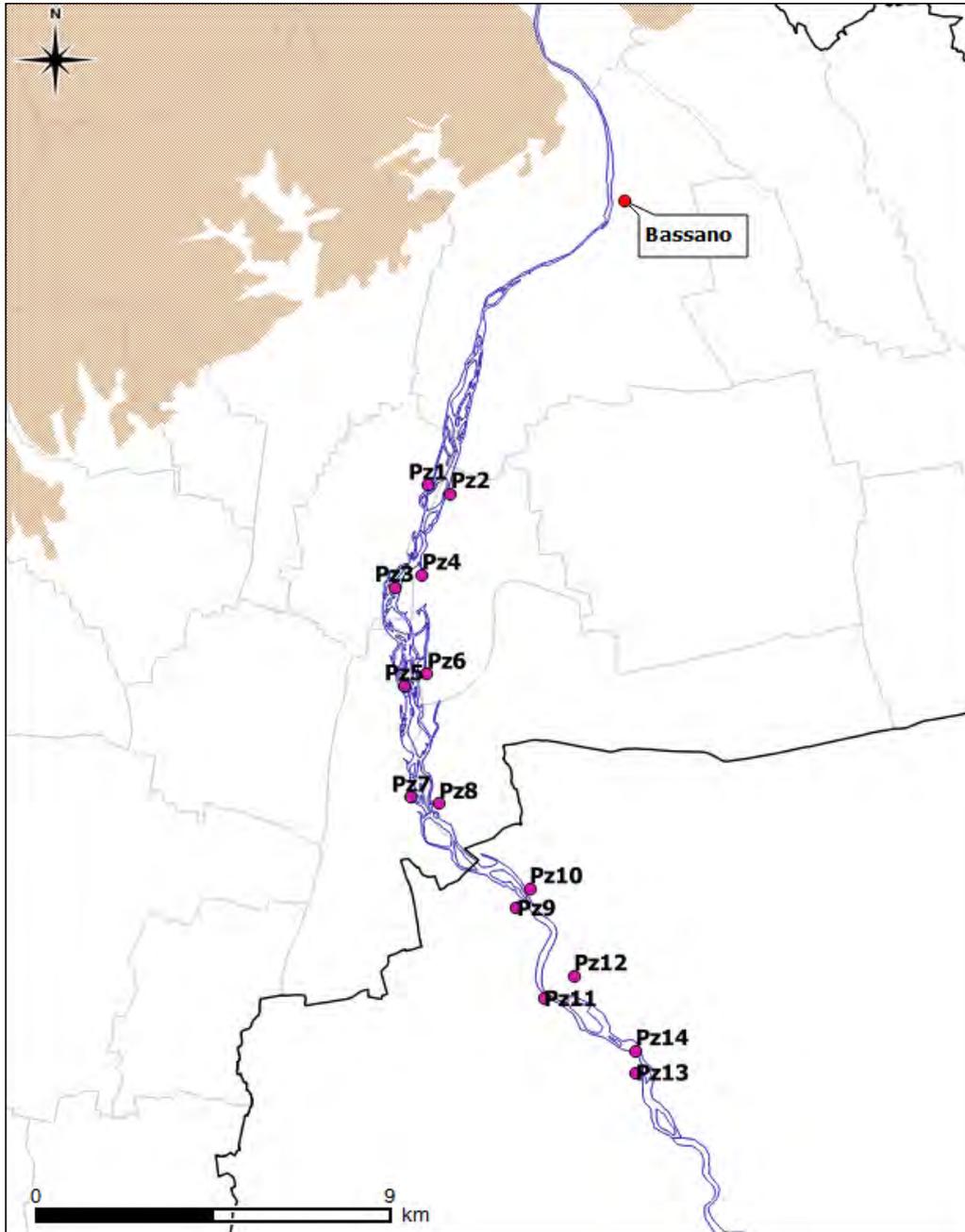


Figura 3.12: Disposizione dei piezometri per il monitoraggio della falda lungo il Brenta.

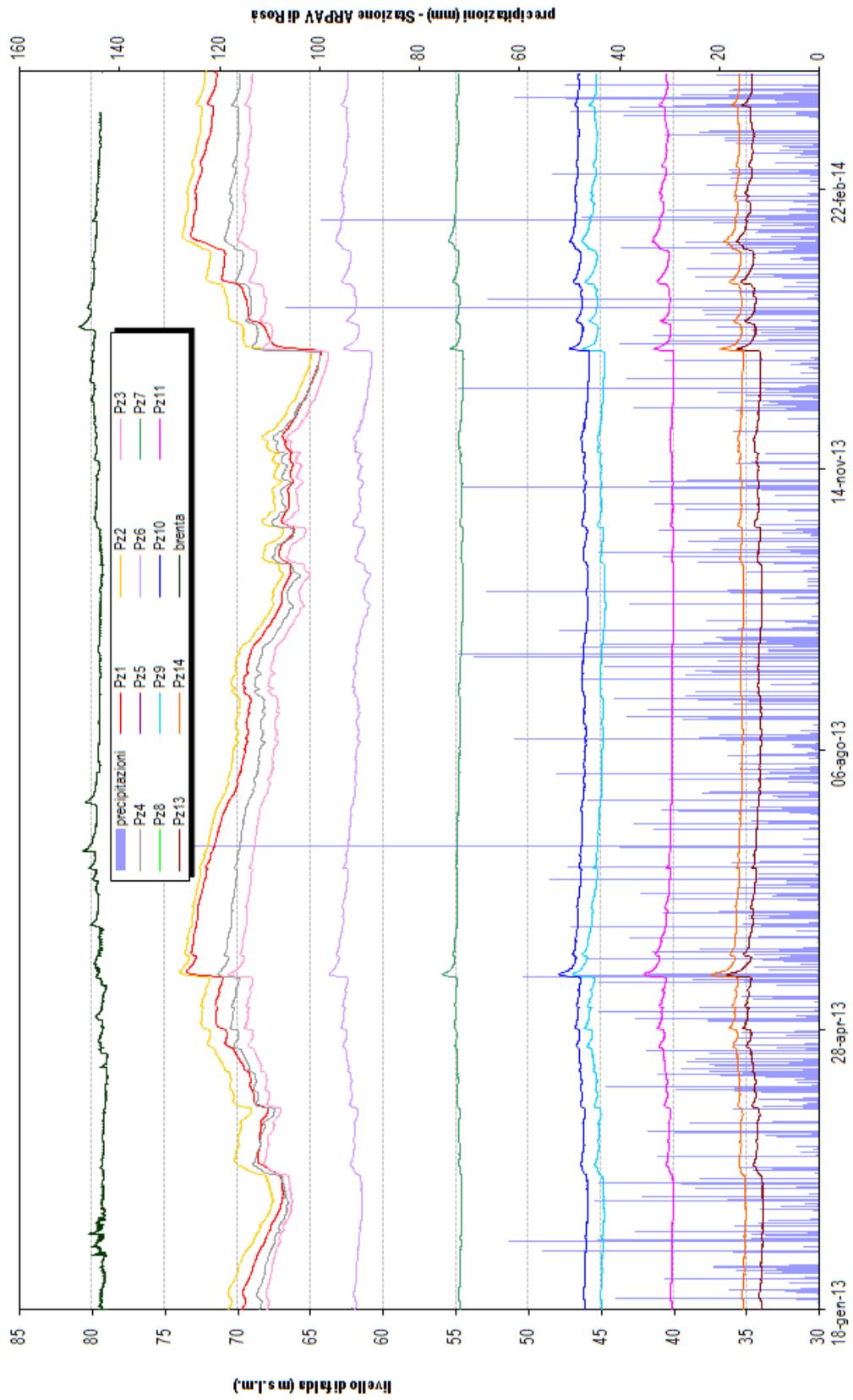


Figura 3.13: Grafici dei monitoraggi dei livelli di falda in corrispondenza del Brenta.



Figura 3.14: Ambiente caratteristico di risorgiva.

in molti casi da prati stabili irrigui, che garantiscono un impatto ambientale molto ridotto rispetto ad altre colture agrarie (Figura 3.14).

Capitolo 4

Cenni teorici sulle proprietà termiche del terreno

4.1 Generalità

Il suolo, dal punto di vista fisico-strutturale, si presenta come un sistema trifase, costituito da:

- una fase solida;
- una fase liquida;
- una fase aeriforme.

Di fatto è, più in generale, un sistema complesso e dinamico, in cui risiedono processi che sono in continua evoluzione. La parte solida che lo costituisce si riferisce a particelle di diversa composizione (minerale e/o organica) e di varie forme e dimensioni, distribuite in maniera casuale. Si creano, dunque, degli interstizi si trovano aria e/o acqua (la quale può presentarsi nelle sue diverse fasi: vapore, liquido o ghiaccio).

Il terreno, in genere, può essere descritto da alcune grandezze fisiche:

- porosità totale $\eta = \frac{V_{vuoti}}{V_{tot}}$
- indice dei vuoti $e = \frac{V_{vuoti}}{V_{partesolida}}$
- grado di saturazione $S_R = \frac{V_{acqua}}{V_{vuoti}}$
- porosità cinematica (che mette in conto la presenza di acqua igroscopica) $\eta_c = \frac{V_{effvuoti}}{V_{tot}}$

4.2 Proprietà che influenzano il comportamento termico del sistema sottosuolo-sonda

I principali fattori che influenzano il comportamento termico del sottosuolo sono:

- la densità,
- il contenuto di umidità,
- la matrice solida del suolo in esame.

All'aumentare della densità, si riduce il volume complessivo occupato dalle cavità vuote. Migliorando il contatto tra i grani, la conduttività termica del mezzo poroso aumenta. In generale la resistività termica di un terreno a grana grossa è maggiore di quella di un terreno a grana fine, a parità di contenuto di umidità. Inoltre la conduttività dei suoli rocciosi è superiore a quella dei terreni sabbiosi e argillosi. Quindi maggiore è la porosità, maggiore resistenza viene fornita, minore allora sarà la conduttività termica: il compattamento del terreno, riducendo i vuoti tra i grani, ha quindi un effetto benefico sulla resistività, riducendola. La proprietà più importante, tuttavia, è l'umidità del terreno, non solo per l'influenza sulla densità, ma soprattutto perchè la conducibilità dell'acqua è circa venti volte superiore a quella dell'aria in cui prende il posto. La determinazione dell'umidità del terreno è piuttosto problematica essendo variabile nel tempo: è influenzata dalla piovosità, dall'evaporazione, dalla vegetazione e persino dalle differenze di temperatura nel terreno. In tali termini va definita la *stabilità termica*: un suolo è considerato termicamente instabile quando al di sotto di una certa umidità, detta critica (valore, in genere, molto basso), ad un piccolo decremento dell'umidità corrisponde un'impennata della resistività termica.

4.3 Il profilo di temperatura nel terreno

La caratteristica più importante del terreno, come sorgente di calore, è la stabilità della temperatura durante l'anno, che solitamente viene raggiunta a una profondità di 10-15 m da piano campagna: a tale profondità, infatti, in genere si colloca la cosiddetta *neutral zone*. I primi strati di terreno sono

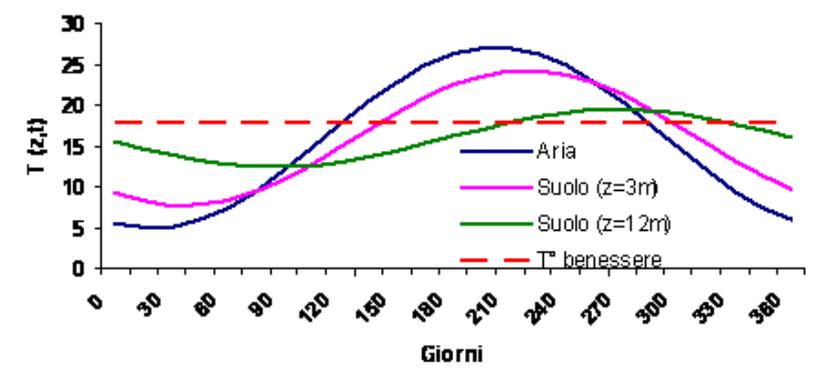


Figura 4.1: Andamento della temperatura del suolo in funzione del tempo e al variare della profondità.

influenzati dalle variazioni stagionali climatiche; tuttavia, andando a profondità sempre maggiori, la temperatura si stabilizza ad un valore pressochè costante durante tutto l'anno. L'equazione (4.1) fornisce l'andamento, a diverse profondità, della temperatura del terreno indisturbato, cioè non collegato all'impianto.

$$T(z, t) = T_m - A_s \cdot e^{-z \left(\frac{\pi}{365\alpha} \right)^{1/2}} \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{365} \left(t - t_0 - \frac{z}{2} \left(\frac{365}{\pi\alpha} \right)^{1/2} \right) \right) \quad (4.1)$$

Dove:

- T_m è la temperatura media del terreno;
- A_s è l'ampiezza della variazione annua della temperatura superficiale;
- α è la diffusività termica del terreno (m^2/giorno);
- t_0 è il giorno dell'anno in cui si ha la minima temperatura superficiale (giorni);
- z è la profondità (m);
- t è il tempo generico di valutazione (giorni).

L'andamento risultante viene illustrato in figura 4.1.

4.4 Meccanismi di trasmissione del calore nel suolo

In generale, i principali meccanismi di trasmissione del calore nel terreno sono:

- conduzione;
- convezione;
- irraggiamento.

Il flusso di calore per conduzione è quasi sempre il meccanismo predominante, tuttavia ci possono essere situazioni in cui anche la convezione e l'irraggiamento danno contributi apprezzabili.

Le teorie che supportano lo studio della trasmissione termica si basano sull'assunzione che il flusso termico si svolga uniformemente in un mezzo omogeneo. Nella realtà, come è naturale che sia, tale situazione non si verifica; pertanto bisogna adottare una prospettiva macroscopica, considerando una "cella unitaria" di suolo abbastanza grande da essere rappresentativa del terreno stesso e delle sue diverse parti.

4.4.1 Conduzione

Il passaggio di energia tra due zone a temperatura diversa, senza apprezzabile trasporto di materia, prende il nome di trasporto di calore per conduzione.

La conduzione avviene sia nella componente solida, che in quella liquida e aeriforme del terreno.

Per quanto riguarda la conduzione di calore nei componenti aeriformi e nel vapore acqueo che occupano le cavità del terreno, essa consiste in un processo di collisione tra le molecole con un conseguente incremento di energia cinetica. Un meccanismo simile avviene nell'acqua presente nel terreno, la quale assume un comportamento che è una via di mezzo tra quello delle particelle caotiche aeriformi e quello della disposizione geometricamente regolare dei solidi cristallini. In questi ultimi il flusso di calore può essere valutato come conseguenza dell'incremento delle vibrazioni degli atomi, i quali muovono le molecole vicine come se fossero collegate insieme da molle.

In genere, il calore condotto attraverso il suolo può prendere tutti i percorsi disponibili. Tuttavia, la maggior parte della conduzione di calore avviene nella parte solida.

Come già detto, la teoria che tratta il trasferimento di calore si basa su ipotesi di isotropia del suolo; si assume, inoltre, che il gradiente orizzontale di tutte le più rilevanti grandezze fisiche sia trascurabile rispetto a quello verticale; in questo modo si può semplificare il problema della conduzione ad una dimensione.

Il flusso di calore attraverso conduzione, può essere descritto dalla seguente equazione di Fourier:

$$q_h(z,t) = -\lambda_{h,app}(z,t)\partial_z T(z,t) \quad (4.2)$$

dove:

- q_h è il flusso di calore;
- T è la temperatura del suolo;
- $\lambda_{h,app} = \lambda_h + \lambda_{h,pseudo}$ è la conduttività termica apparente somma della conduttività termica effettiva e di un contributo che tiene conto della eventuale componente latente e di altre componenti non puramente conduttive.

4.4.2 Convezione

La convezione presuppone che uno dei due sistemi di scambio termico sia fluido (liquido, gas, vapore, . . .); essa è localizzata in seno al fluido (o fluidi) all'interfaccia di separazione tra le fasi e nelle immediate vicinanze. Se il fluido lambisce un corpo solido, condizione necessaria affinché si instauri il meccanismo di convezione è che il fluido sia in moto relativo rispetto al corpo solido, altrimenti si manifesta solo conduzione termica tra i sistemi a contatto.

La convezione sia influenzata non solo dalle proprietà termiche del fluido e del solido che esso lambisce (conduttività, calore specifico, temperature, . . .), ma anche dal campo di moto realizzato, cioè dalla distribuzione delle velocità in direzione, verso e modulo e quindi dalle grandezze fisiche, geometriche, dinamiche che concorrono a realizzarlo, quali la densità, la viscosità del fluido, la geometria dell'ambiente ove il fluido si muove, la distribuzione delle pressioni.

In realtà i fenomeni di natura fluidodinamica non sono indipendenti da quelli di natura termica ed il campo di velocità è sempre influenzato dalla distribuzione delle temperature nel fluido; le proprietà fisiche del fluido

dipendono infatti dalle temperature (come ad esempio la densità). Tale connessione tra processi termico e dinamico comporta delle complicazioni dal punto di vista analitico, e, come detto in precedenza, si deve porre attenzione alle ipotesi che si considerano nelle applicazioni ai casi pratici.

In generale, le cause del moto del fluido consentono di operare una classificazione fondamentale nella convezione termica:

- *convezione libera*: si tratta di un fenomeno di trasporto di massa causato dal gradiente di temperatura. A temperature maggiori la densità del fluido è più bassa, per cui viene spinto verso l'alto assieme al calore che trasporta. Si crea così un movimento di massa che caratterizza le cosiddette *celle convettive*. Tale processo crea un miscuglio di correnti, il quale contribuisce a sua volta agli scambi di calore per conduzione. Generalmente, nel suolo la convezione attraverso aria o acqua è trascurabile. I pori devono essere grandi almeno qualche millimetro affinché la convezione libera abbia un effetto apprezzabile.
- *convezione forzata*: si ha nel momento in cui le correnti di fluido vengono forzate a muoversi dentro le cavità del terreno da gradienti di pressione, come lo è il flusso sotterraneo dell'acquifero. Tale fenomeno è di poco conto per le sabbie, ma nei terreni a grana più grossolana può causare un incremento della conduttività.

4.4.3 Radiazione

La radiazione avviene tra gli spazi d'aria mediante la propagazione di energia termica sotto forma di onde elettromagnetiche. Nei terreni spesso fornisce un contributo trascurabile nel trasporto del calore. Per esempio, il suo effetto nelle sabbie è minore all'1% del trasporto di calore.

4.4.4 Conduttività, capacità e diffusività del calore

La conduttività termica di un terreno è definita come la quantità di calore che attraversa, nell'unità di tempo, la sezione di area A con un gradiente di temperatura unitario, nella direzione del flusso di calore. Essa, infatti, si può definire a partire dalla legge di Fourier (4.2).

La conduttività termica di un dato materiale dipende dal suo stato e può variare con la temperatura e la pressione. Per moderate pressioni l'effetto della pressione stessa non è rilevante. L'effetto della temperatura invece è spesso non trascurabile.

La conduttività, in genere, è influenzata da diversi fattori, quali umidità, temperatura e condizioni al contorno. Inoltre, spesso, nel caso in cui sia presente un gradiente termico nel suolo, si deve combinare sia il trasferimento di calore, che il trasporto di massa. Ci si trova allora una situazione complicata da analizzare: al fine di semplificare, spesso i problemi vengono risolti in termini di trasporto di calore per pura conduzione, sfruttando tuttavia una *conduttività termica effettiva*, che tenga conto anche dei diversi fattori che possono influenzare il flusso di calore.

La definizione di conduttività termica implica stazionarietà, per cui la temperatura in un certo punto non varia nel tempo. Se, tuttavia, la temperatura cambia nel tempo, significa che il terreno sta assorbendo o perdendo calore. Se una porzione di terreno incrementa la sua temperatura nel tempo, allora parte del flusso di calore è stato utilizzato proprio per tale incremento; la quantità di tale parte dipende dalla *capacità termica* della porzione di terreno.

Tale proprietà, C , per unità di volume di terreno, è l'energia richiesta per aumentare di 1°C la temperatura del volume unitario. Essa è il prodotto del calore specifico $c(\text{cal/g}^\circ\text{C})$ e la densità $\rho(\text{g/cm}^3)$:

$$C = \rho c. \quad (4.3)$$

Se si pongono θ_s, θ_w e θ_a rispettivamente la frazione di solido, acqua e aria del volume in considerazione, allora:

$$C = \theta_s C_s + \theta_w C_w + \theta_a C_a \quad (4.4)$$

Quindi, quando si è in presenza di non stazionarietà, il comportamento termico dipende sostanzialmente da conduttività e capacità termiche. Il rapporto tra queste due rappresenta la *diffusività termica*, α :

$$\alpha = \frac{\lambda}{C}. \quad (4.5)$$

Un alto valore di diffusività termica implica rapidi e considerevoli variazioni della temperatura.

Capitolo 5

Dati utilizzati e attività sperimentali

5.1 Generalità

Di seguito vengono descritte le indagini sperimentali e le attività di raccolta, verifica e cernita dei dati utilizzati ai fini dello studio (le elaborazioni effettuate ai fini dell'idoneità al geoscambio vengono trattati nel prossimo capitolo).

Nel corso dello studio di tali proprietà si è fatto uso dei software GIS, che hanno permesso una rapida gestione delle informazioni raccolte unitamente ad una più efficace pianificazione e aggiornamento delle fasi di studio successive. Nella fase preliminare sono stati considerati ed analizzati i seguenti tematismi informativi:

- Cartografia raster e vettoriale di base:
 - Cartografia dell'Istituto Geografico Militare (I.G.M.) alla scala 1:50.000,
 - Cartografia Tecnica Regionale (CTR) alla scala 1:50.000;
- DTM (Digital Terrain Model) per l'analisi delle quote del piano campagna;
- layer per la descrizione e caratterizzazione geografica del dominio (e.g. limiti amministrativi, provinciali e comunali, rilievi, rete idrografica);
- raster, shapefile e database relativi agli aspetti idrogeologici (e.g. andamento dei deflussi sotterranei, fascia delle risorgive, punti della rete freaticometrica esistente);

I parametri considerati ai fini dello studio sono principalmente di carattere geologico, geotermico ed idrogeologico. I dati sono stati ricavati principalmente dal database di Sinergeo, integrate con informazioni richieste a diversi enti e organizzazioni. Le informazioni territoriali utilizzate, sia digitali che cartacee, sono state organizzate e preprocessate al fine di:

- definire il modello concettuale del territorio di indagine;
- supportare le attività sperimentali;
- ottenere i dataset per la redazione delle cartografie finali.

Nel dettaglio lo studio ha riguardato l'acquisizione e l'elaborazione dei seguenti elementi:

- misure sperimentali del livello e della temperatura di falda,
- conducibilità idraulica degli acquiferi,
- caratteri idrochimici della falda,
- parametri geotermici.

In linea generale, nell'ambito dello studio, sono state espletate le seguenti fasi di approfondimento che hanno interessato tutti i parametri/aspetti di interesse:

- inquadramento topografico e idrogeologico;
- definizione del dominio;
- acquisizione e valutazione dei punti di interesse per le eventuali attività sperimentali e le successive elaborazioni;
- elaborazione iniziale dei dati raccolti;
- valutazione dei punti maggiormente rappresentativi in termini di affidabilità del dato;
- confronto con storici;
- aggiornamento del database.

Si aggiunge che tali procedure sono state elaborate in maniera separata per le due aree già distinte nel paragrafo 3.3: l'area del sistema Agno-Chiampo-Guà e la pianura compresa tra Astico-Leogra-Timonchio e il fiume Brenta.

5.2 Misure di livello e di temperatura della falda

Le misure di livello e di temperatura della falda sono trattate congiuntamente in quanto effettuate utilizzando la medesima rete di controllo.

5.2.1 Recupero, verifica e cernita dei dati

In merito alla raccolta dati, si sono considerati due diversi database per le due zone in cui si è suddiviso il dominio.

Per quanto riguarda le valli dell'Agno-Guà e del Chiampo, si è fatto uso del database, fornito da Sinergeo, creato ed utilizzato per il Progetto Giada (LIFE00ENV/IT/000184) nell'ambito del quale sono state condotte e sono tuttora in corso indagini idrogeologiche ed ambientali finalizzate alla gestione integrata dell'ambiente nel distretto conciaro della Valle del Chiampo, in risposta all'esigenza di tutela di un importante patrimonio naturalistico. La rete piezometrica inizialmente utilizzata è stata aggiornata ed ottimizzata durante il corso del progetto ed è quindi risultata immediatamente fruibile per le indagini del presente studio.

Riferendosi invece alla zona tra Astico e Brenta, la rete di controllo e misura è stata fornita dai recenti studi effettuati nell'ambito del Progetto Falde, condotte da dipartimento ICEA dell'Università degli Studi di Padova (Passadore et al, 2008). In questo caso il dataset è stato verificato e modificato negli anni, in base alla distribuzione spaziale, alla rappresentatività del dato acquisito e all'accessibilità del punto di misura.

Nell'ambito delle ricerche oggetto del presente documento, in entrambe le aree di interesse, si è comunque effettuata un'ulteriore analisi e validazione della rete di misura mediante verifiche incrociate, eliminazione di informazioni ridondanti, modifica di dati incompleti o non aggiornati.

A titolo di esempio si riportano un paio di casi:

- a valle delle prime elaborazioni e dei primi sopralluoghi in sito è stato possibile aggiungere ulteriori punti nella zona di Bassano, forniti dal dipartimento ICEA dell'Università degli Studi di Padova integrando quindi la rete;
- inoltre, è stata inizialmente valutata la possibilità di ampliare lo studio al territorio vicentino nella zona oltre il Fiume Brenta; a tal proposito

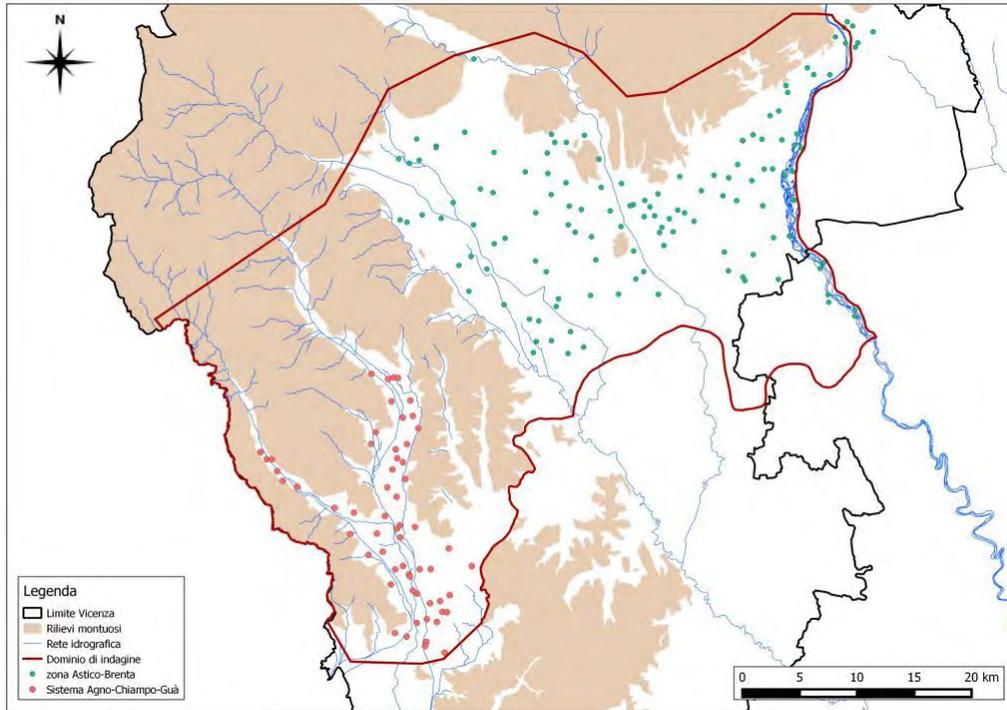


Figura 5.1: Distribuzione della rete piezometrica utilizzata per le misure freatiche e di temperatura.

si sono valutati alcuni punti della rete ARPAV* che tuttavia non sono risultati accessibili per le misurazioni di campo previste; in questo caso si è preferito ridurre l'area di indagine considerando il Fiume Brenta come confine est del dominio.

Per riassumere, per le due zone, si è fatto uso dei seguenti dati:

- **sistema Agno-Chiampo-Guà:** rete piezometrica composta da 55 punti;
- **zona tra Astico e Brenta:** la rete comprende 126 punti;

In totale la rete è composta da 181 pozzi, la cui distribuzione nell'intero territorio di interesse è riportata in figura 5.1. Il database è stato organizzato in base a informazioni quali identificativo univoco (ID), coordinate geografiche, caratteristiche geometriche del punto di misura, informazioni relative all'accesso, eventuali osservazioni. Per facilitare le attività sperimentali di misura è risultato particolarmente utile usufruire di monografie relative alle stazioni di misura (la figura 5.2 mostra ad esempio un estratto del database

* utilizzati per le attività di analisi della qualità delle acque di falda

Stazione 5		Localita'	Cabrelle																										
		Comune	Schio																										
Coord X GB (m) 1687472.3		Proprietario	Fratelli Miglioranza																										
Coord Y GB (m) 5065978.2		Indirizzo	Via Campo Romano																										
Quota b.p. (m s.l.m.m.) 171.16		Telefono	0445/575425																										
Profondità da b.p. (m) 27.55		Uso	-																										
B.p. - p.c. (m) 0.85		Osservazioni	Dalle 12:30 alle 13:00 e dalle 18:00																										
Profondità da p.c. (m) 26.70		<input checked="" type="checkbox"/> Presenza di sonda per il monitoraggio freaticometrico in continuo																											
Diametro (cm) 140		<input type="checkbox"/> Presenza di sonda per la compensazione barometrica																											
																													
		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Misure freaticometriche</th> </tr> <tr> <th>Data</th> <th>Misura (m da bp)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>18/11/2003</td><td>26.14</td></tr> <tr><td>28/01/2004</td><td>23.55</td></tr> <tr><td>17/03/2004</td><td>22.51</td></tr> <tr><td>27/01/2005</td><td>23.62</td></tr> <tr><td>05/03/2005</td><td>25.23</td></tr> <tr><td>23/06/2005</td><td>25.22</td></tr> <tr><td>03/10/2005</td><td>22.96</td></tr> <tr><td>13/12/2005</td><td>23.1</td></tr> <tr><td>19/07/2006</td><td>25.41</td></tr> <tr><td>10/11/2006</td><td>25.9</td></tr> <tr><td>26/01/2007</td><td>22.95</td></tr> </tbody> </table>		Misure freaticometriche		Data	Misura (m da bp)	18/11/2003	26.14	28/01/2004	23.55	17/03/2004	22.51	27/01/2005	23.62	05/03/2005	25.23	23/06/2005	25.22	03/10/2005	22.96	13/12/2005	23.1	19/07/2006	25.41	10/11/2006	25.9	26/01/2007	22.95
Misure freaticometriche																													
Data	Misura (m da bp)																												
18/11/2003	26.14																												
28/01/2004	23.55																												
17/03/2004	22.51																												
27/01/2005	23.62																												
05/03/2005	25.23																												
23/06/2005	25.22																												
03/10/2005	22.96																												
13/12/2005	23.1																												
19/07/2006	25.41																												
10/11/2006	25.9																												
26/01/2007	22.95																												

Figura 5.2: Esempio di organizzazione del database nelle relative monografie (dipartimento ICEA, Università degli Studi di Padova).

realizzato dal dipartimento ICEA) in cui sono riportate tutte le informazioni utili unitamente all'ubicazione su cartografia aerea e una fotografia del punto di controllo.

In aggiunta alle informazioni del database, si è predisposto un aggiornamento delle strumentazioni GPS con la rete di interesse, facilitando così la localizzazione dei punti sopra menzionati.

5.2.2 Attività sperimentali

Le attività sperimentali sono state realizzate a seguito del preprocessing dei dati di cui al paragrafo precedente.

Ai fini dello studio sono state condotte n. 3 campagne di misura su tutti i punti della rete (circa 180 punti). Le uscite si sono svolte in tre periodi differenti, in modo da porre a confronto le eventuali influenze stagionali e climatiche sui dati:

- *prima campagna (3-12/06/2013)*: gli eventi climatici dell'anno hanno influenzato la scelta di tale periodo, che si colloca a seguito di un importante evento di pioggia che ha coinvolto l'intero mese di maggio 2013. Tale campagna è stata di particolare interesse dal punto di vista freaticometrico, in quanto, dall'analisi dei monitoraggi ha colto il mo-

mento immediatamente successivo al picco di livello della falda. Per quanto riguarda le temperature superficiali, l'eccezionalità dell'evento ha influenzato i trend termici e sono quindi stati registrati valori inferiori alle medie stagionali;

- *seconda campagna (29/07-6/08/2013)*: tale periodo è stato scelto al fine di avere dei valori rappresentativi del clima in piena stagione estiva, sia per quanto riguarda la freaticimetria, sia per il dato di temperatura;
- *terza campagna (17-26/03/2014)*: l'intento era di verificare i valori tipici del periodo invernale. L'inverno compreso tra il 2013 e il 2014, tuttavia, è stato particolarmente piovoso, con temperature più miti rispetto alle medie stagionali. A causa degli eventi piovosi che hanno segnato l'intero mese di febbraio, il primo periodo utile per conseguire la campagna di misura è risultato quello di marzo. La terza e ultima campagna è stata utilizzata anche per una caratterizzazione idrochimica della falda (a tal proposito si rimanda al paragrafo 5.4).

La strumentazione utilizzata durante i rilievi di campo è stata messa a disposizione da Sinergeo. Per le misure di livello e temperatura è stato utilizzato un freaticometro, in grado di fornire anche il dato di temperatura (Figura 5.3).

Per quanto riguarda la temperatura sono stati effettuati dei log di misura verticali eseguendo la registrazione del dato a profondità diverse. La massima profondità di acquisizione del dato è dipesa dalla geometria del punto di controllo (che in taluni casi è risultato particolarmente superficiale).

Le diverse campagne di misura sono state organizzate al fine di ottimizzare i percorsi e le elaborazioni successive (limitando la durata delle rilevazioni in un periodo di pochi giorni), segnando per ogni punto tutte le osservazioni di campo (la data e l'ora di rilevazione, unitamente ad eventuali note circa accessibilità o problemi nel reperimento del dato).

5.2.3 Attività di monitoraggio

In aggiunta ai dati manuali acquisiti tramite le attività sperimentali descritte precedentemente, sono stati considerati i dati acquisiti da alcune stazioni in acquisizione in continuo gestite in parte dal Centro Idrico di Novoledo e in parte da Sinergeo.

Le sonde installate presso le stazioni di misura registrano i parametri livello e temperatura delle falde idriche sotterranee a intervalli regolari.



Figura 5.3: Freatimetro utilizzato nelle uscite di misura freaticometrica e di temperatura.

La distribuzione di questi punti di misura è mostrata in figura 5.4.

In taluni casi si tratta di sensori collegati a un datalogger che periodicamente necessita di sopralluoghi in sito per il download dei dati, in altri casi la stazione prevede anche un modulo di teletrasmissione GPRS/GSM che comunica direttamente i dati via modem (Figura 5.5).

E' interessante analizzare il diverso comportamento dei trend di temperatura in zone caratterizzate da differenti configurazioni geologiche e idrogeologiche. A titolo di esempio si riportano alcuni grafici in figura 5.6.

In taluni contesti la variazione climatica stagionale è osservabile a profondità superiori a 10 m. In altri casi l'influenza della dispersione dei corsi d'acqua gioca un ruolo fondamentale nella regolazione termica del sottosuolo. In particolare in prossimità del Fiume Brenta il range termico varia notevolmente in funzione del punto di osservazione sebbene la profondità del sensore risulti simile: l'escursione è pari a circa 13° C nel settore a nord e a 4° C nella zona leggermente più a sud.

Valori regolarizzati e pressochè costanti nel tempo si trovano invece in altre zone, con escursioni termiche non confrontabili con quelle riscontrabili in superficie.

In definitiva, si deve tenere in debito conto che a contesti idrogeologici

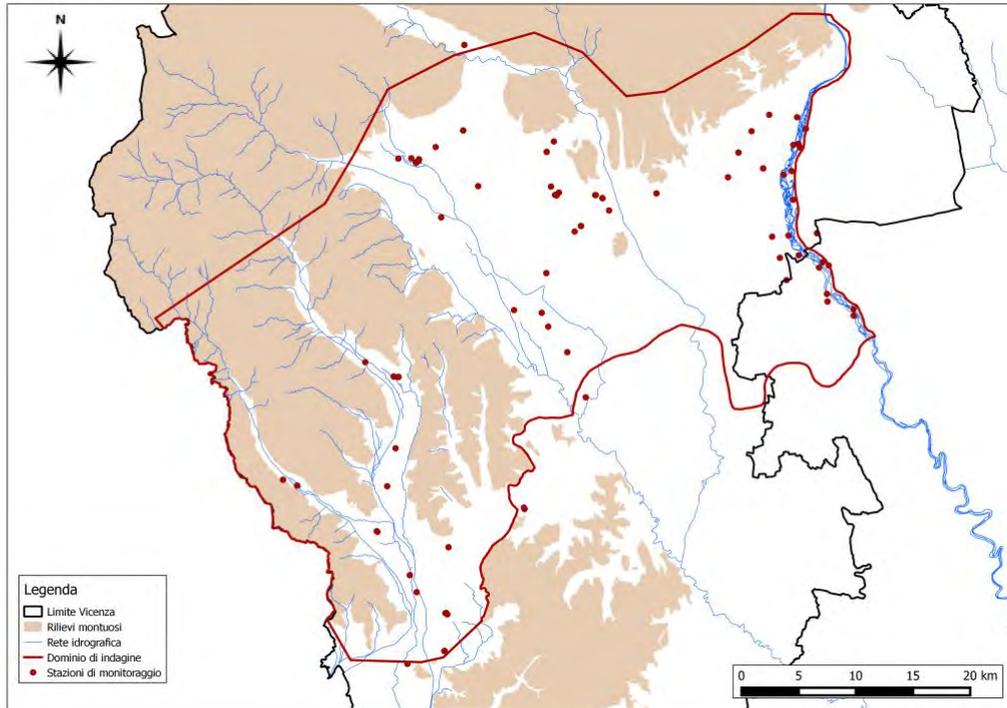
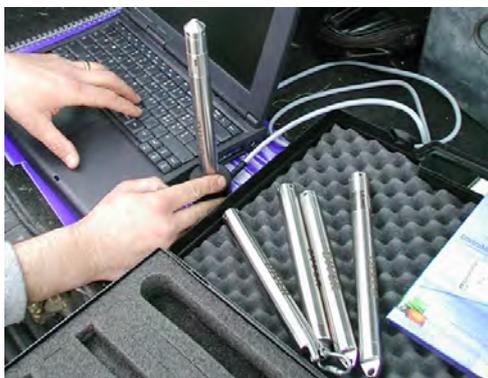


Figura 5.4: Distribuzione nel territorio vicentino delle stazioni di monitoraggio.

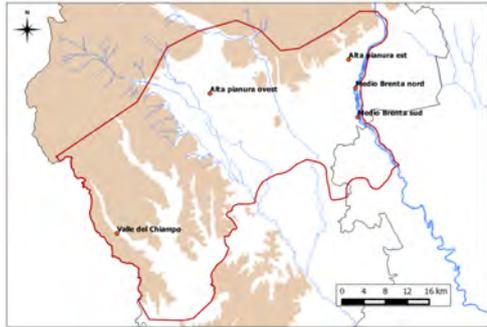


(a)

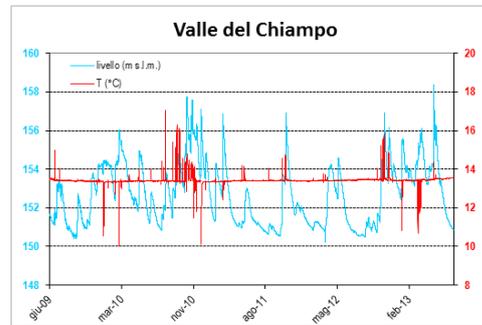


(b)

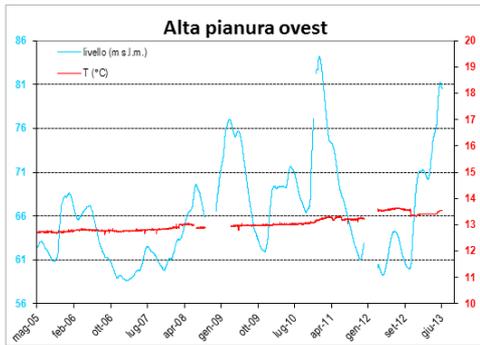
Figura 5.5: Dispositivi automatici. (a) Diver; (b) teletrasmissa.



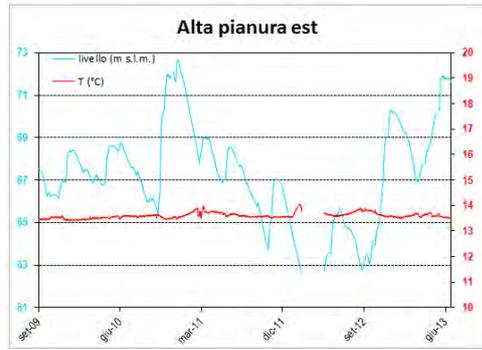
(a) *Disposizione stazioni.*



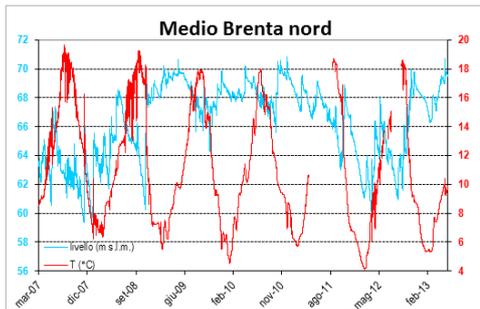
(b) *Valle del Chiampo. Profondità pozzo: 29.8 m.*



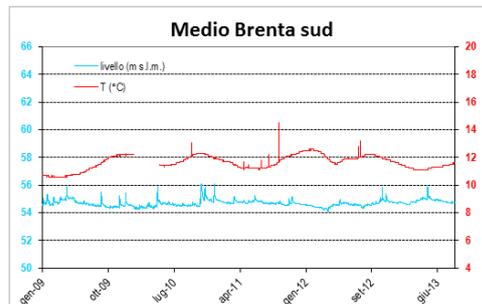
(c) *Alta pianura ovest. Profondità pozzo: 103 m.*



(d) *Alta pianura est. Profondità pozzo: 30 m.*



(e) *Medio Brenta nord. Profondità pozzo: 16.2 m.*



(f) *Medio Brenta sud. Profondità pozzo: 16.5 m.*

Figura 5.6: Esempi di monitoraggio del livello e di temperatura delle acque sotterranee in diverse zone.

differenti, possono competere situazioni termiche molto variabili nel sottosuolo, anche su limitate distanze geografiche. La conoscenza accurata dei dati del regime termico naturale costituisce pertanto una condizione al contorno non trascurabile nell'ambito delle ricerche circa lo sfruttamento dell'energia geotermica a bassa entalpia.

5.3 Valori di conducibilità idraulica

5.3.1 Recupero, verifica e cernita dei dati

Sono stati raccolti i dati relativi alle prove di pompaggio effettuate negli anni entro il territorio di indagine. Si sono valutati anche dati al di fuori del dominio di interesse al fine di ottimizzare la resa dell'elaborazione dei dati. Dal database fornito si sono estratti i valori rappresentativi del primo acquifero, soprattutto per quanto riguarda quei punti ove la falda inizia a differenziarsi; si sono presi in considerazione dunque:

- **sistema Agno-Chiampo-Guà:** n. 56 punti;
- **pianura tra Leogra-Timonchio-Astico e Brenta:** n. 43 punti.

In totale si dispone di 99 siti dove si possono valutare i valori di conducibilità del primo acquifero, distribuiti come illustrato in figura 5.7. Si tratta di un valore di conducibilità idraulica equivalente, dipendente dalla distribuzione dei filtri. Va detto, comunque, che, visto l'assetto idrogeologico del territorio, i dati possono essere considerati ragionevolmente rappresentativi, in quanto, come si vedrà nel prossimo capitolo, i valori ricavati sono indicativi della litologia propria del materasso alluvionale di cui è formata tutta l'alta pianura.

5.3.2 Prove di portata: cenni teorici e modalità di esecuzione

Le prove di portata rappresentano il sistema sperimentale più attendibile per la determinazione delle caratteristiche dei sistemi acquiferi e delle opere di captazione. Se i test sono correttamente programmati, eseguiti e interpretati, si possono ottenere importanti informazioni di tipo:

- *qualitativo:* geometria dell'acquifero, caratteristiche del sistema idrogeologico;

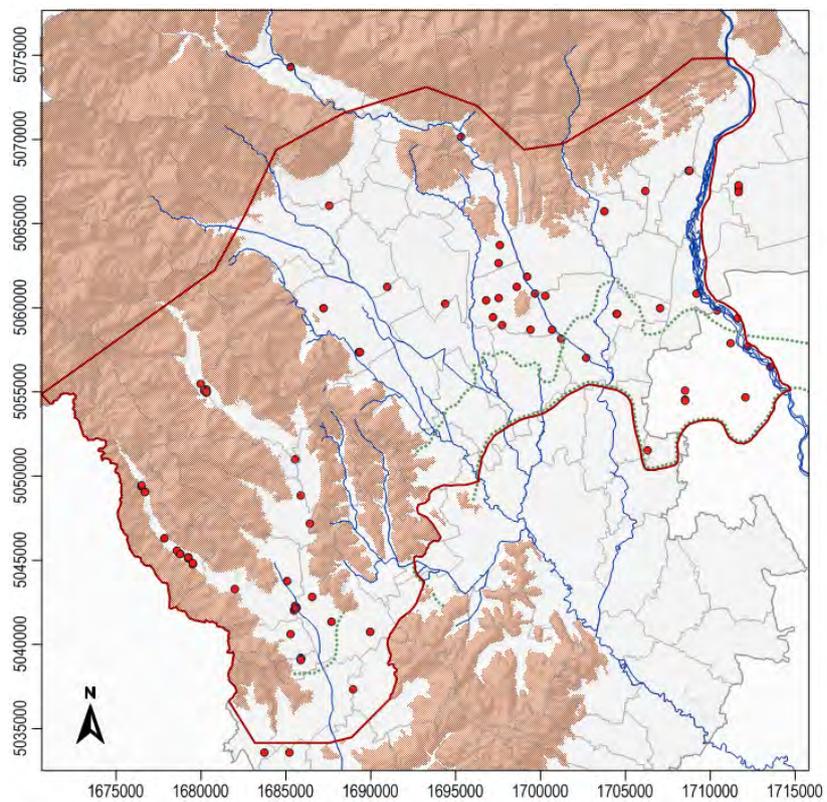


Figura 5.7: Distribuzione spaziale dei siti in cui sono definiti i valori di conducibilità del primo acquifero.

- *quantitativo*: parametri delle opere di captazione, parametri idraulici dell'acquifero.

L'esecuzione di una prova di portata è, in linea di principio, relativamente semplice. Si estrae acqua dal pozzo e si misurano portata estratta, livelli di falda nel pozzo e nei piezometri a tempi fissi e prestabiliti e parametri fisici dell'acqua, valutando in questo modo come reagisce il sistema acquifero all'applicazione di una sollecitazione esterna e andando a calcolare i parametri che ne regolano il comportamento fisico. Alle diverse fasi che distinguono tali prove si affiancano tecnologie che ne facilitano sia l'esecuzione che l'interpretazione:

- trasduttori di pressione per la lettura dei livelli di falda;
- sistemi su PC per l'acquisizione e la registrazione automatica dei livelli in corso di prova;
- misuratori elettromagnetici di portata con registrazione automatica dei dati;
- modelli analitici per il calcolo automatico dei parametri idraulici a partire dai dati dei fogli elettronici.

La corretta impostazione dei test è possibile in base al modello concettuale preliminare del sistema acquifero. Questo permette di stabilire quali parametri è necessario acquisire e di programmare conseguentemente la strutturazione ottimale delle prove. In particolare, la durata del test, la portata, il numero e la distanza dei piezometri dal pozzo di prova, le correzioni da apportare ai dati di campagna prima dell'interpretazione devono essere convenientemente scelti caso per caso, in base al modello preliminare e agli obiettivi della ricerca.

Eseguito il test, l'eventuale correzione dei dati di campagna consente di tener conto di fattori che influiscono sul livello di falda nel corso della prova, estranei alla perturbazione generata sperimentalmente dalla prova stessa.

L'interpretazione va eseguita secondo il metodo appropriato che dipende dal tipo di acquifero e dallo schema idrogeologico generale.

In base ai risultati dell'interpretazione e alle medie dei risultati di più prove è possibile passare alla definizione del sistema acquifero e alla scelta dei parametri idraulici e dei parametri delle opere di captazione che serviranno per la realizzazione dei modelli matematici, i quali dovranno essere opportunamente tarati e validati.

Moto dell'acqua nel sottosuolo

Si ammette che il moto dell'acqua nel sottosuolo sia regolato dalla legge di Darcy:

$$Q = k \times i \times A \quad (5.1)$$

per la quale, in una sezione A (m^2) di acquifero, la portata Q (m^3/s) defluente in condizioni statiche è proporzionale alla conducibilità idraulica k (m/s) e al gradiente idraulico i . La legge è vettoriale per cui si può distinguere una componente di moto orizzontale (legata alla conducibilità idraulica orizzontale k_h e al gradiente trasversale) e una componente verticale, legata alla conducibilità idraulica verticale k_v e al gradiente verticale.

Dal punto di vista pratico il moto orizzontale, anche detto *deflusso di falda*, è il vettore dell'acqua verso le opere di captazione.

Ciò che interessa nell'esecuzione delle prove di pompaggio, è l'abbassamento della falda attorno al punto di emungimento; esso viene definito dalla funzione generale:

$$s = f(t, Q, r) \quad (5.2)$$

dove:

- s è l'abbassamento del livello di falda per il pompaggio alla portata Q ;
- Q portata del pompaggio;
- t tempo dall'inizio del pompaggio;
- r è la distanza del punto in cui si misura l'abbassamento s dal punto in cui è in atto il pompaggio.

Valutazione dei parametri nei pozzi: Step Drawdown Test (SDT)

L'estrazione di acqua da una formazione acquifera è possibile grazie ad una depressione della superficie piezometrica (o freatica), dovuta in parte alla dissipazione di energia generata dal movimento dell'acqua nella formazione acquifera, e in parte ad un'ulteriore dissipazione che si genera al momento dell'ingresso dell'acqua in pozzo e nel corso della risalita al piano campagna. Il pozzo ideale è quello in cui la seconda componente di dissipazione non esiste.

La valutazione delle caratteristiche produttive di un pozzo al collaudo, o del suo grado di invecchiamento, o, entro certi limiti, della sua efficienza

sono disponibili mediante l'esecuzione di prove sperimentali, delle quali la più in uso è la prova di portata a gradini (Step Drawdown Test). Questa si realizza incrementando la portata del pompaggio ad intervalli di tempo costanti e prefissati, secondo le seguenti modalità operative:

- esecuzione di 3/6 gradini, tutti della stessa durata;
- l'ordine di grandezza delle portate di ciascun gradino dovrebbe essere stabilito in anticipo, in base alla portata di massima della pompa, se nota, o ad altro tipo di informazioni raccolte in loco (come le portate dei pozzi poste nelle vicinanze). Se non si dispone di alcun dato conoscitivo a monte, è preferibile eseguire un breve tentativo preliminare con saracinesca molto aperta, della durata di pochi minuti (infatti è nei primi minuti che si esauriscono le perdite di carico più elevate, così da farsi un'idea del regime portate/abbassamenti del pozzo);
- durata costante di ogni gradino, variabile da caso a caso, da 20 minuti a 3/4 ore, fino all'ottenimento di un regime di abbassamento pseudo-stabilizzato;
- allontanamento dell'acqua estratta dal pozzo, verificando che lo scarico avvenga in modo tale da non reinfiltrarsi nella falda (aspetto da curare particolarmente nel caso di acquiferi freatici);
- misure di portata e di livello nel pozzo. Si eseguono almeno 2 o 3 controlli della portata per ogni gradino, più ogni volta che sussiste il dubbio di una possibile variazione di portata. La cadenza delle misure è molto fitta nei primi minuti, quindi si dirada.

La figura 5.8 rappresenta un esempio di grafico portata/abbassamento che si ottiene mediante l'esecuzione di uno Step Drawdown Test.

La funzione generale $s = f(Q)$, per ogni valore di portata, è la seguente:

$$s = BQ + CQ^n \quad (5.3)$$

Ovvero, l'abbassamento totale s (s_w in figura 5.9) è dato da due componenti:

- una componente che varia linearmente con la portata proporzionalmente ad un certo coefficiente B; a tale componente si attribuisce la perdita di carico della formazione acquifera alla parete del pozzo; il coefficiente B prende il nome di *coefficiente delle perdite di formazione*;

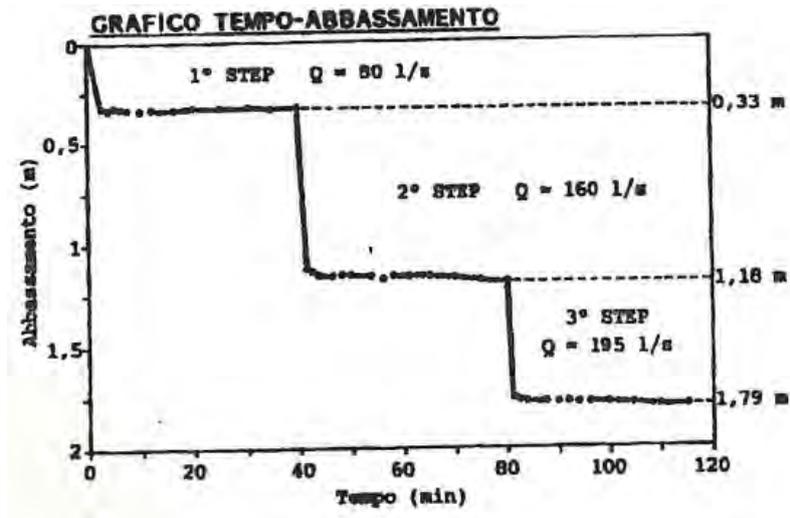


Figura 5.8: Esempio di grafico portata/abbassamento generato da una prova SDT.

- una componente che varia esponenzialmente con la portata Q , proporzionalmente al coefficiente C . Si attribuisce a questa componente la perdita di carico nel pozzo, causata da vari fenomeni di dissipazione dell'energia. Il coefficiente C prende il nome di *coefficiente delle perdite di pozzo*.

I parametri che si calcolano mediante l'interpretazione dei dati di campagna e che definiscono le caratteristiche del pozzo sono:

- $B(s/m^2)$: coefficiente delle perdite di formazione;
- $C(s^2/m^5)$: coefficiente delle perdite di pozzo;
- $Q_s(l/s/m)$: portata specifica;
- $Q_c(l/s)$: portata critica; si tratta della portata oltre la quale si innescano fenomeni di flusso turbolento; ciò implica un improvviso incremento degli abbassamenti, trascinamento di sabbia in pozzo e altri problemi collaterali; se si supera, durante la vita produttiva del pozzo, tale valore, il suo deterioramento diviene più rapido.
- $Q_0(l/s)$: portata ottimale; viene definita inferiore o molto prossima alla portata critica; la scelta della portata ottima dipende soprattutto da diversi fattori tecnico-economici, quali le caratteristiche della pompa sommersa, i consumi energetici, l'interferenza con altri pozzi;
- $WE(\%)$: efficienza.

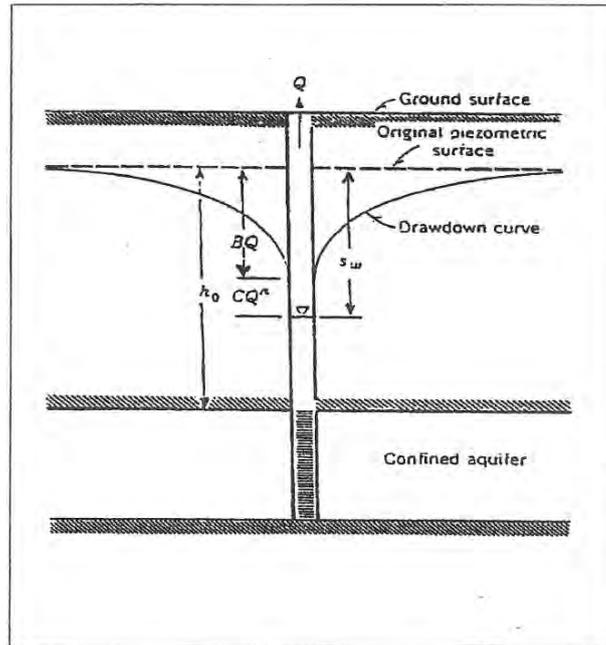


Figura 5.9: Componenti dell'abbassamento totale di un pozzo in pompaggio alla portata Q (da: D.K. TODD - GROUNDWATER HYDROLOGY).

L'interpretazione tradizionale della prova SDT si basa sul metodo di Jacob, che pone come esponente nella formula (5.3) $n = 2$, ottenendo così:

$$s = BQ + CQ^2 \quad (5.4)$$

ovvero, dividendo per Q :

$$\frac{s}{Q} = B + CQ \quad (5.5)$$

equazione di una retta risolvibile graficamente per mezzo del grafico s/Q (abbassamenti specifici) - Q .

Si precisa che, per valutare lo "stato di salute" di un pozzo, è opportuno operare un confronto fra prove ripetute nel tempo.

Valutazione dei parametri idraulici degli acquiferi

Il calcolo dei parametri idraulici degli acquiferi è basato sullo studio del cono di depressione generato da un pompaggio, ovvero delle variazioni di livello di falda nel tempo e nello spazio.

Le variazioni possono essere studiate in corrispondenza del pozzo di pompaggio, ma, a causa delle perdite di carico che ne influenzano il regime degli abbassamenti, è preferibile studiare il comportamento di uno o più piezometri che circondano il punto di emungimento.

Il regime idraulico di un acquifero può essere studiato sia nella fase di abbassamento del livello durante il pompaggio, sia nella fase di risalita, al termine del pompaggio; ne consegue che esistono due tipi di prove sperimentali per la determinazione dei parametri idraulici di un acquifero:

- **Prova a portata costante (Constant Rate Test):** la prova si realizza impostando una portata di pompaggio Q e mantenendola costante per una durata di tempo variabile, a seconda dei casi, da 4-6 ore fino ad alcuni giorni; è realizzata seguendo le seguenti modalità operative:
 - valutazione della portata di esercizio in base ai test preliminari (e.g. SDT);
 - definizione della portata di prova SDT;
 - allontanamento dell'acqua estratta dal pozzo;
 - misure di portata e di livello nel pozzo, misure di livello nei piezometri; la cadenza di tali misure è molto fitta nei primi minuti, poi si dirada (vedi SDT).

I dati di campagna vengono riportati su grafici di tipo semi-logaritmico $s-\log t$ e su grafici logaritmici $\log s-\log t$. Vanno corretti per eventuali disturbi esterni al pompaggio di prova e infine interpretati.

- **Recovery test:** si esegue al termine di una prova a portata costante. Dal momento dell'interruzione del pompaggio, si misura il livello di falda in risalita del pozzo e nei piezometri, ad intervalli di tempo definiti.

La durata del test non è definibile a priori: teoricamente sarebbe preferibile seguire la risalita finché il livello non è tornato nelle condizioni statiche precedenti l'inizio della prova a portata costante. Spesso ciò richiede tempi molto lunghi, soprattutto per il recovery degli ultimi centimetri. In linea di principio, maggiore è stata la durata del pompaggio di prova maggiore deve essere la durata del recovery test.

I dati di campagna sono i seguenti:

- t_0 : durata totale del pompaggio (minuti o secondi), ovvero durata della prova a portata costante;
- t' : tempo trascorso dall'inizio del recovery test;

- s' : abbassamento residuo al tempo t' , ovvero differenza tra il livello statico originario e il livello dinamico al tempo t' .

Gli abbassamenti misurati possono essere influenzati da fattori esterni al pompaggio di prova e quindi non essere attendibili per l'interpretazione se non dopo essere stati corretti per eliminare gli effetti di disturbo.

Il caso più frequente è quello in cui i dati di un piezometro siano interessati dall'interferenza di altri pozzi in pompaggio, diversi dal pozzo di prova. I dati influenzati da interferenze non sono generalmente correggibili, spesso a causa della natura intermittente dei pompaggi che generano tali effetti; di conseguenza non possono essere considerati attendibili per l'interpretazione.

Altri effetti che non possono essere corretti sono dovuti a terremoti e improvvise piene di un fiume in contatto con la falda.

I metodi interpretativi si basano sulle equazioni di flusso degli acquiferi. La distinzione fondamentale è fatta in base al regime degli abbassamenti misurati nel pozzo o nel piezometro:

- *regime stazionario (o flusso all'equilibrio)*, quando l'abbassamento è pressochè stabilizzato;
- *regime transitorio (o flusso al non-equilibrio)*, quando l'abbassamento è ancora in atto.

Bisogna porre attenzione al tipo di regime che si considera: in linea generale è utile considerare “normale” un regime di tipo transitorio, in cui la falda si abbassa regolarmente.

L'interpretazione standard dei dati si basa sui *metodi di Theis, Cooper-Jacob e Theis Recovery*. L'equazione di flusso in regime transitorio è stata derivata da Theis per analogia fra il deflusso sotterraneo e la conduzione del calore. La legge, del tipo $s = f(Q, t, r)$, è descritta mediante l'equazione:

$$s = W(u) \frac{Q}{4\pi T} \quad (5.6)$$

dove:

- $s(m)$: abbassamento del livello di falda per il pompaggio della portata Q ;
- $Q(m^3/s)$: portata di emungimento;
- $t(s)$: tempo dall'inizio del pompaggio;

- $T(m^2/s)$: trasmissività dell'acquifero, intesa come integrazione sullo spessore saturo della conducibilità idraulica k ;
- $W(u)$: funzione esponenziale integrale di Theis data da:

$$W(u) = -0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \frac{u^4}{4.4!} \quad (5.7)$$

in cui:

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (5.8)$$

- $r(m)$: distanza dal punto in cui si misura l'abbassamento s al punto in cui è in atto il pompaggio;
- S : coefficiente adimensionale di immagazzinamento.

Il procedimento di interpretazione è basato sulla sovrapposizione dei dati di prova ($\log s / \log t$) di un pozzo sulla curva tipo di Theis ($W(u) / \log 1/u$). Quando si è ottenuta una buona sovrapposizione (figura 5.10), si sceglie il *match point* comune ai due grafici e si leggono sugli assi le sue quattro coordinate. Queste si inseriscono nelle equazioni (5.6) (5.7) per calcolare i parametri idraulici dell'acquifero:

$$T = \frac{QW(u)}{4\pi s} \quad (5.9)$$

$$S = \frac{4Ttu}{r^2} \quad (5.10)$$

Tale metodo richiede alcune ipotesi, che ne limitano a volte l'applicabilità:

- l'acquifero deve essere apparentemente illimitato, omogeneo, isotropo e di spessore uniforme almeno nel volume interessato dalla prova di pompaggio;
- la superficie piezometrica, in condizioni statiche, può essere considerata orizzontale nell'area interessata dalla prova;
- il pozzo in prova attraversa l'intero spessore dell'acquifero e riceve acqua dall'intero acquifero in condizioni di flusso radiale (moto orizzontale);

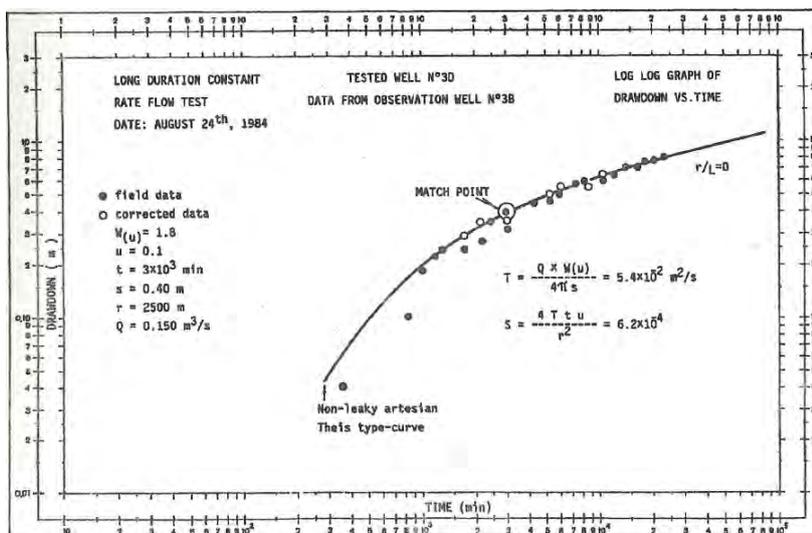


Figura 5.10: Esempio di interpretazione dei dati basato su sovrapposizione dei dati di prova con la curva di Theis.

- il mezzo è poroso e l'acquifero è confinato;
- il flusso è in regime transitorio;
- l'acqua proviene solo dall'immagazzinamento dell'acquifero;
- il diametro del pozzo in prova è piccolo e il suo immagazzinamento è trascurabile.

Si tratta di condizioni non sempre riscontrabili nei casi pratici.

In generale, per ogni caso e tipologia di acquifero si possono prendere in considerazione diversi altri metodi, che qui non vengono descritti e per i quali si rimanda alla bibliografia attinente.

5.4 Misure dei parametri idrochimici

Durante la terza campagna freaticometrica, si è colta l'occasione per realizzare dei campionamenti dei parametri idrochimici di falda, adeguatamente distribuiti in tutto il territorio di interesse. L'elaborazione di tali parametri rientra in un più ampio progetto di ricerca svolto in collaborazione con il Centro Idrico di Novoledo, in merito al monitoraggio della qualità delle acque nel territorio vicentino.

Il territorio, come già detto, per la sua particolare caratterizzazione idrogeologica, è particolarmente vulnerabile dal punto di vista qualitativo, essendo influenzabile, per la sua conducibilità idraulica, dalle numerose at-

tività produttive che si sono sviluppate nei decenni in tutta l'alta pianura vicentina.

Dunque la caratterizzazione idrochimica, oltre essere di particolare importanza per definire le caratteristiche migliori affinché l'impianto geotermico non vada in rapido deterioramento, può essere valutato come valido strumento per una adeguata pianificazione dello sfruttamento delle risorse sotterranee.

Tali parametri non rientrano propriamente nel set di informazioni utili a caratterizzare l'idoneità al geoscambio, perciò alcune considerazioni in merito vengono riportate a parte in **Appendice A**; sono comunque da ritenersi un fattore rilevante, da tenere in debito conto per l'eventuale installazione di impianti geotermici.

Di seguito vengono descritte le modalità operative che hanno permesso la preparazione, organizzazione e realizzazione delle campagne di campionamento.

5.4.1 Recupero, verifica e cernita dei dati

Nella fase che ha preceduto le attività sperimentali si sono scelti i punti potenzialmente campionabili, ritenendo sufficienti circa un centinaio di campioni per un'analisi distribuita del territorio di studio. Si è fatto riferimento al database Sinergeo, utilizzato per le freatimetrie (si veda il paragrafo 5.2), e a quello fornito dal Centro Idrico di Novoledo (CIN). La scelta è stata effettuata seguendo, in linea generale, i seguenti principi di valutazione:

- conoscenza del sito ove effettuare il campionamento, prediligendo dunque i punti già visitati nelle precedenti due campagne freatimetriche, ove possibile. Tale scelta è stata effettuata al fine di rendere le attività di campagna più speditive;
- distribuzione omogenea dei dati su tutta la zona;
- accessibilità del punto, per quanto riguarda, in modo particolare, la strumentazione utilizzata per i campionamenti (passaggio del bailer, presenza di rubinetti, ecc.).

Sono stati effettuati i seguenti campionamenti, distribuiti come in figura 5.11:

- **Pianura in destra Brenta:**

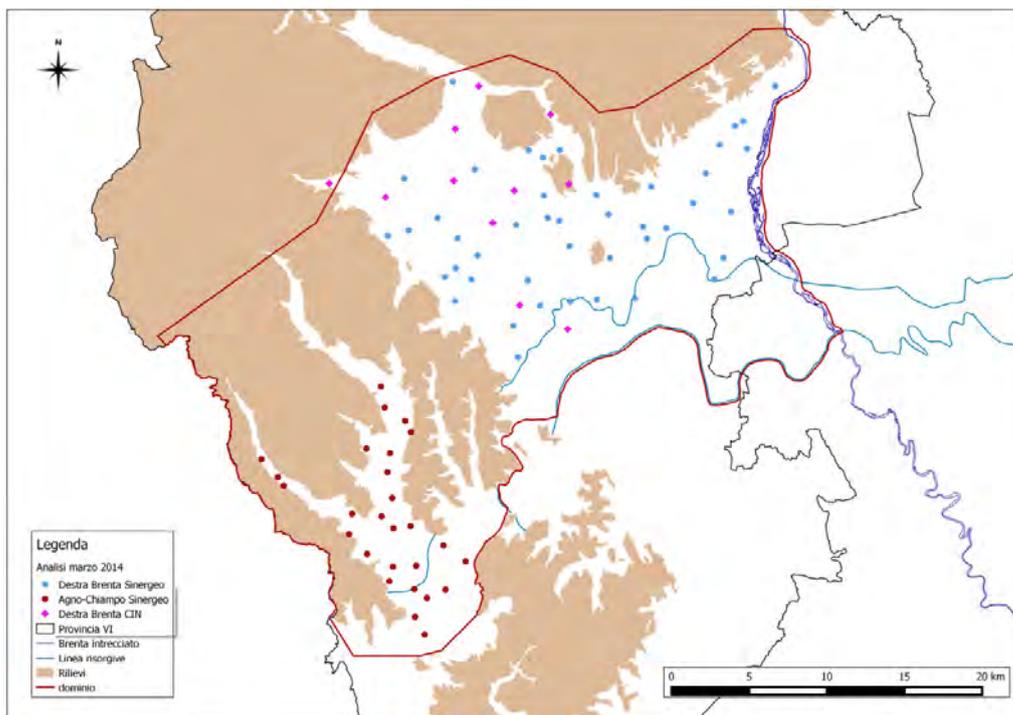


Figura 5.11: Distribuzione dei punti campionati a marzo 2014.

- punti da database Sinergo campionati: 44;
- da database CIN: 11.

Totale: 55;

- **Zona Agno-Chiampo-Guà:**

- da database Sinergo: 27;
- da database CIN: 0.

Totale: 27

In totale si sono prelevati 82 campioni.

5.4.2 Attività sperimentali

Le attività di seguito descritte si sono integrate a quelle già delineate nella sezione 5.2.2.

I campioni sono stati effettuati secondo due diverse modalità, a seconda della configurazione riscontrata in sito:

- prelievo da rubinetto, ove presente: si lascia inizialmente scorrere l'acqua affinché vengano eliminate eventuali impurità intercettate nelle tubazioni o nella parte superiore della superficie libera;



Figura 5.12: Bailer utilizzato per i campionamenti, ove non presente rubinetto.

- prelievo mediante bailer (figura 5.12): vengono effettuati degli spurghi iniziali (estrazione di una parte dell'acqua prima del campionamento), soprattutto per quanto riguarda i piezometri a piccolo diametro dove sono possibili ristagni superficiali di acqua che possono non essere rappresentativi della qualità dell'acquifero.

Le aliquote di acqua prelevata sono state conservate in appositi contenitori frigoriferi e consegnati a scadenza giornaliera al Centro Idrico di Novoledo, che ne ha effettuato le analisi.

5.5 Dati di conduttività termica

Come descritto nel capitolo 4, la conduttività termica definisce un parametro importante per la definizione delle qualità termiche del terreno.

I valori di conduttività termica sono stati valutati a partire dai dati di letteratura, in base alle stratigrafie presenti nel territorio. Queste ultime sono state prese dall'archivio stratigrafico Sinergeo, selezionate in base alla zona di interesse e alla profondità. Sono stati considerati, infatti, i punti

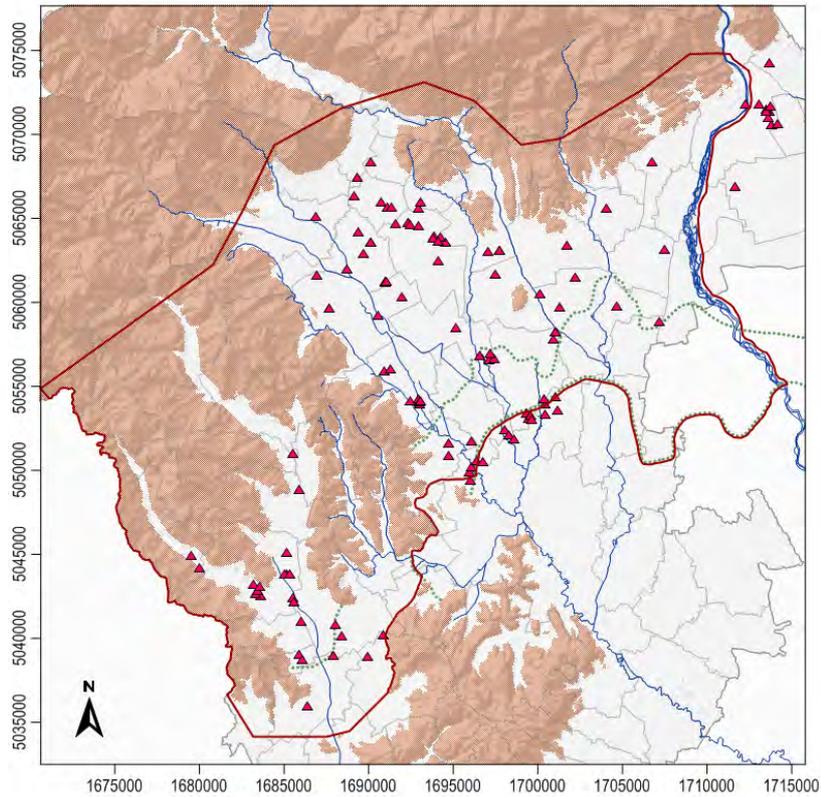


Figura 5.13: Distribuzione delle stratigrafie considerate per la valutazione della conduttività termica.

Tabella 5.1: Tabella esempio sull'organizzazione del database stratigrafico.

N-progr	ID-strat	Top	Bottom	Litologia	matrice
2394	125_065	0	5	ghiaia media	
2395	125_065	5	12.5	ghiaia media	argilla
2396	125_065	12.5	14	argilla	
2397	125_065	14	20	ghiaia media	

con profondità comprese tra i 90 e 100 metri, che sono i valori di interesse per il presente studio. In totale si sono considerate 115 stratigrafie, distribuite come in figura 5.13. Le stratigrafie sono raccolte nel database come riportato in figura 5.14 e in tabella 5.1.

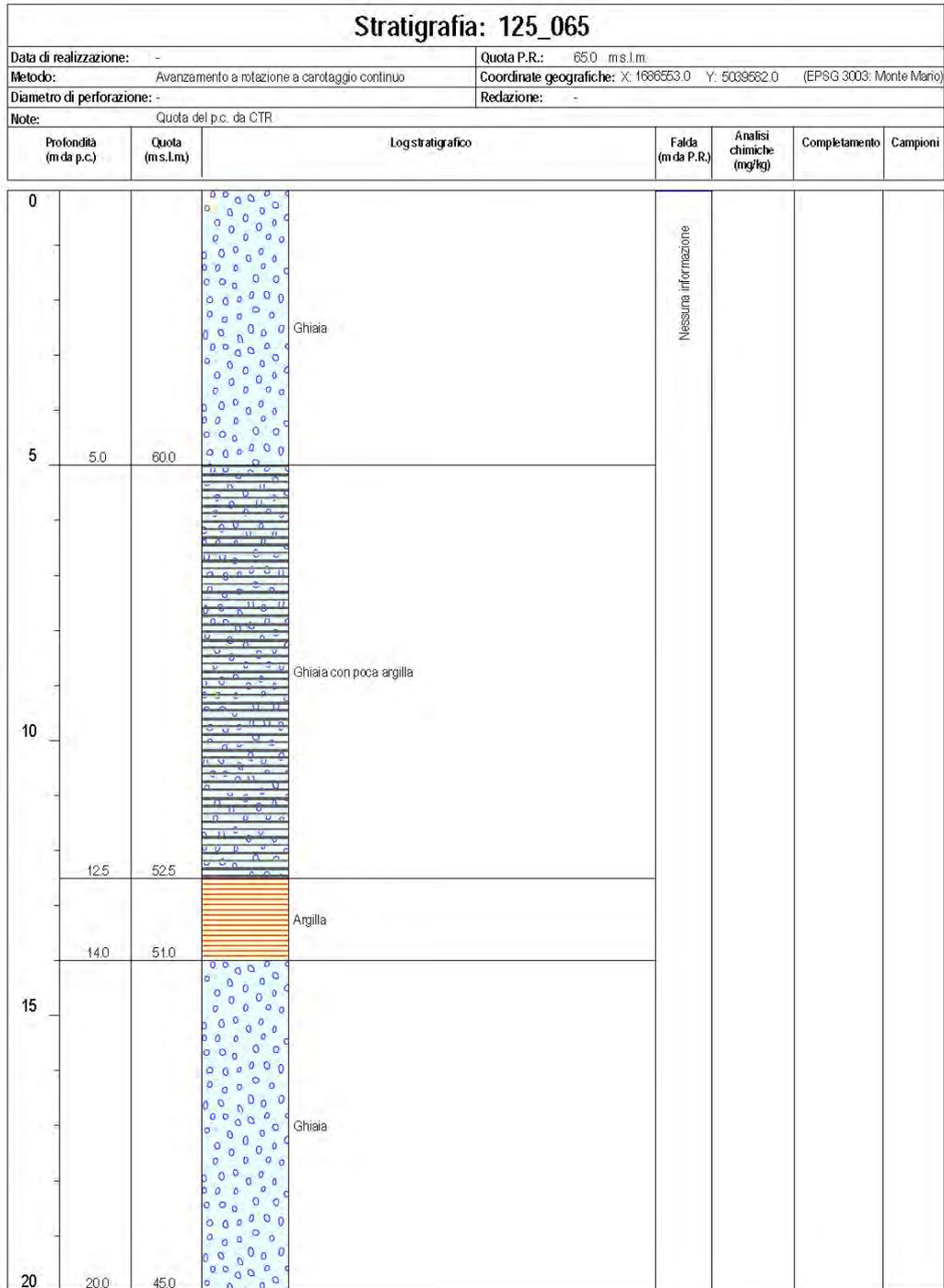


Figura 5.14: Esempio di rappresentazione stratigrafica.

Capitolo 6

Cartografia tematica

6.1 Premesse

Nell'ambito delle attività di elaborazione sono stati analizzati i dati idrogeologici e stratigrafici che maggiormente influenzano il comportamento del terreno dal punto di vista dello scambio termico (Galgaro, 2012). I parametri utilizzati, ritenuti significativi ai fini della caratterizzazione geotermica, sono:

- le proprietà di carattere geologico quali la tessitura dei materiali,
- le informazioni di tipo idrogeologico, quali la quota della prima falda, la conducibilità idraulica, la velocità della falda,
- le grandezze di tipo termodinamico quali la conducibilità termica del terreno e la distribuzione della temperatura nel sottosuolo.

Il presente elaborato si attiene alle modalità operative sviluppate in diversi progetti analoghi nel territorio veneto tra cui si citano il progetto STRIGE (che ha sviluppato i tematismi a scala regionale - Regione Veneto e Dipartimento di Geoscienze dell'Università degli Studi di Padova, 2013), lo studio realizzato per il territorio della Provincia di Treviso (Provincia di Treviso e Dipartimento di Geoscienze dell'Università degli Studi di Padova, 2010), il progetto europeo LEGEND “Low Enthalpy Geothermal Energy Demonstration cases for Energy Efficient building in Adriatic area” con le applicazioni in Provincia di Rovigo (Sinergeo, 2014).

La banca dati lito-stratigrafica ed idrogeologica raccolta ha permesso la realizzazione di diversi elaborati cartografici tematici. In particolare, i parametri fisici ritenuti significativi e considerati al fine di caratterizzare la zonazione termica del sottosuolo sono:

- gradiente geotermico;
- conducibilità termica su base stratigrafica;
- flusso termico;
- livelli freaticometrici;
- velocità di falda.

Le elaborazioni dei dati sono state eseguite mediante interpolazione con il metodo Kriging. La produzione delle carte tematiche è stata gestita attraverso il software Surfer 12.

6.2 Gradiente termico

L'assetto termico nei primi metri di profondità, come si è già fatto presente, è condizionato dai livelli di irraggiamento e di assorbimento dell'energia solare. Più in profondità, invece, prevale il contributo del flusso di calore geotermico di origine endogena.

Il gradiente geotermico corrisponde alla variazione di temperatura in relazione alla profondità:

$$gradT = \frac{dT}{dz} \quad (6.1)$$

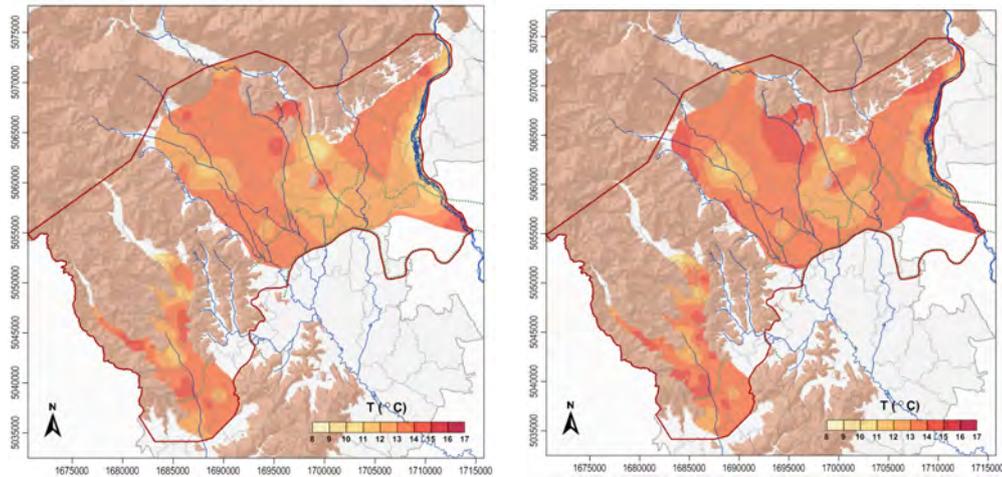
Si assume, dunque, che la temperatura del sottosuolo, esclusi i primi metri di profondità*, vari in maniera pressochè lineare, all'aumentare dei z .

Al fine di elaborare una mappa del gradiente termico, si sono dapprima considerati i dati di temperatura ottenuti nelle tre campagne sperimentali, elaborando le relative mappe di distribuzione del parametro. Da questi dati si è poi calcolato il gradiente come verrà spiegato nel proseguo della trattazione.

6.2.1 Distribuzione della temperatura profonda

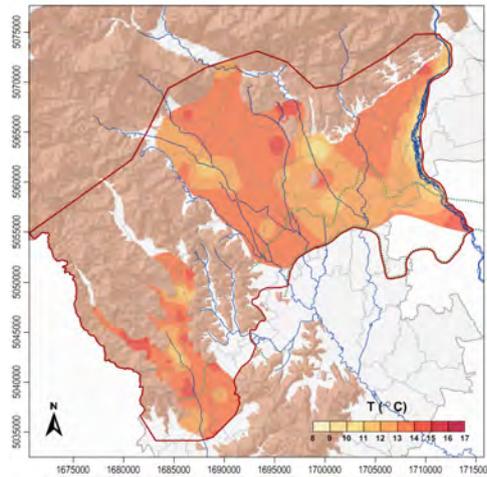
Per l'elaborazione delle mappe di temperatura profonda sono stati utilizzati i valori registrati in corrispondenza del fondo foro dei punti di controllo, escludendo tutte le misure effettuate a profondità inferiori ai 10 m per escludere le influenze legate ai fattori esterni (energia solare).

*in alcuni casi già dopo dieci metri non si ha più l'influenza dell'irraggiamento solare



(a) *Giugno 2013.*

(b) *Agosto 2013.*



(c) *Marzo 2014.*

Figura 6.1: Mappe di temperatura per profondità superiori a dieci metri.

Si ribadisce che tale valore è comunque indicativo, in quanto possono verificarsi delle anomalie causate da diversi fattori (e.g. situazione idrogeologica, influenze da parte dell'attività umana).

In figura 6.1 sono riportate le elaborazioni delle temperature per profondità maggiori di dieci metri.

Si osserva la presenza di alcune zone in cui la temperatura profonda risulta più fredda rispetto al resto del territorio; si nota, inoltre, che le temperature minori si collocano in prossimità dei fiumi. Si può assumere, quindi, che l'apporto dispersivo fluviale influenzi anche l'assetto termico del sottosuolo profondo. Tale peculiarità va studiata anche in base ai monitoraggi, i quali permettono di indicare le correlazioni presenti tra i parametri in analisi; si ribadisce, dunque, l'importanza di integrare attività di monitoraggio

opportunamente distribuite nella regione di interesse.

6.2.2 Mappa del gradiente di temperatura

Per la mappatura del gradiente termico, si sono messe in relazione le temperature medie superficiali e quelle profonde.

Operativamente, si è incrociato il raster delle temperature medie dell'aria ricavate dalle stazioni di monitoraggio ARPAV (Figura 3.4 a pagina 27) con lo shape dei punti coinvolti nelle attività sperimentali di misura delle temperature di falda. Si è dunque proseguito con il calcolo del gradiente, secondo lo sviluppo dell'equazione (6.1):

$$gradT = \frac{T_{prof} - T_{m,sup}}{z_{prof} - 0} \quad (6.2)$$

Si sono confrontati i risultati relativi alle tre campagne, tenendo in considerazione solo quei punti in cui i tre valori risultassero circa costanti, considerandoli dunque rappresentativi al fine dell'elaborazione.

I punti utilizzati per l'interpolazione sono in tutto 54, distribuiti come in figura 6.2. La distribuzione del gradiente termico così ottenuta viene indicata in figura 6.3. Si osserva che le variazioni minori di temperatura si collocano in prossimità del sistema infravallivo della Valle del Chiampo e della Valle dell'Agno e in prossimità del sistema Leogra-Timonchio. Per il resto del territorio in media si hanno variazioni tra 2.5° C e 5° C ogni 100 m.

6.3 Velocità di falda

La velocità di falda è stata ricavata secondo la relazione di Darcy:

$$v_f = ki \quad (6.3)$$

dove:

- k (m/s) è la conducibilità idraulica;
- i è il gradiente idraulico, valutato sulla base dei valori freaticometrici.

Tale parametro risulta di particolare importanza nei fenomeni di scambio termico, soprattutto in un territorio come quello di studio, dove si han-

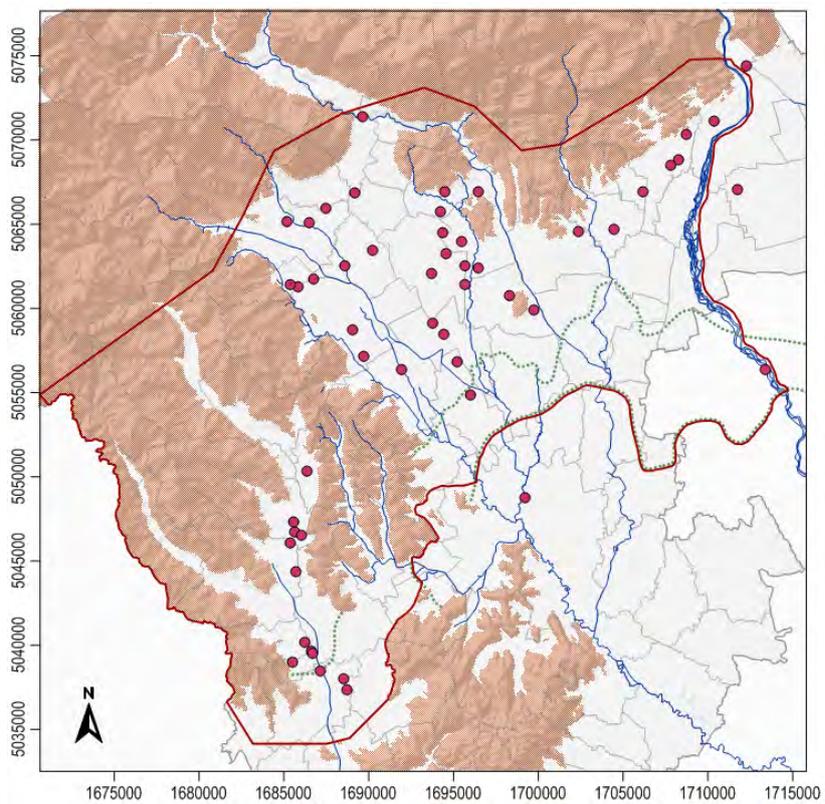


Figura 6.2: Distribuzione dei punti utilizzati per l'elaborazione del gradiente termico.

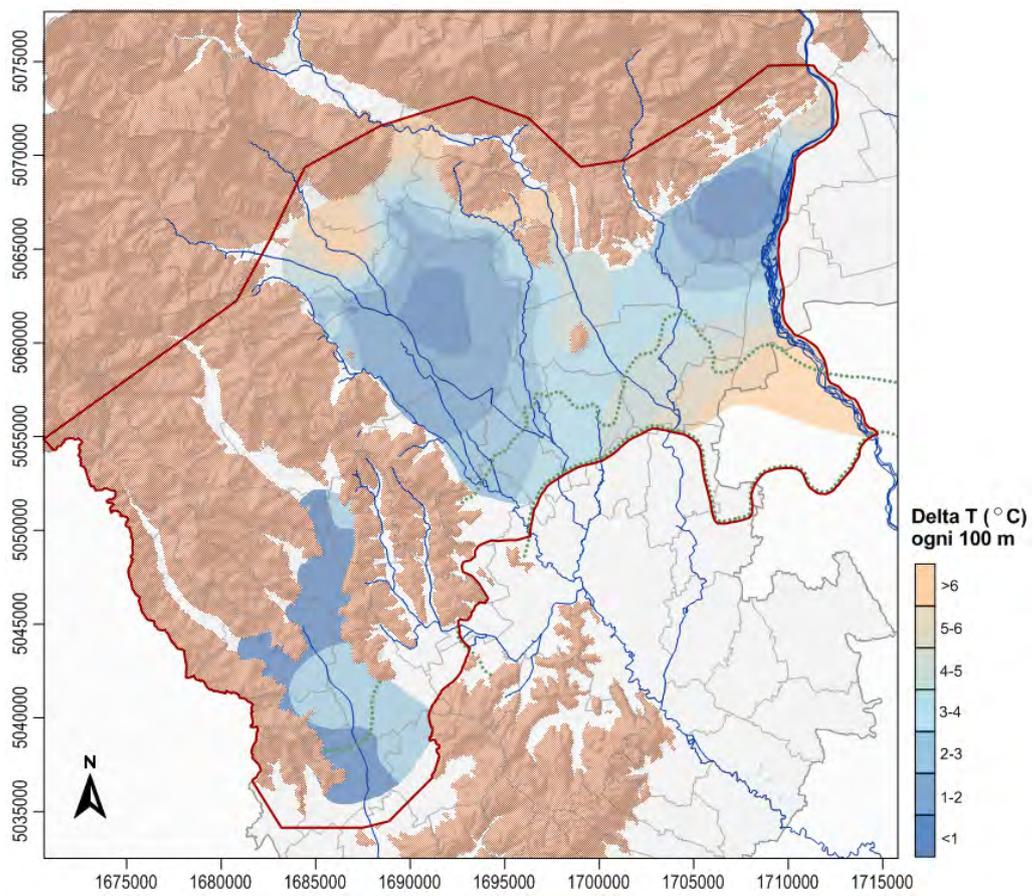


Figura 6.3: Mappa della distribuzione del gradiente termico: variazione di temperatura ogni 100 m.

no valori apprezzabili, visto l'assetto idrogeologico definito dal materasso alluvionale.

6.3.1 Freatimetria e gradiente idraulico

Lo studio dei livelli di falda costituisce un fattore rilevante nell'analisi dei fenomeni di scambio termico. L'andamento freaticometrico, infatti, influenza in maniera consistente i valori di velocità di falda, in base al gradiente idraulico, e inoltre costituisce un fattore di rilevante importanza nell'attribuzione dei valori di conducibilità termica, come accennato nel Capitolo 4 e come verrà delineato nel prossimo paragrafo.

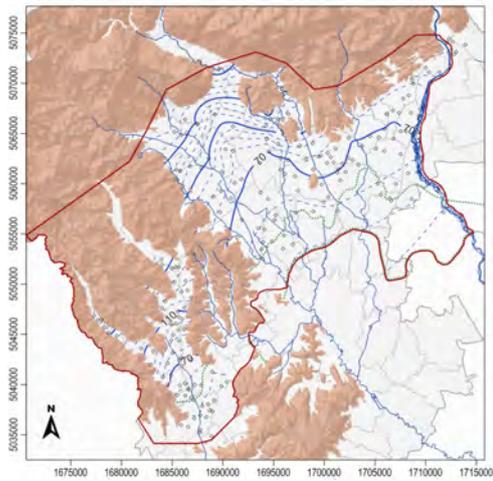
A partire dalle attività sperimentali, i dati di livello della falda sono stati interpolati, sviluppando così le carte freaticometriche (Figura 6.4) elaborate per le tre campagne dati. L'analisi della distribuzione delle isofreatiche conferma quanto già scritto circa le direzioni preferenziali del deflusso sotterraneo.

La valutazione del gradiente idraulico è dato da $\delta h/\delta L$, ovvero il rapporto tra la variazione del carico idraulico in misura di una determinata distanza. Le carte freaticometriche e i relativi valori di gradiente idraulico sono stati calcolati con il software Surfer, mediante la relativa funzione di calcolo.

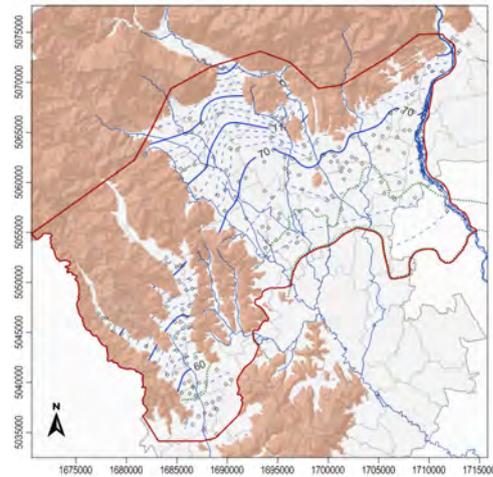
La freaticometria scelta per tale analisi è quella relativa alla campagna di agosto 2014, che presenta valori intermedi di quota di falda rispetto a quella registrata nell'ultimo periodo, come si vede in figura 6.5. Le campagne di giugno 2013 e marzo 2014 sono invece state eseguite in prossimità di due picchi di falda dovuti all'eccezionalità degli eventi che hanno caratterizzato il periodo di studio. Con le dovute approssimazioni, dunque, si può ritenere che i valori di agosto rappresentino il livello medio cercato. Si noti comunque che l'andamento delle isofreatiche è simile nelle elaborazioni, dunque si ottengono distribuzioni e valori del gradiente idraulico non molto dissimili tra loro.

La carta tematica del gradiente idraulico, relativa all'uscita di agosto, viene riportata in figura 6.6.

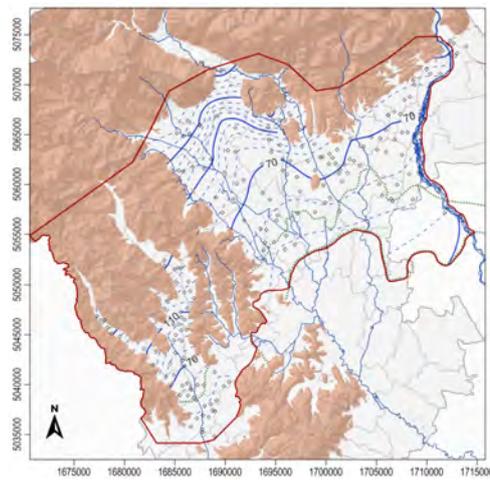
Come ci si aspetta, i valori maggiori del gradiente si riscontrano dove le isofreatiche sono più ravvicinate tra loro. In particolare, valori apprezzabili si osservano nella zona tra Schio e Thiene, ovvero nella pianura compresa tra il Leogra-Timonchio e l'Astico.



(a) *Giugno 2013.*



(b) *Agosto 2013.*



(c) *Marzo 2014.*

Figura 6.4: Carte freatiche elaborate a partire dai dati ottenuti dalle attività sperimentali.

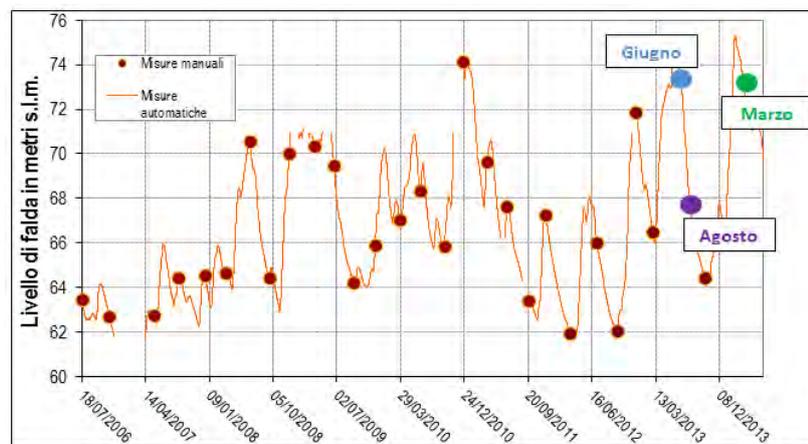


Figura 6.5: Monitoraggio dei livelli di falda: localizzazione dei livelli relativi alle tre campagne freatiche.

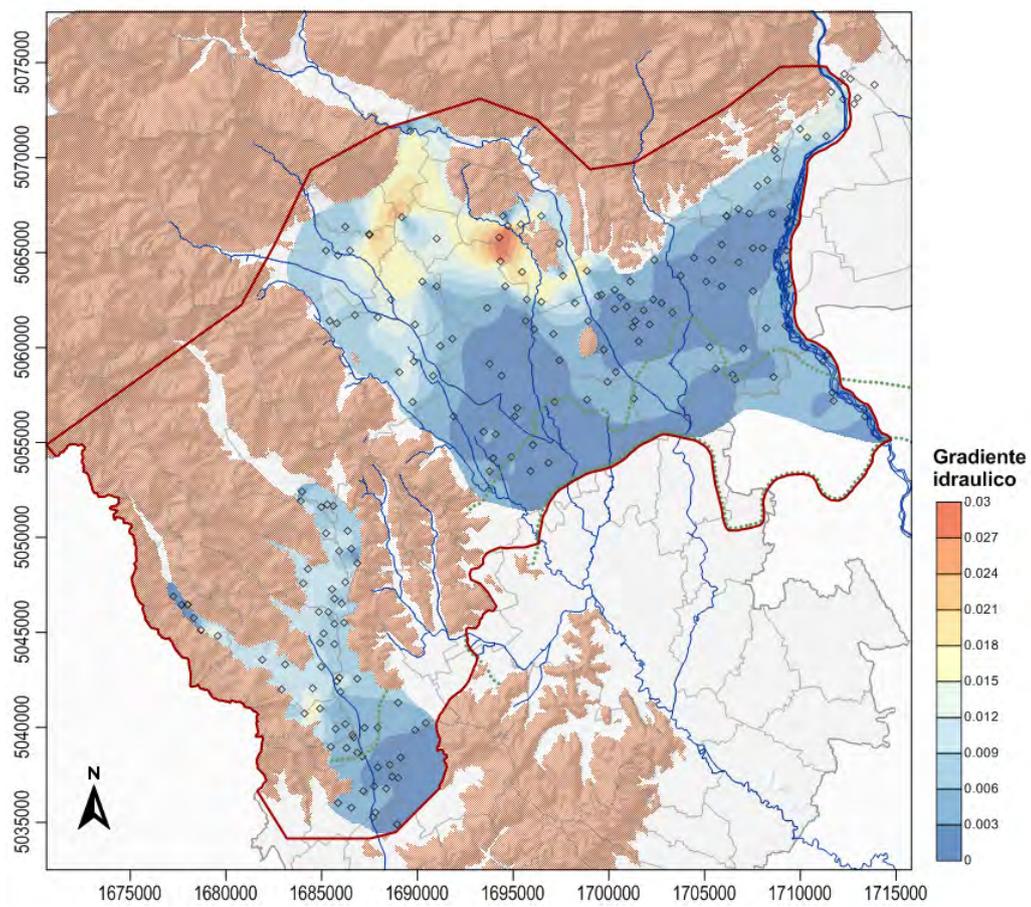


Figura 6.6: Distribuzione spaziale del gradiente idraulico relativo al mese di agosto 2013.

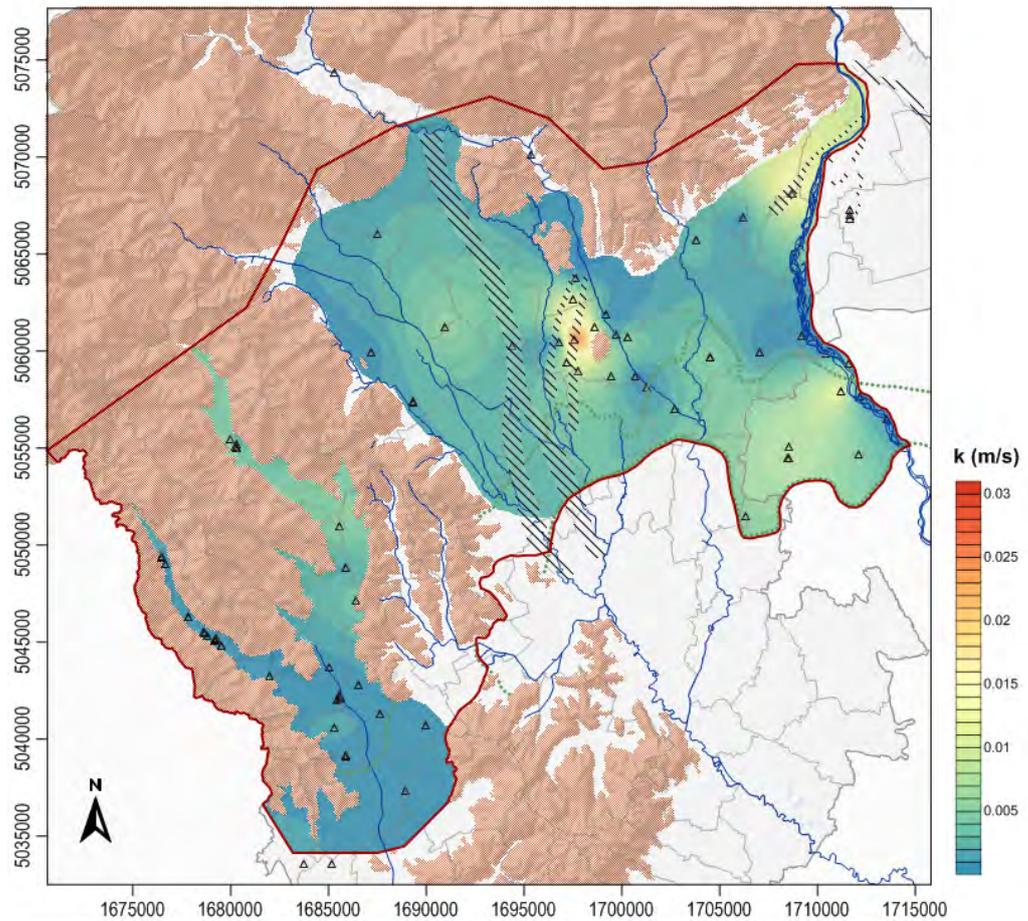


Figura 6.7: Distribuzione spaziale della conducibilità idraulica del livello acquifero freatico elaborata a partire dai valori ottenuti dalle prove di pompaggio.

6.3.2 Elaborazione della conducibilità idraulica

Come già preannunciato nel capitolo precedente, l'elaborazione della conducibilità idraulica si è basata sui dati forniti dalle prove di pompaggio. Dall'interpolazione mediante kriging ordinario, si ottiene la relativa mappa tematica, riportata in figura 6.7, in cui sono stati riportati anche alcuni elementi strutturali di interesse come i paleoalvei (visualizzati con retino tratteggiato nero).

La distribuzione del parametro risulta coerente con la caratterizzazione idrogeologica dell'area; ciò può essere confermato confrontando i valori mappati con quelli tipici di letteratura, riportati in tabella 6.1. Si hanno, infatti, ordini di grandezza tipici delle ghiaie e ghiaie miste a sabbia, a confermare la preponderante presenza di materiali propri dei depositi alluvionali.

In particolare, si evidenziano due zone in cui si hanno valori particolarmente alti di conducibilità idraulica. Facendo un confronto incrociato

Tabella 6.1: Caratteristiche di conducibilità idraulica dei terreni (da Casagrande e Fadum, 1940).

k (cm/sec)	10 ³	10	1,0	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	
Drenaggio	Buono			Ridotto			Praticamente nullo						
Tipo di terreno	Ghiaia pulita	Sabbie pulite, misto di ghiaie e sabbie pulite			Sabbie molto fini, limo organico ed inorganico, misti di sabbie, limi e argille ecc.			terreno impermeabile, argille omogenee al di sotto della coltre d'alterazione atmosferica.					
		terreno impermeabile, argille con modificazioni strutturali generate da vegetazione ed alterazione in sito											

tra l'elaborazione riportata e la geometria dei paleovalvei, si può ipotizzare di attribuire a questi ultimi la presenza di materiale particolarmente permeabile.

6.3.3 Mappa della velocità di falda

Le elaborazioni cartografiche della conducibilità idraulica e del gradiente sono state utilizzate per ottenere le velocità di falda attraverso l'applicazione dell'equazione (6.4), mediante il software Surfer (figura 6.8).

Si nota come i due parametri influiscano sulla determinazione della velocità, in particolare si osserva l'importante influenza determinata dalla conducibilità idraulica. I valori maggiori di velocità si riscontrano, dunque, nella pianura compresa tra il sistema Leogra-Timonchio e il Fiume Astico e in prossimità del Fiume Brenta, soprattutto nella zona a sud di Bassano del Grappa.

6.4 Mappa della conducibilità termica

La mappa della conducibilità termica è stata sviluppata calcolando per ogni stratigrafia la conducibilità equivalente media, pesata sullo spessore, secondo la relazione:

$$\lambda_{eq} = \frac{\sum_i (\lambda_{iN} b_{iN} + \lambda_{iS} b_{iS})}{b_{tot}} \quad (6.4)$$

dove:

- λ_{iN} è il valore di conducibilità termica corrispondente alla litologia i (che può essere ghiaia media, sabbia e ghiaia, argilla, ecc.) di strato non saturo;

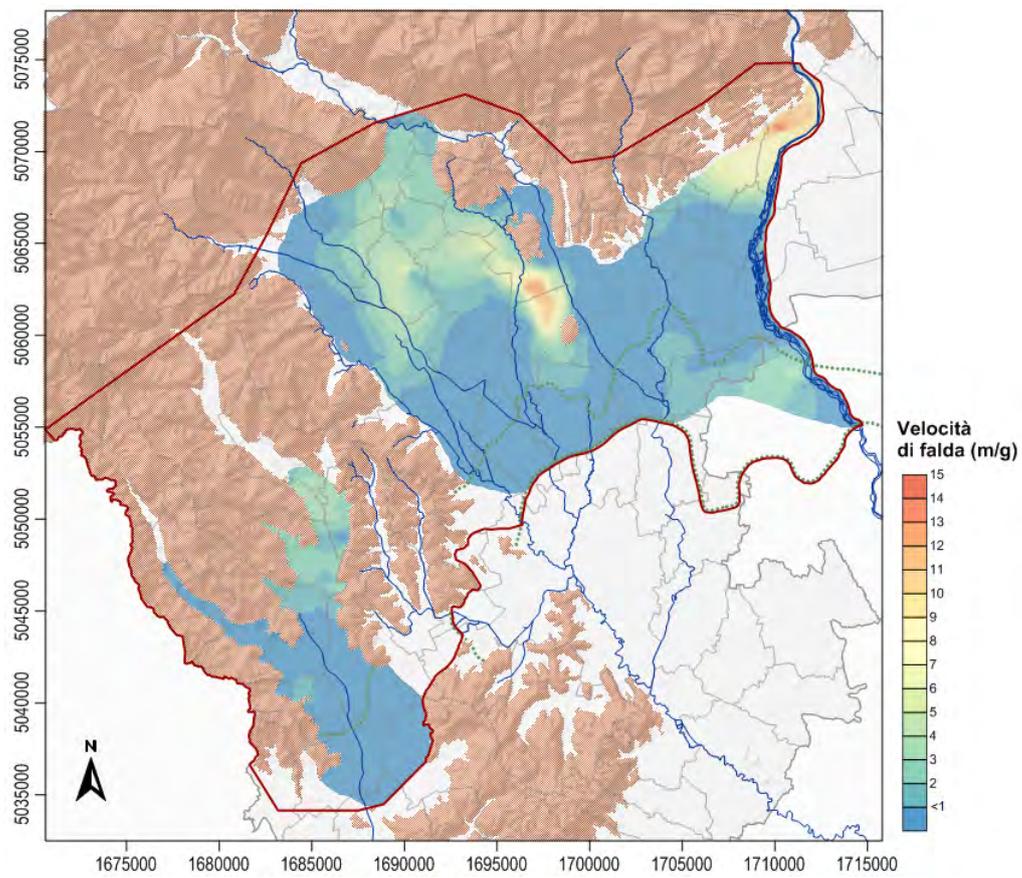


Figura 6.8: Carta tematica della velocità di falda in m/g.

- b_{iN} è lo spessore dello strato della litologia i in condizioni non sature;
- λ_{iS} è il valore di conducibilità termica della litologia i di strato saturo;
- b_{iS} è lo spessore dello strato dove è presente la litologia i , in condizioni di saturazione;
- b_{tot} è lo spessore totale del sondaggio stratigrafico.

Anche qui si è sviluppata un'analisi incrociata delle stratigrafie con la frea-timetria di agosto 2013, in modo da determinare gli spessori delle litologie in condizioni di saturazione, considerando così livelli della falda prossimi a quelli medi.

Per i valori di λ delle singole litologie si è fatto riferimento ai dati presenti in letteratura, con riferimento alle linee guida tedesche fornite dall'Associazione degli Ingegneri Tedeschi (VDI, 2010 - Tabella 6.2). Si ribadisce che si sono considerate le stratigrafie che raggiungono profondità tra i 90 e i 100 metri. Si osserva, inoltre, come alcune zone abbiano la necessità di essere approfondite, in quanto presenti poche informazioni.

In Figura 6.9 è rappresentato il risultato dell'interpolazione del parametro di conducibilità termica.

6.5 Flusso termico

Per il calcolo del flusso termico si fa riferimento alla legge di Fourier 4.2, qui sotto scritta in maniera semplificata:

$$Q = A\lambda gradT \quad (6.5)$$

Considerando l'estensione di una superficie unitaria (quindi per $A = 1$), il valore del flusso geotermico si ottiene dalla semplice moltiplicazione tra la conduttività termica e il gradiente di temperatura. Si sono quindi incrociate le mappe tematiche dei parametri interessati, ottenendo la distribuzione spaziale riportata in figura 6.10.

Si osserva come sul territorio i valori di flusso termico siano relativamente modesti, ad indicare una scarsa predisposizione del territorio a fenomeni di conduzione termica. Tale caratteristica, di fatto, è in linea con l'assetto idrogeologico del territorio.

Tabella 6.2: Caratteristiche termometriche dei terreni (VDI,2010).

Roccia	Massa volumica	Conduttività termica		Capacità termica volumetrica
	[kg/m ³]	[W/(m K)]		[MJ/(m ³ K)]
		Valor medio		
Rocce magmatiche				
Basalto	2,6-3,2	1,3-2,3	1,7	2,3-2,6
Diorite	2,9-3,0	2,0-2,9	2,5	2,9
Gabbro	2,8-3,1	1,7-2,9	2,0	2,6
Granito	2,4-3,0	2,1-4,1	3,2	2,1-3,0
Riolite	2,6	3,1-3,4	3,3	2,1
Rocce metamorfiche				
Gneiss	2,4-2,7	1,9-4,0	2,9	1,8-2,4
Marmo	2,5-2,8	2,1-3,1	2,5	2,0
Quarzite	2,5-2,7	5,0-6,0	5,5	2,1
Miscascisti	2,4-2,7	1,5-3,1	2,2	2,2-2,4
Anfibolite	2,6-2,9	2,1-3,6	2,9	2,0-2,3
Rocce sedimentarie				
Arenaria	2,2-2,7	1,9-4,6	2,8	1,8-2,6
Calcare	2,4-2,7	2,0-3,9	2,7	2,1-2,4
Marna	2,3-2,6	1,8-2,9	2,3	2,2-2,3
Rocce argillose/limose	2,4-2,6	1,1-3,4	2,2	2,1-2,4
Materiale non consolidato				
Argilla/limo - secco	1,8-2,0	0,4-1,0	0,5	1,5-1,6
Argilla/limo - umida	2,0-2,2	1,1-3,1	1,8	2,0-2,8
Ghiaia secca	1,8-2,2	0,4-0,9	0,4	1,3-1,6
Ghiaia umida	1,9-2,3	1,6-2,5	1,8	2,2-2,6
Depositi morenici	1,8-2,3	1,1-2,9	2,4	1,5-2,5
Sabbia secca	1,8-2,2	0,3-0,9	0,4	1,3-1,6
Sabbia umida	1,9-2,3	2,0-3,0	2,4	2,2-2,8
Torba	0,5-1,1	0,2-0,7	0,4	0,5-3,8

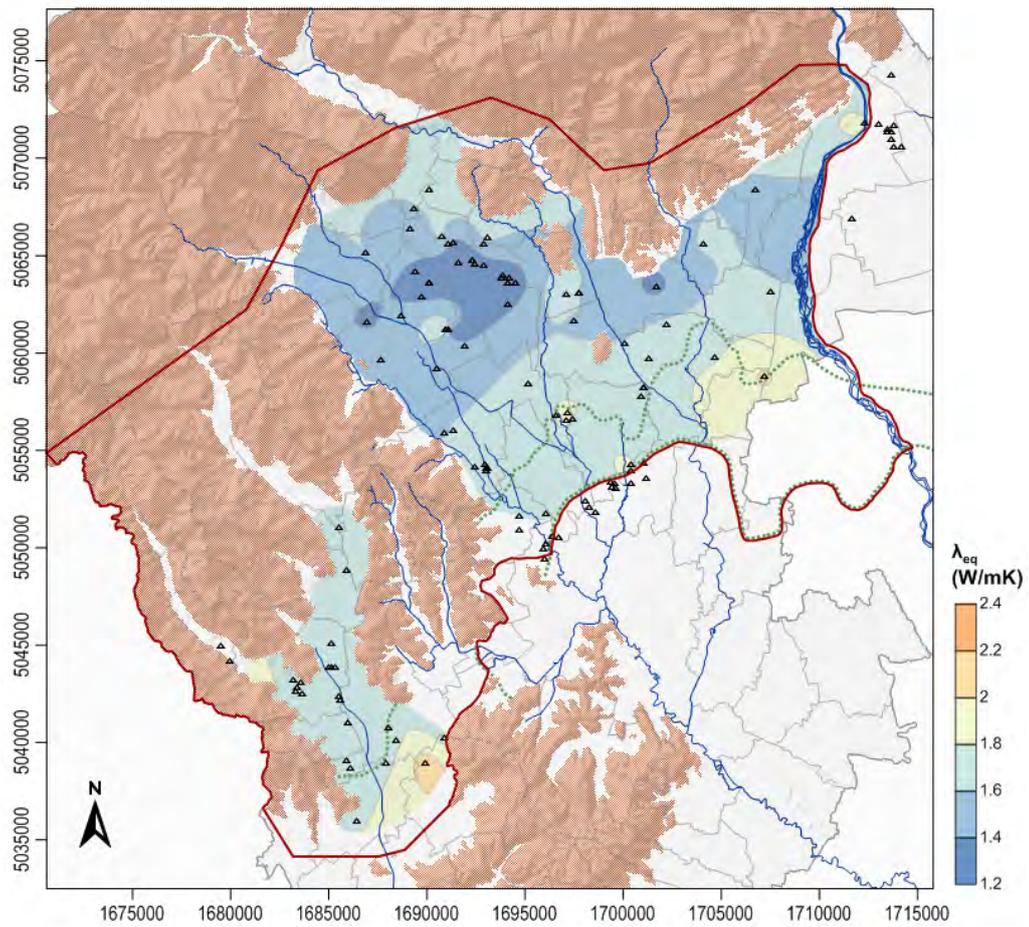


Figura 6.9: Carta tematica della conduttività termica (W/mK).

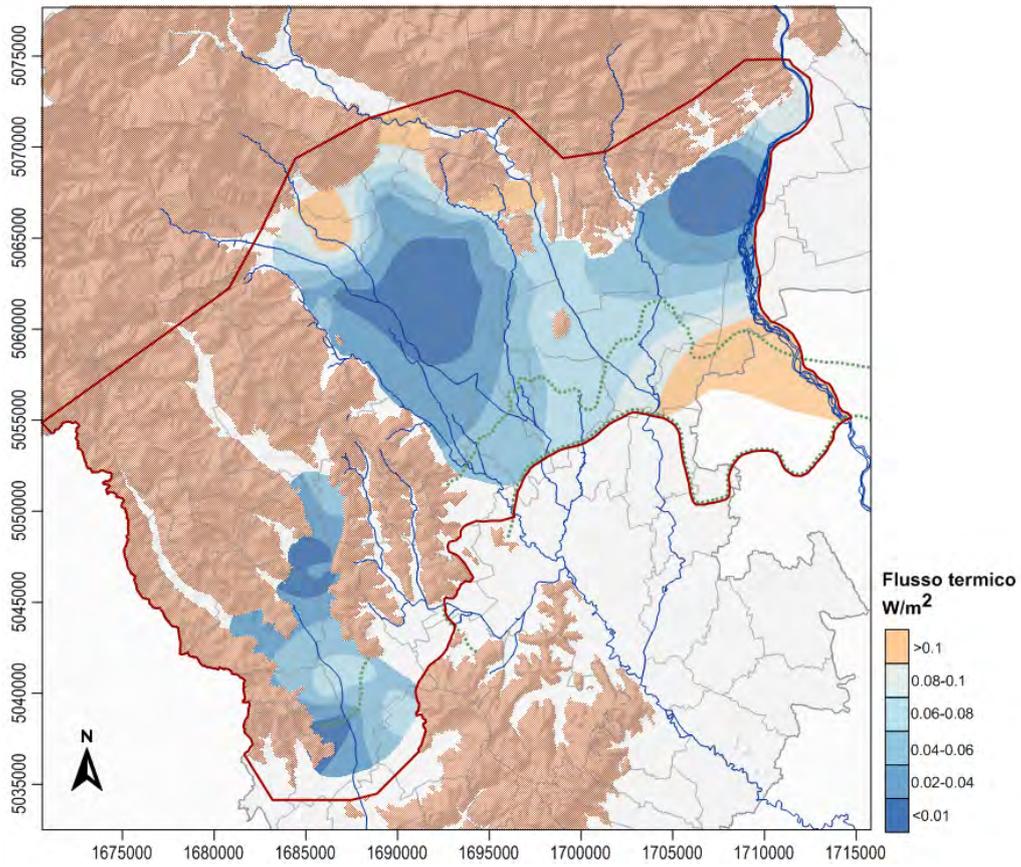


Figura 6.10: Carta tematica del flusso termico (W/m^2).

Capitolo 7

Idoneità al geoscambio

7.1 Potenziale di scambio geotermico

Per la realizzazione della carta del potenziale al geoscambio sono stati utilizzati i parametri di conducibilità termica, gradiente termico e velocità di falda.

L'approccio utilizzato segue le modalità sviluppate in progetti analoghi relativi ai territori della Provincia di Treviso e del Polesine (si vedano i riferimenti nell'introduzione del capitolo 6).

Poichè le grandezze considerate non sono confrontabili tra loro, è stato necessario normalizzarle al rispettivo valore massimo.

Il potenziale di geoscambio è quindi definito dalla seguente formula, la quale si basa su approcci sperimentali, ancora in fase di sviluppo:

$$P = gradT + \lambda + v_f \quad (7.1)$$

dove:

- P è il potenziale di geoscambio;
- $gradT$ è il gradiente termico;
- λ è la conduttività termica;
- v_f è la velocità di falda.

Il risultato finale è stato reso attraverso una classificazione che metta in luce i diversi livelli di capacità al geoscambio: bassi, medi, elevati, molto elevati.

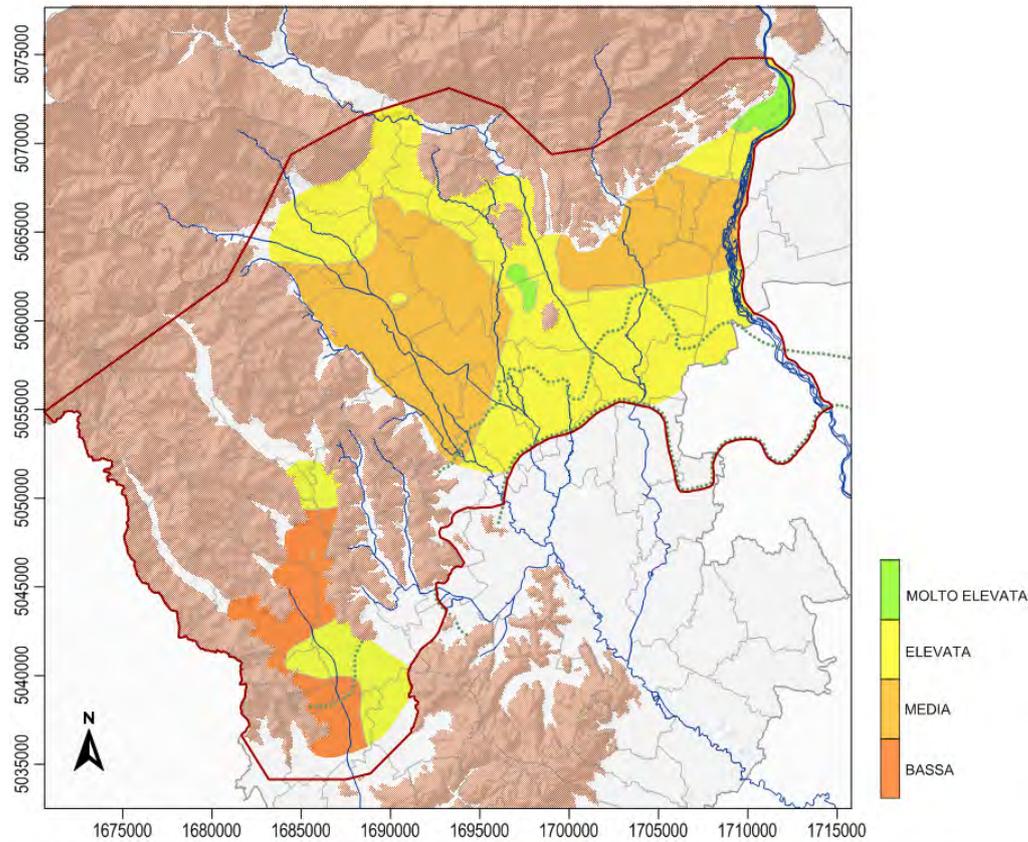


Figura 7.1: Carta della capacità al geoscambio.

Operativamente si è proceduto con la sovrapposizione mediante Surfer dei raster dei tre parametri adimensionalizzati, ottenendo la mappa che viene riportata in figura 7.1.

Si nota l'importante influenza data dal gradiente termico unitamente ad un apprezzabile contributo dato dalla velocità di falda; sembra meno evidente, invece, l'influenza data dalla conducibilità termica.

Si osserva, in generale, una discreta predisposizione del territorio allo scambio geotermico; la zona a valle di Bassano appare particolarmente idonea, in funzione soprattutto dell'elevata conducibilità idraulica. Un altro punto in cui la capacità di geoscambio è stata classificata "molto elevata" si trova in prossimità dei comuni di Sarcedo e Montecchio Precalcino; anche qui gli elevati valori di conducibilità idraulica contribuiscono in maniera apprezzabile all'idoneità del territorio.

7.2 Aree di salvaguardia

Il D.Lgs n. 152 del 3/04/2006 stabilisce le norme in materia ambientale e in particolare individua nel Piano di Tutela delle Acque (PTA) lo strumento regionale per definire le aree di salvaguardia delle acque destinate al consumo umano.

Le opere di presa sono preservate principalmente dalle zone di tutela assoluta e dalle zone di rispetto. In base all'articolo 6 del PTA si distinguono:

- **zona di rispetto:** *“porzione di territorio circostante la zona di tutela assoluta da sottoporre a vincoli e destinazioni d’uso tali da tutelare qualitativamente e quantitativamente la risorsa idrica e può essere suddivisa in zona di rispetto ristretta e zona di rispetto allargata, in relazione alla tipologia di opera di presa e alla situazione locale di vulnerabilità e rischio della risorsa”;*
- **zona di tutela assoluta:** *“area immediatamente circostante le derivazioni; in caso di acque sotterranee e, ove possibile, di acque superficiali, deve avere un’estensione di almeno dieci metri di raggio dal punto di captazione, deve essere adeguatamente protetta e deve essere adibita esclusivamente a opere di presa e ad infrastrutture di servizio”.*

Nell’Art. 94 del D.Lgs. 152/2006, al comma 6, inoltre, si riporta: *“In assenza dell’individuazione da parte delle regioni o delle province autonome della zona di rispetto ai sensi del comma 1, la medesima ha un’estensione di 200 metri di raggio rispetto al punto di captazione o di derivazione”.*

Il Piano di Tutela delle Acque prevede inoltre, negli Indirizzi di Piano, l’identificazione dei Comuni nel cui territorio è prevista la tutela delle falde acquifere pregiate e vengono indicate le relative profondità, da considerarsi indicative, entro cui ricadono tali acquiferi (Tabella 7.1). I Comuni che rientrano negli Indirizzi di Piano sono, nel territorio provinciale, dieci; otto di questi sono compresi nel dominio di indagine.

In figura 7.2 viene indicata la collocazione delle aree di salvaguardia e dei punti di captazione acquedottistica nel territorio di indagine.

7.3 La carta di idoneità al geoscambio

La carta di sintesi, riportata in figura 7.3, è stata redatta unendo la carta del potenziale di scambio geotermico con lo shape contenente le aree di

Tabella 7.1: Profondità delle falde sa sottoporre a tutela nella provincia di Vicenza (Art. 121 D.Lgs. 3/04/2006 n. 152).

COMUNE	ATO	profondità, m dal p.c.	fonte dei dati stratigrafici
Bressanvido (3)	Bacchiglione	50 – 60	Gestore acquedotti
Caldogno (2)	Bacchiglione	70 – 150	Gestore acquedotti
Dueville (2)	Bacchiglione	70 – 150	Gestore acquedotti
Lonigo (1)	Bacchiglione	40 – 110	Gestore acquedotti
Monticello Conte Otto (2)	Bacchiglione	100 – 190	Gestore acquedotti
Orgiano	Bacchiglione	20 – 70	Gestore acquedotti
Sandriigo (2 e 3)	Bacchiglione	70 – 150	Gestore acquedotti
Tezze sul Brenta (3)	Brenta	60 – 80	Gestore acquedotti
Vicenza (2)	Bacchiglione	50 – 240	Gestore acquedotti
Villaverla (2)	Bacchiglione	50 – 150	Gestore acquedotti

- (1) Comune compreso in parte nell'area di produzione diffusa di LONIGO – SAN BONIFACIO.
 (2) Comuni compresi interamente o in parte nell'area di produzione diffusa di CALDOGNO – DUEVILLE.
 (3) Comuni compresi interamente o in parte nell'area di produzione diffusa di CITTADELLA.

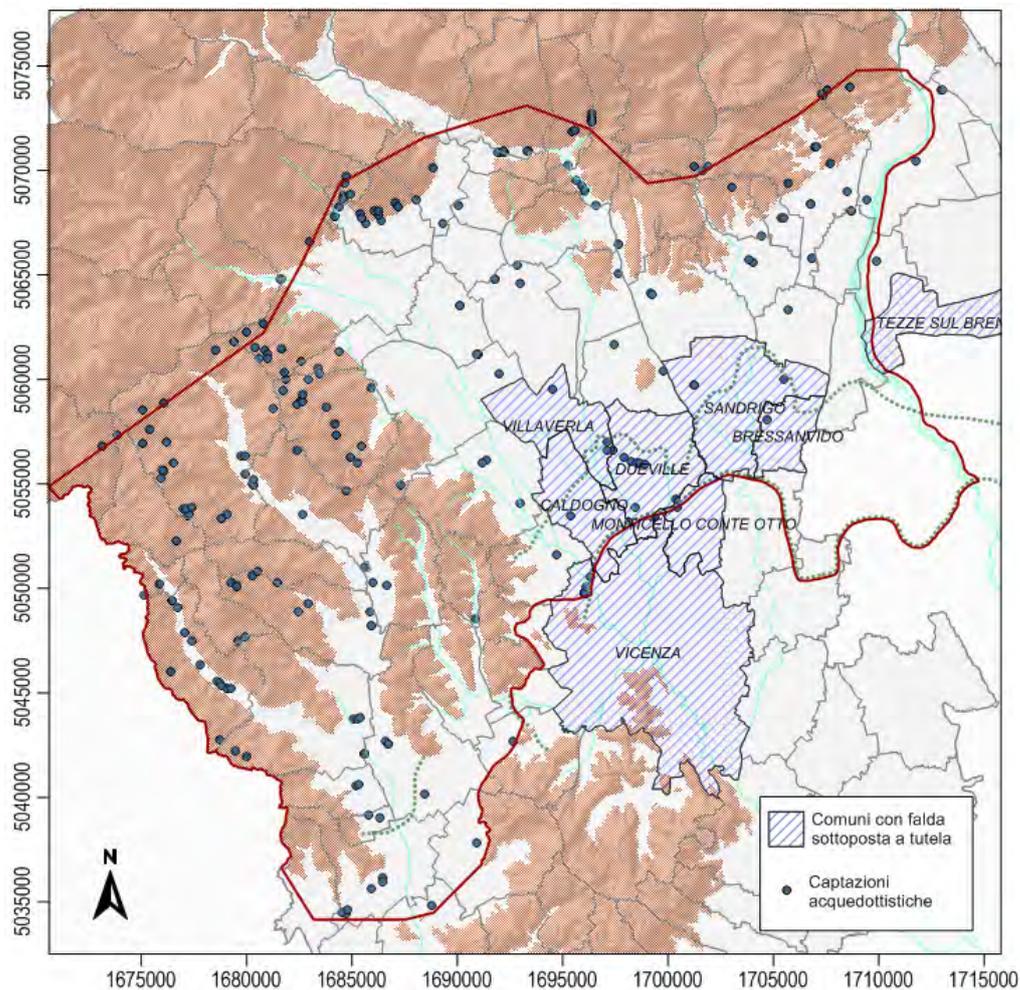


Figura 7.2: Individuazione dei comuni da sottoporre a tutela ai fini dei prelievi idropotabili e ubicazione delle prese acquedottistiche.

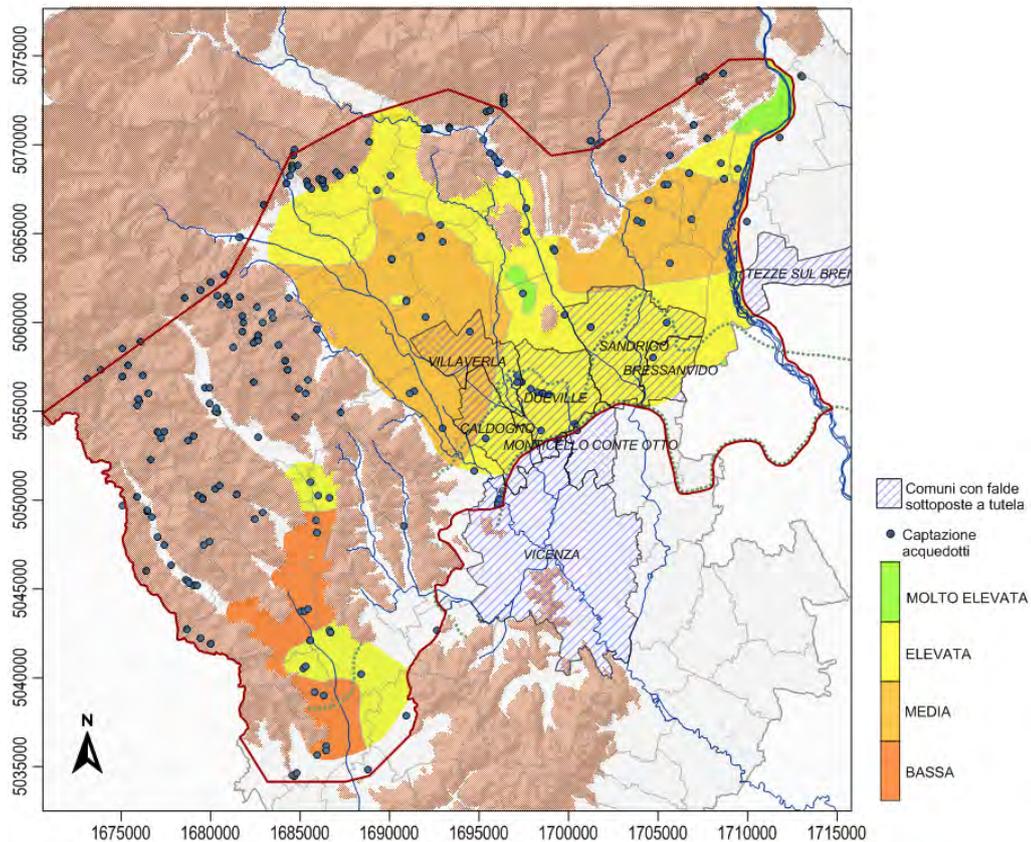


Figura 7.3: Carta di idoneità al geoscambio.

salvaguardia e i punti di captazione.

Si vuole sottolineare il carattere puramente qualitativo della definizione data alla classificazione effettuata. Si tratta, infatti, di un'analisi sperimentale, che non ha la pretesa di essere completamente esaustiva nella sua interpretazione. Pertanto, la carta di idoneità è stata redatta per costituire un eventuale supporto alla pianificazione territoriale, in quanto ha lo scopo di individuare le aree in cui lo scambio termico nel sottosuolo può comportare delle criticità nei confronti del sistema acquifero. Vengono inoltre identificate quelle zone dove i parametri considerati predispongono in maniera positiva allo scambio geotermico, già descritte in precedenza.

Si evidenzia infine, come sia importante incentivare l'indagine dei parametri termici, geologici e idrogeologici al fine di approfondire gli aspetti che possono contribuire ad una corretta pianificazione territoriale nell'ambito del geoscambio.

Appendice A

Analisi dei parametri idro-chimici

L'interpretazione dei dati delle attività sperimentali permette di tracciare una mappa dettagliata per tutta l'area di indagine. Le elaborazioni evidenziano le peculiarità del territorio vicentino dovute a differenti condizioni geologiche e idrogeologiche, soprattutto per quanto riguarda il territorio dell'alta pianura.

La distribuzione dei diversi parametri idro-chimici permette di determinare la natura e tipologia delle acque di falda. Si sono valutati, in particolare, i componenti di: calcio, bicarbonati, conducibilità elettrica, magnesio, cloruri e sodio. Si osserva che l'acquifero è prevalentemente di tipo bicarbonato-calcico (Figura A.1), fattore che condiziona la conducibilità elettrica delle acque. Secondariamente, si evidenzia la presenza di Magnesio, a conferma della natura principalmente calcarea e dolomitica delle formazioni idrogeologiche presenti nel territorio.

Le mappe relative ai parametri in questione vengono riportate in figura A.2. Si evidenzia, in particolare, come la distribuzione dei bicarbonati e del calcio nel bacino dei Fiumi Bacchiglione, Astico e Brenta comporta una riduzione nella componente salina nelle aree di ricarica fluviali. Per quanto riguarda il bacino Agno-Guà, non si evidenzia lo stesso fenomeno a causa della diversa composizione delle formazioni geologiche del bacino di alimentazione.

Le misure di conducibilità elettrica a profondità diverse evidenziano che, in corrispondenza dei tratti d'alveo disperdente a maggiori profondità la conducibilità elettrica è maggiore: è evidente quindi che l'impatto di diluizione legato alla dispersione dei fiumi perde di importanza con la profondità della falda.

La distribuzione, invece, di cloruri e sodio evidenzia delle zone con tenori

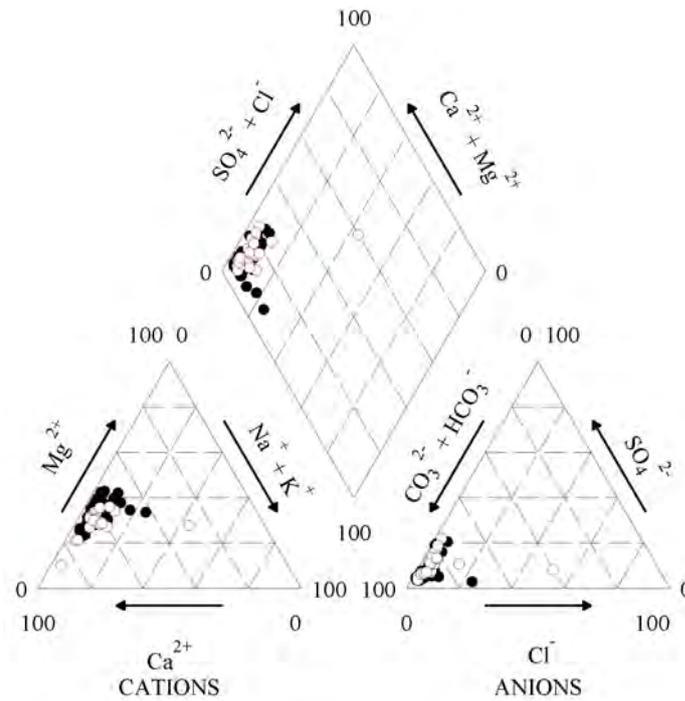
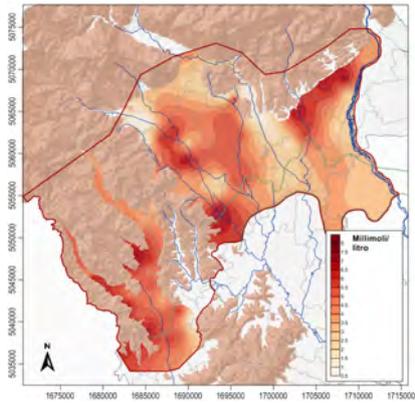


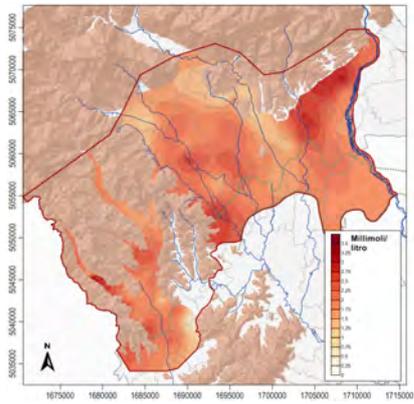
Figura A.1: Diagramma di Piper: percentuale dei parametri idro-chimici.

più elevati, ad indicare l'impatto antropico. In particolare, i cloruri sono prevalentemente distribuiti lungo gli assi di drenaggio.

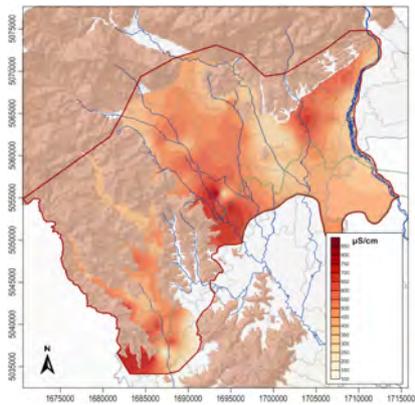
La caratterizzazione idro-chimica è, dunque, di fondamentale importanza per approfondire le conoscenze circa il quadro idrogeologico della zona di indagine. La disposizione di una rete di monitoraggio attiva al fine di un controllo mirato del territorio è essenziale per proteggere le risorse ambientali. Nell'ambito, in particolare, delle applicazioni geotermiche, permette in aggiunta di definire le zone, dal punto di vista idro-chimico, ottimali per la vita utile dell'opera di installazione.



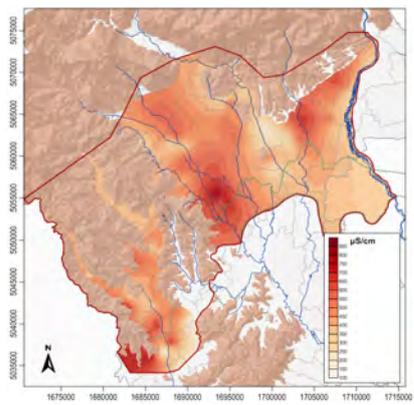
(a) *Bicarbonati.*



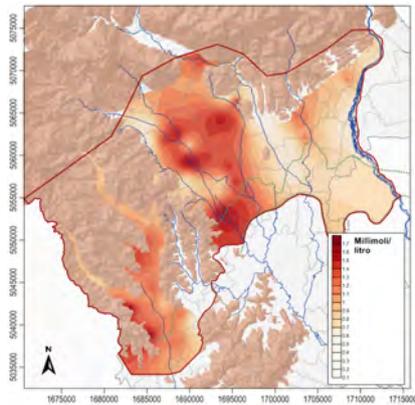
(b) *Calcio.*



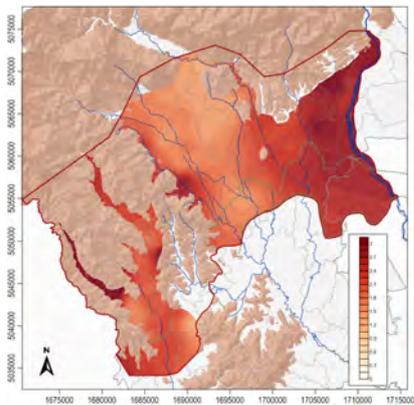
(c) *Conducibilità elettrica superficiale.*



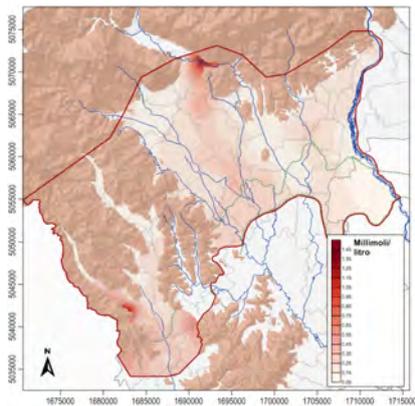
(d) *Conducibilità elettrica profonda.*



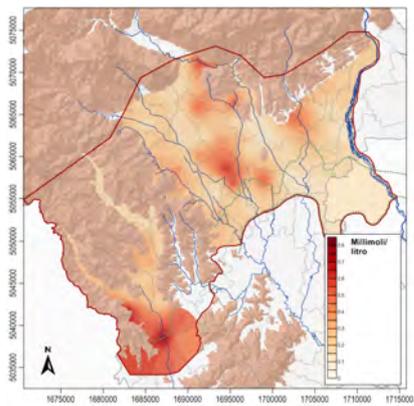
(e) *Magnesio.*



(f) *Ca/Mg.*



(g) *Cloruri.*



(h) *Sodio.*

Figura A.2: Mappe di distribuzione dei parametri idrochimici.

Bibliografia

- [1] WEB: ARPA Veneto. <http://www.arpa.veneto.it>.
- [2] WEB: Bur - Regione Veneto. <http://bur.regione.veneto.it/>.
- [3] WEB: GeoDH Project. <http://www.geodh.eu/geodh-project/>.
- [4] WEB: Geothermal Basics. <http://www.energy.gov/eere/geothermal/geothermal-basics>.
- [5] WEB: Progetto LEGEND. <http://www.legend-geothermalenergy.eu/>.
- [6] WEB: Progetto VIGOR. <http://www.vigor-geotermia.it>.
- [7] WEB: Provincia di Vicenza. <http://www.provincia.vicenza.it>.
- [8] WEB: Rapporti statistici. <http://www.gse.it/it/Statistiche/RapportiStatistici/Pagine/default.aspx>.
- [9] WEB: Unione Geotermica Italiana. <http://www.unionegeotermica.it>.
- [10] R. Antonelli, R. Dazzi, G. Gatto, G.M. Mari, G. Mozzi, and G. Zambon. *Correlazioni litostratigrafiche ed idrostrutturali nel complesso alluvionale della bassa valle del Fiume Agno-Guà e nell'antistante pianura vicentina (M. Lessini Orientali. Vicenza)*. Bollettino del Servizio Geologico d'Italia, Vol. CIX, 7-14, 1990.
- [11] R. Antonelli and G.M. Mari. *Considerazioni su uno studio idrogeologico di base per la realizzazione della carta di vulnerabilità nella bassa valle del Fiume Agno-Guà (M. Lessini Orientali. Vicenza)*. Atti Primo Congresso Nazionale sulla Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee, 1990.

- [12] T. Arola, E. Lari, H. Jukka, and K.N. Kirsti. *Mapping the low enthalpy geothermal potential of shallow Quaternary aquifers in Finland*. riv. Geothermal Energy, 2014.
- [13] S. Basta and F. Minchio. *Geotermia e pompe di calore*. Geotermia.org, 2008.
- [14] S. Bertoldo, F. Campagnolo, E. Capparotto, E. Farinatti, L. Rigato, R. Pedron, A. Sottani, M. Sacchetto, and F. Zambon. *Valutazione del potenziale di scambio geotermico relativo al territorio del Polesine e del Delta del Po*. Sinergo, 2014.
- [15] P. Blum, G. Ferguson, K.D. Balke, P. Bayer, and K. Zhu. *The geothermal potential of urban heat islands*. riv. Environmental Research Letters, Vol. 5, n. 4, 2010.
- [16] A. Cavallini and L. Mattarolo. *Termodinamica applicata*. Cleup editore, 1992.
- [17] A. Cavallini and L. Mattarolo. *Trasmissione del calore*. Cleup editore, 1992.
- [18] M. Civita and M. De Maio. *SINTACS R5: Valutazione e cartografia automatica della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento con il sistema parametrico SINTACS R5*. Quaderni di Tecniche di Protezione Ambientale, Pitagora editore, 2000.
- [19] A. Dal Prà. *Risultati preliminari di ricerche idrogeologiche nella pianura alluvionale tra Astico e Brenta*. estratto da "Tecnica Italiana", Anno XXXVI n. 9-10, 1971.
- [20] A. Dal Prà, M. Mazzola, and U. Niceforo. *Misure sperimentali sulla dispersione delle acque irrigue alle falde nell'alta pianura del fiume Brenta*. riv. Irrigazione e Drenaggio n. 3, 1998.
- [21] A. Dal Prà and F. Veronese. *Gli acquiferi nell'alta pianura alluvionale del Brenta e i loro rapporti con i corsi d'acqua*. 1972.
- [22] Provincia di Vicenza. *Regolamento per la realizzazione di impianti di scambio termico con sonde geotermiche a circuito chiuso*. 2011.
- [23] H.I. Edward and R.M. Srivastava. *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, 1989.

- [24] ENI-AGIP. *Temperature sotterranee. Inventario dei dati raccolti dall'AGIP durante la ricerca e la produzione di idrocarburi in Italia*. 1997.
- [25] O. Farouki. *Thermal properties of soils*. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1981.
- [26] A. Galgaro. *Geoscambio nella Provincia di Treviso*. Provincia di Treviso, 2010.
- [27] A. Galgaro, E. Di Sipio, E. Destro, S. Chiesa, V.F. Uricchio, D. Bruno, R. Masciale, N. Lopez, P. Iaquinta, G. Teza, G. Iovine, Montanari, D.A. Manzella, S. Soleri, R. Greco, G. Di Bella, S. Monteleone, M. Sabatino, M. Iorio, E. Petruccione, A. Giaretta, G. Tranchida, E. Trumpy, G. Gola, and S. D'Arpa. *Proposte metodologiche per la valutazione del potenziale di geoscambio: il Progetto VIGOR*. riv. Acque Sotterranee - Italian Journal of Hydrology, 2012.
- [28] R. Ghezzi. *Prove di portata e definizione dei parametri quantitativi dei pozzi e degli acquiferi: metodi di esecuzione e di interpretazione*. 1993.
- [29] T. Kohl, N. Andenmatten, and L. Rybach. *Geothermal resource mapping - example from northern Switzerland*. Co-founded by the Intelligent Energy Europe - Programme of the European Union, 2013.
- [30] K.C. Lee. *Classification of geothermal resources - an engineering approach*. The University of Auckland - Geothermal Institute, 1996.
- [31] N. Rainiero. *Aspetti legislativi e progettuali inerenti alla realizzazione degli impianti geotermici*. Università degli Studi di Padova - Dipartimento IMAGE, 2009.
- [32] REGEOCITIES. *Panoramica europea sulla legislazione per la geotermia a bassa entalpia*. Geothermics, Vol. XXXII, 721-732, 2003.
- [33] A. Rinaldo, L. Altissimo, M. Putti, G. Passadore, M. Monego, and A. Sottani. *Modello matematico di flusso nei sistemi acquiferi dei territori dell'Autorità d'Ambito Territoriale Ottimale "A.T.O. Brenta" - Prima relazione intermedia*. Università degli Studi di Padova, 2008.

- [34] A. Rinaldo, L. Altissimo, M. Putti, G. Passadore, M. Monego, and A. Sottani. *Modello matematico di flusso nei sistemi acquiferi dei territori dell'Autorità d'Ambito Territoriale Ottimale "A.T.O. Brenta" - Seconda relazione intermedia*. Università degli Studi di Padova, 2009.
- [35] A. Rinaldo, L. Altissimo, M. Putti, G. Passadore, M. Monego, and A. Sottani. *Modello matematico di flusso nei sistemi acquiferi dei territori dell'Autorità d'Ambito Territoriale Ottimale "A.T.O. Brenta" - Relazione finale*. Università degli Studi di Padova, 2010.
- [36] N. Sottani, L. Pretto, C. Ciero, and B. Marcolongo. *Gli acquiferi nella pianura a nord di Vicenza*. Tipolitografica Sociale Artegrafica, 1982.
- [37] M. Stringari, D.A. De Luca, L. Ferrero, and M. Lasagna. *Proposta metodologica di mappatura delle potenzialità geotermiche a bassa entalpia. Il caso di studio del conoide di Lanzo*. 2009.
- [38] K. Terzaghi and R.B. Peck. *Geotecnica*. UTET, 1987.
- [39] Regione Veneto. *Piano di Tutela delle Acque*. 2004.
- [40] Regione Veneto. *PROGETTO STRIGE - Studio per la razionalizzazione degli utilizzi delle risorse geotermiche nella Regione Veneto mediante prelievi d'acqua*. Regione Veneto e ARPAV, 2011.